

THE ORIGIN OF LIFE  
BY NATURAL CAUSES

M. G. RUTTEN  
Professor of Geology  
State University of Utrecht  
Utrecht, The Netherlands

ELSEVIER PUBLISHING COMPANY  
AMSTERDAM, LONDON, NEW YORK  
1971

М. РУТТЕН  
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ  
(ЕСТЕСТВЕННЫМ ПУТЕМ)

Перевод с английского  
Ю. М. ФРОЛОВА

Под редакцией и с предисловием  
акад. А. И. ОПАРИНА

Издательство «Мир»  
Москва 1973

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В книге рассмотрены современные представления о возможности возникновения жизни на Земле и в других областях Вселенной путем постепенных превращений неживой природы, без вмешательства божественных и других сверхъестественных сил. Большая ценность книги по сравнению со всеми другими на эту тему заключается в том, что автор, шаг за шагом описывая те происходившие на Земле с самых ранних периодов ее геологической истории события, на фоне которых могла возникнуть жизнь, привлекает данные буквально из всех областей естествознания. Весь этот огромный материал изложен последовательно, логично и доступно, что делает книгу совершенно незаменимой для специалистов по самым разным дисциплинам.

Предназначена для биологов всех специальностей, для геологов, палеонтологов, физиков, химиков, астрономов, философов, историков науки, для преподавателей высшей и средней школы, для лекторов (в частности, может быть широко использована для пропаганды научного атеизма).

*Редакция биологической литературы*

Проблема происхождения жизни приобрела сейчас неодолимое очарование для всего человечества. Она не только привлекает к себе пристальное внимание ученых разных стран и специальностей, но интересует вообще всех людей мира.

Сейчас считается общепризнанным, что возникновение жизни на Земле представляло собой закономерный процесс, вполне поддающийся научному исследованию. В основе этого процесса лежала эволюция соединений углерода, которая происходила во Вселенной задолго до возникновения нашей Солнечной системы и лишь продолжалась во время образования планеты Земля — при формировании ее коры, гидросферы и атмосферы. Все более интенсивное проникновение человека в космос позволило выявить в различных небесных телах углеродистые соединения, среди которых встречаются и весьма сложные. Эти находки дают возможность судить о доземной эволюции органических веществ; мы теперь знаем, что Земля с самого начала своего существования содержала значительное количество углеродистых соединений.

В настоящее время большое развитие получили исследования по абиотическому синтезу органических веществ в модельных экспериментах. В сходных модельных экспериментах удалось получить открытые многомолекулярные системы — предшественники первых организмов (пробионтов). Сравнительное биохимическое изучение современных наиболее примитивных живых существ позволило теоретически представить себе эволюцию этих веществ и систем на пути к возникновению жизни. Теперь кажется весьма заманчивым попытаться проследить последовательные стадии этой эволюции — от все более усложняющихся химических соединений углерода земных недр до тех наиболее примитивных форм жизни, которые мы обнаруживаем в докембрии в виде ископаемых остатков. Это очень сложная и далеко еще не решенная задача, но на ее решение уже направлены сейчас усилия многих геологов и палеонтологов. Об этом свидетельствует то исключительное внимание, которое было уделено проблеме возникновения жизни на проходившем в 1972 году в Канаде 24-м Международном геологическом конгрессе. Представленные на нем многочисленные палеонтологические находки примитивных организмов обнаружены в очень

древних породах докембрия, возраст которых исчисляется в 2 и даже 3 млрд. лет. Наряду с этим широко развернулось химическое изучение органических соединений, присутствующих в этих и даже в еще более древних породах и имеющих важное биологическое значение.

Одним из первых ученых, стремившихся привлечь внимание геологов и геохимиков к изучению проблемы происхождения жизни, был выдающийся голландский исследователь М. Руттен.

Еще в 1962 году он опубликовал небольшую книгу под названием «Геологический аспект возникновения жизни на Земле», которая учеными кругами мира была воспринята как новое слово по данной проблеме. Всецело разделяя точку зрения, что возникновение жизни является естественным процессом эволюционного развития соединений углерода на нашей планете, Руттен обогатил это положение рядом фактов и наблюдений геологического характера. Руттен и в дальнейшем много работал над проблемой происхождения жизни. Он входил в группу ученых, явившуюся ядром для организации Международного Общества по изучению проблемы возникновения жизни и принимал активное участие в международной конференции по этой проблеме, проходившей в Понт-а-Муссон (Франция), на которой это Общество и было создано.

Новая книга Руттена по проблеме происхождения жизни, русский перевод которой мы предлагаем сейчас советскому читателю, является плодом зрелых творческих усилий крупного ученого-геолога.

В ней Руттен, используя большой фактический материал, рисует ту обстановку, которая создалась на поверхности еще безжизненной Земли после ее формирования как планеты. Особое внимание он уделяет отсутствию в ее «доактуалистической» атмосфере свободного кислорода. Это положение автор обосновывает обширным геологическим материалом. Исключительно большой интерес представляют также приводимые в книге важные палеонтологические данные о докембрийских ископаемых остатках жизни, а также данные по молекулярной палеонтологии.

Книга Руттена «Происхождение жизни» является крупным и оригинальным вкладом в изучение проблемы. Она написана на строго научной основе, но простым, общедоступным языком. Нет сомнений, что ее перевод заинтересует как специалистов, так и широкий круг советских читателей.

*А. Опарин*



Академик А. И. Опарин.

Портрет, сделанный А. Биро на Третьей международной конференции по происхождению жизни в Понт-а-Муссон, Франция (1970).

## ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА

В этой книге излагаются современные взгляды, касающиеся возможности постепенного возникновения жизни на Земле и в других местах Вселенной естественным путем из неживого окружения, без вмешательства творца или других сверхъестественных сил.

Многие считают, что эта проблема недостойна изучения. Так думают те, кто верит в божественные или сверхъестественные силы и соответственно в сотворение жизни. Но в течение последних десятилетий многие ученые интенсивно исследовали возможность самопроизвольного возникновения жизни, и об интереснейших результатах, полученных ими, стоит рассказать. Так или иначе, любой из нас, будь он сторонником той или другой идеи, должен иметь представление о современном состоянии этой области знания. Вопрос этот интересен не только для богословов, философов и естествоиспытателей, но и для каждого человека. Теория происхождения жизни еще резче, чем столь популярная эволюционная теория Дарвина, ставит вопрос о том, как — или, если угодно, почему — мы появились в этом мире.

Предмет нашей книги не только очень обширен, но и весьма спорен. На протяжении последних двух тысячелетий он привлекал внимание многих философов и теологов, но лишь в нашем веке возник более широкий интерес к нему среди естествоиспытателей. Дать окончательный ответ на вопрос о происхождении жизни все еще мешает недостаточно точное представление о событиях, происходивших на заре геологической истории. И все же мы попытаемся привести в систему скудные факты, которыми располагает наука, и построить на их основе некоторые гипотезы. Еще невозможно окончательно подтвердить или отбросить какие-либо из выдвинутых на этот счет предположений, но уже имеется непротиворечивая теория, объясняющая, как жизнь могла возникнуть на Земле естественным путем. Стремительность развития наших воззрений на происхождение жизни выразительно охарактеризовал Дж. Холдейн [1], который писал: «Еще сравнительно недавно люди думали, что человек возник в результате акта божественного творения, а личинки самозарождаются в заплесневелом сыре... Теперь мы знаем, что человек возник в процессе эволюции, а спонтанное зарождение, где бы оно ни встречалось, представляет собой явление редкое».

Понятно, что, несмотря на быстрое накопление фактов, свидетельствующих о возможности естественного возникновения жизни, те, кто верит в акт божественного творения, остаются на прежних позициях. Ведь сама вера в это предполагает, что возможность божественного происхождения жизни нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть научными методами. Вполне естественно поэтому, что верующие на все доводы науки отвечают: «А все-таки мы верим, что жизнь была сотворена господом», — как писал журнал «Harvester»<sup>1</sup> (т. 42, май 1963 г.) в рецензии на мою предыдущую книгу, посвященную этой проблеме.

Все, что мы предлагаем, — это исследовать, какова вероятность того, что жизнь появилась естественным путем: исключена ли такая возможность полностью или же ее надо считать вероятной, а то и очень вероятной. Если мы признаем верным последний ответ, то надо будет выяснить, когда, где и при каких условиях могла впервые появиться жизнь, какими путями неживое могло постепенно стать живым. Таким образом, мы не будем вдаваться в философский аспект вопроса. В книге дается научное обоснование возможности естественного происхождения жизни.

Рассмотрение этого вопроса не только уведет нас к самым истокам геологической истории Земли, но и заставит обратиться почти ко всем естественным наукам. Каждая из них скажет свое слово при обсуждении нашей проблемы: и астрономия, и физика, и химия, и биология, и геология, и всевозможные их «отпрыски», например биофизика и биохимия. Будучи геологом, я все же попытался обсудить все аспекты проблемы, памятуя, однако, при этом слова Бернала о том, что сейчас нет ученого, который мог бы одинаково уверенно разбираться во всех этих областях, да и вряд ли такой человек появится, но это не значит, что сама задача невыполнима. Я счастлив, что могу выразить свою признательность многим специалистам за обсуждение и критику отдельных частей рукописи, за ценные советы и помощь в ознакомлении с литературой, а также за разрешение использовать еще не опубликованные данные.

### Список литературы

Haldane J. B. S., In: S. Fox (Editor), The Origins of Prebiological Systems. Academic Press, New York, N. Y., 1965 («Происхождение предбиологических систем», изд-во «Мир», М., 1966, стр. 99).

<sup>1</sup> «Харвестер» («Жнец») — религиозный журнал, издаваемый в городе Эксетер (Великобритания). — *Прим. перев.*

## Глава I

## ВВЕДЕНИЕ

## 1. ГЕОЛОГИ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ

По специальности я геолог, и, казалось бы, проблема происхождения жизни должна была заинтересовать меня с самого начала. Но вышло иначе. Я был настолько увлечен другими аспектами истории Земли, что происхождение жизни долго оставалось вне круга моих интересов, и лишь благодаря счастливому случаю я смог познакомиться с этой захватывающей проблемой. Должно быть, такое развитие взглядов типично для многих геологов, да и для других ученых моего поколения. Поэтому я счел позволительным начать введение к книге с нескольких слов о том, как началось мое знакомство с проблемой происхождения жизни: это поможет понять нынешнюю волну научного интереса к этому вопросу.

Моя заинтересованность возникла в результате бесед с голландским микробиологом проф. А. Клюйвером из Делфта. Только тогда я понял, как много сил отдали этому вопросу некоторые ученые, особенно микробиологи, биохимики, астрономы и физики. Стало ясно, что геологи должны пересмотреть свою позицию. Мы должны были не только ревизовать существующие факты и найти им место в современной теории, созданной другими науками, но и подумать о направлении геологических исследований, планируемых с целью получить новые сведения, важные для дополнения теории. Об этом будет рассказано в книге, и читатель заметит, что, как я уже сказал в предисловии, прогресс в наших знаниях был особенно стремительным в последнее десятилетие. Но прежде чем отправиться далее, мне кажется разумным поговорить еще немного о том, почему происхождение жизни так долго оставалось для геологов и других ученых книгой за семью печатями.

Как сказано выше, внимание ученых легко доводится до точки насыщения другими предметами исследования. Ведь история Земли чрезвычайно продолжительна. К тому же данные, на которые геолог может опираться, изучая эту историю, нередко весьма скудны. Поэтому геологи склонны концентрировать свое внимание на сравнительно хорошо известных периодах и пренебрегать менее изученными. Что касается проблем, связанных с историей жизни, то геология на основании палеонтологических находок смогла дать нам немало сведений о жизни на Земле в последние

полмиллиарда<sup>1</sup> лет. Хотя палеонтологическая летопись даже за этот период очень неполна, все же успехи палеонтологии привели к тому, что основные усилия были сконцентрированы на изучении истории жизни за последние полмиллиарда лет ее развития, т. е. начиная с кембрия. Геологические данные о времени, к которому относят возникновение жизни (не менее 3 млрд. лет назад), крайне фрагментарны по сравнению с данными о более поздних временах. Мы еще поговорим о том, почему это так, но факт остается фактом — о поздних этапах развития живого геология дает гораздо больше сведений, чем о его раннем периоде и о предполагаемом периоде перехода от неживого к живому.

Помимо такой неравномерности распределения геологических данных, изучению эволюции и происхождения жизни нередко мешает сопротивление со стороны церковников. Мнение науки по этим вопросам и сейчас еще предается анафеме многими фанатичными верующими отнюдь не только из среды духовенства. Геологи, пытаясь преодолеть этот барьер догмы на пути научного поиска, естественно, сконцентрировали усилия на самом бесспорном и доказательном участке — на изучении эволюции живого в последние полмиллиарда лет.

Этому выбору способствовало также то обстоятельство, что научные данные об эволюции живых существ нередко удается более или менее примирить с наиболее популярной церковной догмой, но только если не касаться происхождения жизни, если отодвинуть его к какому-то туманному началу, к некоему «спонтанному зарождению» (*generatio spontanea*). Когда же теория эволюции выступает в союзе со всеобъемлющей теорией, гласящей, что естественные процессы управляли и управляют не только эволюцией живого, но и его происхождением, сопротивление верующих значительно возрастает. Первый вариант оставляет им возможность, молча соглашаясь с теорией эволюции, считать, что законы эволюции все-таки начали действовать лишь после акта творения. Участвуя в диспутах после публичных лекций об эволюции живого, я понял, что часто верующий человек идет на компромисс: в вопросе о возникновении жизни верит Библии, но соглашается с представлением об эволюции однажды сотворенной жизни, уступая палеонтологическим доказательствам.

Итак, у геологов с одной стороны была возможность изучать развитие живого на Земле, имея на руках данные палеонтологической летописи, а с другой — изучать происхождение живого, не имея почти никаких данных. При этом надо учесть, что исследования в области эволюции живых существ принимаются широкой

<sup>1</sup> В международной системе единиц миллиард, т. е.  $10^9$ , обозначается приставкой Г (читается «гига»). Для периода в миллиард лет может также употребляться название «эон» (*aeon, eon*).

публикой с одобрением<sup>1</sup>, тогда как исследования, направленные на выяснение истоков жизни и говорящие о неверности религиозных представлений, встречаются критикой, и притом критикой не по существу. А ответить на такую критику неопровержимыми наглядными доказательствами, как в случае с эволюцией, мы не можем из-за недостатка данных. Поэтому в геологии долгое время царили пораженческие настроения. Общее мнение, впрочем не высказываемое явно, было примерно таким: «Займемся-ка лучше изучением эволюции жизни по данным палеонтологии. Неважно, как появилось живое — путем ли божественного творения или в результате «спонтанного зарождения». Данных маловато, предмет еще не созрел для научного исследования. А пока суд да дело, геологам, лучше оставить этот вопрос в стороне — он может оказаться чересчур скользким».

## 2. БИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Сейчас ситуация совершенно изменилась. Толчок к этой перемене дали не геологи, а биологи и некоторые физики и астрономы, увлекшиеся проблемой происхождения жизни. Интерес к ней сильно возрос после второй мировой войны. Уже давно ответ ищут не в геологии, а в биологии, которая, основываясь главным образом на данных биохимии и микробиологии, сумела прийти к определенным концепциям. Разработана теория возможного пути естественного возникновения жизни, и сейчас ученые увлеченно исследуют, как и в каких условиях мог осуществиться этот переход.

У нас, собственно, еще нет доказательств того, что жизнь действительно появилась на Земле именно таким образом. Но мы уже располагаем приемлемой гипотезой. Теперь слово за геологией, которая должна найти место постулированного биологией процесса возникновения жизни в истории Земли. Как отмечалось в предисловии и как явствует из дальнейшего изложения, новая ситуация в свою очередь сильно повлияла на геологические исследования происхождения жизни.

В целом, как мы видели, проблема эта весьма дискуссионна, ведь она затрагивает самые основы религиозных и этических воз-

<sup>1</sup> Впрочем, даже в такой, казалось бы, развитой стране, как США, и сейчас нелегко убедить публику в существовании эволюции организмов. Это доказывает хотя бы взволнованный заголовок статьи Симпсона [ср. 4]: «100 years without Darwin age enough». Лишь совсем недавно, почти через четверть века после одиозного «обезьяньего процесса» в Дейтоне (штат Теннесси), в США были отменены законы, запрещающие преподавание эволюционной теории [5]. Но и сейчас американских детей учат не поддаваться таким «извращенным» идеям. Например, «дядюшка Артур» в своих весьма популярных «вечерних сказках» одним махом разделался со всей идеей органической эволюции и избругал учителей, осмеливающихся толковать о таких вещах (см. [1, стр. 168]).

зрений любого образованного человека. Выше уже говорилось о сопротивлении, которое церковь всегда оказывала геологам там, где речь шла об исследованиях, связанных с историей жизни. В авангарде исследований происхождения жизни оказались русские ученые во главе с академиком А. И. Опариним. Конечно, развитию этих исследований в СССР сильно способствовало марксистское мировоззрение. Вспомним, что самыми верными сторонниками Опарина были английский биофизик проф. Дж. Холдейн и английский физик (точнее, кристаллограф) проф. Дж. Бернал — оба они, по крайней мере в какой-то период своей жизни, придерживались марксистского учения. Русские ученые намеревались опровергнуть широко распространенную церковную доктрину. Их целью было создание полностью материалистической теории жизни, не только ее эволюции, но и ее происхождения. Короче говоря, они стремились разбить в пух и прах учение о творце.

Я счел необходимым коснуться этой религиозной, антирелигиозной и этической подоплеки проблемы, поскольку она оказывает мощное влияние на многие умы и поскольку человеку трудно абстрагироваться от своего мировоззрения, с тем чтобы по возможности объективно смотреть на факты. Знакомясь с новейшей литературой по интересующей нас проблеме, я не без удовольствия отметил, что большинство работ выдержано в объективном, академичном тоне. Я не нашел работ, в которых научные факты привлекались бы для защиты той или другой доктрины. В них сообщается только о научных экспериментах, а также о геологических, астрономических и теоретических следствиях, вытекающих из полученных фактов. Хотя предлагаемые гипотезы выглядят иногда крайне спекулятивными, они все же построены исключительно на научных данных и по законам чисто научной логики. В этой книге я стремился оставаться на столь же высоком уровне объективности.

## 3. ОБ ЭТОЙ КНИГЕ

Ранний, быстро устаревший вариант этой книги [2] был в общем благосклонно встречен научной прессой, но не смог заинтересовать широкую публику. Из бесед с разными людьми я вынес впечатление, что более общие разделы этой небольшой книги были слишком насыщены техническими подробностями, чтобы заинтересовать широкого читателя. Поскольку наш предмет не лишен интереса для этой весьма расплывчатой личности, я, для того чтобы облегчить ей дело, использовал в своей первой книге два шрифта: крупный — для общедоступных мест и мелкий — для специальных подробностей. Прием этот оказался неудачным, книга выглядела слишком пестрой, так что теперь я решил просто подчеркнуть, что для понимания книги не обязательно вникать во все детали.

Общий план книги вкратце сводится к следующему. Поскольку истоки жизни уходят в глубь геологической истории, мы прежде всего должны узнать, как геологи читают эту историю по данным, сохранившимся в породах земной коры. Об этом коротко рассказывается в гл. II и III. В гл. II мы поговорим о принципе актуализма. Этот принцип гласит, что все процессы, протекающие в наше время в атмосфере, гидросфере и земной коре, происходили и ранее и поэтому нет необходимости постулировать существование каких-либо гипотетических сил, действовавших только в далеком прошлом и впоследствии бесследно исчезнувших. Короче, «настоящее есть ключ к познанию прошлого». В гл. III дается обзор современных радиоактивных методов датирования. С помощью этих методов мы можем определять, когда происходили события, связанные с образованием данной породы.

Эти две главы составляют основу для дальнейшего изложения. Они не имеют прямого отношения к проблеме; тот же материал в более или менее подробном изложении можно найти в любом учебнике общей геологии. И все же они необходимы, потому что в них дается ответ на вопрос, каким образом сведения о горных породах могут быть использованы для выяснения истории Земли.

В гл. IV рассказывается о том, как биологи изучали возможность естественного возникновения жизни, дав этим толчок к современному прогрессу в этой области. Рискую наскучить читателю многократным повторением, я все же упомяну уже здесь, что эти исследования показали невозможность «самозарождения» жизни в условиях современной кислородной атмосферы. Оно могло, как теперь ясно, происходить лишь в первичной бескислородной атмосфере, обладавшей восстановительными свойствами. Вот почему в последнее время исследователи направили свои усилия на выяснение вопроса о том, имела ли Земля именно такую первичную атмосферу, и если имела, то каковы были условия в то время.

Из гл. V мы узнаем, что, по данным астрономии, межзвездная пыль и атмосферы планет обладают восстановительными свойствами. Земля с ее богатой свободным кислородом атмосферой — исключение среди планет.

В гл. VI описаны химические эксперименты по синтезу в искусственной бескислородной атмосфере, без участия живых существ, соединений, обычно синтезируемых организмами. Эти соединения, которые мы будем называть *органическими*, в литературе часто называются *абиогенными*. Основной результат этих опытов — доказательство возможности образования в искусственной бескислородной среде множества таких «органических» соединений за счет почти любого вида энергии. Более того, в таких условиях неорганический синтез «органических» веществ — не исключение, а правило. В дополнение для не слишком искушенного в химии читателя дается краткий обзор современных аналитических мето-

дов, используемых в органической химии. Изучение химического аспекта проблемы стало возможным только благодаря высокой специфичности и замечательной точности новых методов анализа.

В гл. VII и VIII обсуждается вопрос, через какие промежуточные этапы могло идти развитие от синтеза «органических» молекул в условиях первичной атмосферы до появления жизни. Не зная, как шло это развитие в действительности, мы все же можем создать себе общее представление о путях, ведущих от неживого к живому. В этих двух главах проводится мысль, что в те времена метаболизм живого был гораздо проще, чем теперь, после примерно 3 млрд. лет развития. Эта тема заканчивается в гл. IX кратким рассмотрением основных черт дальнейшей эволюции живого.

В гл. X описаны условия, в которых развивалась жизнь на Земле. Ясно, что первые соединения, возникавшие за счет неорганического синтеза, должны были каким-то образом концентрироваться и сохраняться; в то же время в разные периоды преобладали либо процессы, способствующие разделению веществ, либо процессы, способствующие их перемешиванию. Такие процессы были необходимы для осуществления химических реакций между ранее возникшими соединениями, что в свою очередь приводило к дальнейшему углублению процесса перехода от неживого к живому.

Из гл. XI читатель узнает, что неметаморфизированные горные породы докембрия можно найти только в некоторых районах Земли, в так называемых древних щитах. В гл. XII описываются основные типы ископаемых остатков, которые находят в таких породах. Живые существа оставляют напоминание о себе или в виде макроскопических биогенных отложений, образовавшихся в результате их метаболизма (например, водорослевые известняки), или в виде молекулярных биогенных отложений, т. е. органических молекул, частично сохранившихся в современных им осадочных породах, или, наконец, в виде настоящих окаменелостей. Настоящие окаменелости встречаются в породах не старше 2 млрд. лет, а биогенные отложения и молекулярные ископаемые найдены даже в породах древнее 2,7 млрд. лет, что служит доказательством существования жизни на Земле уже в ту эпоху. Более того, окаменелости и молекулярные ископаемые иногда встречаются в осадочных породах древнее 3,2 млрд. лет, т. е. в самых древних из известных осадочных пород. Но эти находки еще требуют подтверждения.

В гл. XIII обсуждаются сведения, которые можно получить, изучая состав и строение осадочных пород. К раннему и среднему докембрию строго приурочены некоторые особые типы осадков, и это можно связать с существованием в то время бескислородной примитивной атмосферы. Начиная с позднего докембрия появляются другие осадки, видимо образовавшиеся только при наличии кислородной атмосферы. По предварительным данным, бескислородная атмосфера существовала на Земле более 1,8 млрд. лет назад,

а кислородная существует уже 1,45 млрд. лет. Вероятно, где-то в промежутке между этими двумя периодами и состоялся переход к современной кислородной атмосфере.

После рассмотрения различных геологических процессов, имеющих то или иное отношение к происхождению жизни (гл. XIV), мы продолжим обсуждение различий между двумя атмосферами (гл. XV). Читатель узнает, что доля «неживого» кислорода, появляющегося в результате расщепления воды, никогда не превышала одной тысячной современного содержания кислорода в атмосфере. Весь остальной кислород создан фотосинтезирующими организмами, восстанавливающими двуокись углерода. Значит, весь или практически весь свободный кислород нашей атмосферы — продукт жизни. И это чрезвычайно важно: примитивную атмосферу мы можем предварительно определить как атмосферу с содержанием кислорода не выше 1% его содержания в современной атмосфере.

В гл. XVI дан набросок истории атмосферного кислорода и двуокиси углерода.

В гл. XVII рассмотрена возможность существования внеземной жизни. Об этом много спорят с тех пор, как в 1961 году в некоторых метеоритах были обнаружены органические соединения и «организованные элементы» — под этим осторожным названием, видимо, подразумеваются ископаемые остатки организмов. Несмотря на усиленное изучение этих остатков, возможность существования жизни вне Земли остается недоказанной. Но она и не отброшена полностью, и, по-моему, объективная оценка фактов приводит к заключению, что найденные в метеоритах остатки могут иметь биогенную природу.

Наконец, в гл. XVIII даются выводы. Как сказано в предисловии, естественное самопроизвольное возникновение жизни не доказано, но его можно считать в высшей степени вероятным. Эта идея, казавшаяся ранее химерической, стала теперь законченной теорией, опирающейся на огромное число самых разнообразных фактов, полученных всеми естественными науками. Более того, можно доказать, что в истории Земли был период, когда на протяжении примерно 2 млрд. лет преджизнь и ранняя жизнь сосуществовали, и переход от неживого к живому совершался в это время неоднократно, может быть даже много раз.

#### Список литературы

1. Maxwell A. S., Uncle Arthur's Bedtime Stories, Review and Herald Publ., Washington D. C., I., 192 pp. (1964).
2. Rutten M. G., The Geological Aspects of the Origin of Life; Elsevier, Amsterdam, 146 pp., 1962.
3. Simpson G. G., The Meaning of Evolution, Mentor Books, New York, N. Y., 192 pp., 1949.
4. Simpson G. G., This View of Life, Harcourt, New York, N. Y., 1964.
5. Sprague de Camp L., The end of the monkey war, Sci. Am., 220 (2), (1969).

## ПРИНЦИП АКТУАЛИЗМА

### 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ

Жизнь, как уже сказано в введении, появилась на Земле в ранний период ее истории. Поэтому, прежде чем приступить к рассмотрению ископаемых остатков ранней жизни, нам надо узнать, каким образом геологи читают по горным породам историю Земли и как удается датировать события этой истории. В этой главе обсуждается первый вопрос, а датирование геологических событий рассматривается в гл. III.

Как мы увидим, главная сложность в установлении основных принципов реконструкции геологической истории заключается в том, что здесь трудно оперировать точными понятиями. Геология как наука описательная и в то же время наука историческая изучает гораздо более сложные и уникальные события, чем те, которыми занимаются экспериментальные науки. Не все ясно понимают эту разницу между науками описательными и экспериментальными. Но в нашем случае она как раз очень важна для понимания того, как удастся восстановить историю развития жизни.

Как мы увидим, в настоящее время геологическое мышление опирается на принцип *актуализма* (или *униформизма* — менее удачный термин, принятый в странах английского языка)<sup>1</sup>. Этот принцип предписывает нам в поисках объяснения событий геологической истории обращаться к процессам, идущим на Земле и в ее недрах в наши дни. Иными словами, он гласит, что «настоящее есть ключ к познанию прошлого».

### 2. АКТУАЛИЗМ И УНИФОРМИЗМ

Оба термина почти равнозначны. Они выражают допущение того, что геологическая история обладает некой преемственностью, целостностью. Англичане и американцы используют в основном термин «униформизм», а европейцы с континента предпочитают термины *actualisme* (французы) или *Actualismus* (немцы). Путем простого калькирования создан английский вариант — *actualism*.

Но, кроме тонкостей употребления в разных языках, между этими двумя словами есть немаловажное различие. Эти два терми-

<sup>1</sup> В отечественной геологической литературе принято под униформизмом понимать концепцию, принцип, а под актуализмом — метод. Автор не придерживается такого разграничения. — *Прим. перев.*



на освещают две стороны одного и того же фундаментального принципа современной геологии. Поскольку законы природы неизменны во времени, физические процессы, управлявшие событиями геологической истории, также не претерпевали изменений. Иначе говоря, эти события в течение всего геологического прошлого были единными по своей природе, однотипными (*uniform*), что и выражено термином «униформизм» (см. [4]). С другой стороны, раз мы приняли, что законы природы не меняются со временем, то можно изучать идущие сейчас геологические процессы, а полученные результаты распространять на геологическое прошлое, что позволяет, с одной стороны, осмысливать события этого прошлого и, с другой, включать данные различных отраслей геологии, изучающих современное состояние Земли, в общую генетико-историческую картину. И так, «актуальные», идущие сейчас процессы помогают понять прошлое. Отсюда слово «актуализм».

Если я предпочитаю применять в этой книге термин «актуализм», то вовсе не из-за своего неанглийского происхождения. Во-первых, я считаю, что этот термин лучше выражает наш основной принцип — двигаться к объяснению истории Земли от «актуальных», сегодняшних процессов, идущих на наших глазах. С другой стороны, слово «униформизм» часто понимают буквально, как некое «единообразие». Авторы этого термина, предложившие считать униформизм основным принципом исторической геологии, отнюдь не вкладывали в него такого смысла. Такое понимание лишь создает путаницу в специальных трудах, делая их непонятными для неспециалистов. Приведу лишь один пример. Хотя ученые, предложившие принцип униформизма, прекрасно знали о ледниковых периодах, один современный автор, понимая униформизм как «теорию единообразия», делает поразительное замечание: «Теория униформизма, высказанная Геттоном, получила широкое приложение. Но последовательное применение этой теории к палеоклиматологии вызывает немалые трудности, так как климат — явление меняющееся» [11]. Здесь не делается различия между неизменными законами природы и переменными величинами, входящими в уравнения, основанные на этих законах и определяющие в конечном итоге результат физических процессов, формирующих историю Земли.

Немало путаницы, возникшей из-за употребления термина «униформизм», содержит том трудов симпозиума, посвященного принципу единства природы [2]. Эта путаница начинается уже с названия тома: «Uniformity and Simplicity» («Единообразие и простота»). В статьях сборника часто повторяется мысль, что неизменность физических законов — лишь частный случай более общего принципа простоты. По этому принципу, неизменность законов физики во времени — самое простое предположение, следовательно, оно верно. Или, как сказал проф. философии Гудмен [3]: «В кон-

це концов принцип единообразия переходит в принцип простоты, не специфичный для геологии, а пронизывающий всю науку и даже нашу обыденную жизнь».

Далее проф. Гудмен пишет: «Трудности и преимущества в работе геолога, несмотря на то, что он занимается описательной или исторической наукой, ничем по сути не отличаются от того, что выпадает на долю других ученых». Это обычная ошибка, встречающаяся не только у специалистов по методологии науки. Она состоит в переносе основных принципов экспериментальных наук на науки описательные. Опасность, связанную для биологии с такой неправомерной логической операцией, хорошо выразил зоолог-систематик проф. Майр [9]: «Разработке теории в таксономии, как и в биологии вообще, сильно мешают попытки втиснуть биологические концепции в смиренную рубашку концепций и теорий, созданных методологами и философами от физики. Многие обобщения, основанные на данных физических наук, неприменимы к биологии. А главное — многие факты и открытия биологии не относятся ни с чем в физике, и потому их не включают в философию науки, основанную на физике. Биология неизбежно создает свои концепции, не имеющие соответствий в физике, и это объясняется не только огромной сложностью биологических систем, но в особенности тем фактом, что организмы содержат в себе исторически сложившуюся генетическую программу — результат трех миллиардов лет естественного отбора. Другое явление, определяющее иную, чем в физике, расстановку ударений, — это уникальность почти всех биологических объектов, стоящих выше молекулярного уровня (например, особь, популяция, вид и т. д.)... Многие термины, используемые при разработке биологических теорий (например, родство, вид, классификация, популяция и тому подобные), применяются (хотя зачастую в совершенно ином смысле) и при создании теорий в небиологических науках. Пока биологи пытались использовать эти термины в их «физическом» смысле, пока они оставались в рамках физических теорий, им не удавалось приспособиться к своеобразным особенностям биологических объектов».

*Mutatis mutandis*<sup>1</sup>, эти мысли Майра можно отнести к любой описательной науке, в том числе и к геологии. Поэтому я решительно не согласен с проф. Гудменом, когда он в упомянутой выше статье пишет, что, поскольку «геолог в своей работе встречается с теми же затруднениями и успехами, которые знакомы другим ученым, он может забыть старый бесполезный спор об униформизме... (и) может с большей пользой для дела направить свои философские изыскания на фундаментальные и обширные проблемы теории классификации, простоты, измерений и картирования».

<sup>1</sup> Внося соответствующие изменения (лат.). — *Прим. перев.*

Нет, напротив, мы не сможем ни классифицировать, ни измерять, ни даже проводить элементарное картирование, не имея понятия об основном принципе (или принципах) восстановления истории Земли по ее современному облику.

Помня о единстве и неизменности законов природы, мы должны попытаться проследить приемлемые линии рассуждения при прочтении геологической истории. Часто говорят, что эти логические нити, эти основы теории довольно неопределенны. Это объясняется, с одной стороны, недостатком данных, а с другой — сложностью и уникальностью всех геологических явлений. Физик может, к примеру, кипятить и замораживать воду при разных условиях и выявить физический закон, лежащий в основе наблюдаемых событий. А в геологии мы редко знаем, в каких условиях проходил эксперимент, поставленный самой природой, и обычно не можем повторить его при тех же или каких-то иных условиях. Иногда (например, в случае донной морены) мы с уверенностью можем сказать, что данное древнее отложение сформировалось при температуре ниже нуля. Но и в этом, казалось бы, идеальном случае трудно отличить морену от грязевых потоков, образовавшихся при положительной температуре. Если возьмем другую точку отсчета — точку кипения воды, то и здесь трудно бывает понять, протекали ли, скажем, некоторые древние вулканические процессы или процессы формирования рудных жил в парообразной или же в жидкой среде.

Итак, данные, которыми располагает геолог для восстановления геологической истории, в противоположность данным физических наук довольно неопределенны. Этим и объясняется неопределенность основных принципов геологии. Таких общих принципов предлагалось немало, но я здесь буду говорить только об актуализме и о его главном «противнике» — катастрофизме. Однако, прежде чем углубиться в эти вопросы, я хотел бы посвятить один раздел главы философским основам геологии. Тогда мы лучше сможем понять позицию, занимаемую геологами.

### 3. ФИЛОСОФИЯ ГЕОЛОГИИ

Любые рассуждения о философии геологии могут показаться, мягко говоря, необоснованными, потому что редко среди геологов можно встретить хорошего философа. В значительной степени это объясняется тем, что в геологии мы сталкиваемся с огромным множеством разрозненных фактов и с таким количеством правдоподобных теорий, что на них трудно возвести устойчивое логическое построение. Но в поисках истоков жизни нам придется далеко проникнуть в геологическое прошлое Земли, мы должны оперировать геологическими данными и пытаться интерпретировать их, поэтому небесполезно было бы узнать, как работает мышление геолога.

Геологические явления настолько разнообразны, что словесное описание не может дать о них полного представления. Даже простое обнажение пород нельзя описать словами так, чтобы не видевший его человек получил всестороннюю информацию о нем. Послушайте любого геолога, впервые съездившего в те края, о которых он много читал. Все оказалось совершенно иным, чем он представлял себе по книгам. Покажите европейскому геологу Аппалачи или Скалистые горы или американцу Альпы, и результат будет такой же. Оба они скажут, что были счастливы увидеть своими глазами эти горы и дополнить непосредственными впечатлениями обрывочную и сумбурную картину, вынесенную из чтения литературы.

Геологические описания обычно неполны. В них или подчеркивается какая-то одна, главная, по мнению автора, сторона, что ведет к излишнему упрощению, или скрупулезно перечисляются детали, причем автор забывает, что лишь немногие его читатели смогут представить себе по этим деталям общую картину. Невозможность передать все словами заставляет снабжать описание как можно большим числом иллюстраций — карт, разрезов, фотографий. И все же преобладает тенденция увидеть все своими глазами — «hingehen und gucken» (пойти туда и посмотреть), как сказал один швейцарский геолог.

Ясно, что такая почти полная неспособность выразить свои наблюдения в словах не очень способствует созданию философских эссе на геологические темы. Надеюсь, это отступление поможет понять, почему геологи редко обсуждают основные принципы своей науки, такие, как актуализм. В те давние дни, когда эти принципы были высказаны, они вызвали поток критики и апологий, но затем интерес к ним быстро угас. Геолог обладает, так сказать, априорным знанием этого фундаментального принципа, не зная его точного смысла, не обсуждая его каждый день. Этот принцип образует основу научного мышления геолога, но имеет довольно отдаленное отношение к его повседневной работе. Может быть, поэтому единственная современная подробная работа о принципе актуализма (и об униформизме) написана не геологом, а химиком по образованию, проф. Хойкасом [6]<sup>1</sup>. Правда, в последние годы интерес к этим основным принципам возрос. Появились две книги, в которых среди других основных понятий геологии обсуждается и актуализм [1, 5]. Кроме того, изданы труды уже упомянутого симпозиума [2].

В предыдущем разделе я писал, что трудно дать точную формулировку основных принципов геологии, таких, как актуализм.

<sup>1</sup> Издание 1963 года, в котором к названию «Естественный закон и божественное чудо» добавлен подзаголовок «Принцип единообразия в геологии, биологии и геологии», ничем не отличается от первого издания, кроме расширенного предисловия и краткой морали в конце.

Приходится довольствоваться их расплывчатым изложением, оставляющим простор для толкований в сомнительных случаях. Правда, практика показывает, что такие затруднительные случаи встречаются нечасто и не имеют большого значения, так что для работы достаточно и общего представления об основных принципах. В этой главе я хочу дать читателю именно общее представление, останавливаясь на возможных отклонениях, только если они важны для выяснения происхождения жизни. Познакомиться с принципом актуализма подробнее можно по цитированной выше литературе.

#### 4. КАТАСТРОФИЗМ

Как уже отмечалось, актуализм пришел на смену более старому принципу катастрофизма — теории повторяющихся катастроф, популярной в начале прошлого века. Эту теорию обычно (и не совсем справедливо; [12]) связывают с именем французского натуралиста Ж. Кювье (1769—1832).

Теория катастроф объясняет основные разрывы в геологической истории периодически повторяющимися катастрофами, такими, как наводнения, вулканические извержения, сильные и внезапные движения земной коры. Эти катастрофы приводили к резкой смене фаун, массовому вымиранию видов, орогеническим переворотам, внезапным трансгрессиям моря и т. п. Сейчас Земля находится в довольно стабильном состоянии, и причины, приводившие в прошлом к катастрофам, не действуют. Может быть, древние повторявшиеся катастрофы и сравнимы в какой-то степени с современными геологическими процессами, но по интенсивности и размаху они не идут ни в какое сравнение с современными. Итак, катастрофизм постулирует принципиальное различие между настоящим (и другими спокойными периодами) и событиями, имевшими место во время периодов катастроф.

Раньше считалось, что, судя по древним пластам осадочных пород, лик Земли в разные эпохи менялся настолько сильно и был так непохож на современный, что объяснить эти различия можно лишь крупными, повторявшимися катастрофами. Из них в наибольшей чести были внезапные опускания земной коры и тектонические поднятия — уважение к ним внушали библейские мифы о потопе и описание извержения Везувия у Плиния Младшего. Библия и Плиний входили в обязательный круг чтения каждого образованного европейца XVIII—XIX веков. Так не логично ли было предположить, что геологические явления прошлого объясняются подобными катастрофами? Тогда образование горной цепи — это просто-напросто внезапный катастрофический подъем участка земной коры; в наше спокойное время человек не видел ничего подобного. Следы древних морей на суше — свидетельство

случившихся в незапамятные времена потофов, а внезапное вымирание «допотопной» фауны — результат других, пока непонятных, но столь же грозных бедствий.

Теория катастроф, постулировавшая периодическое повторение глобальных катастрофических бедствий, более или менее сравнимых с легендарным потопом и с другими, достоверно известными событиями, была приемлема для церкви. Церковники благосклонно относились к теории, примирявшей библейские мифы и открытия естественных наук.

#### 5. АКТУАЛИЗМ

Актуализм не отрицает, что внезапные катастрофы случаются сейчас и случались на протяжении всей геологической истории. Но они никогда не принимали глобального характера, и их результаты несравнимы с результатами незаметно идущих сейчас процессов, действующих на протяжении миллионов лет. Теория актуализма утверждает, что известные или теоретически возможные процессы, идущие сейчас в атмосфере, гидросфере и литосфере, действовали и на протяжении всей геологической истории. Более того, она утверждает, что любое явление геологического прошлого — результат одного или нескольких таких процессов. Другими словами, эволюция Земли, ее развитие до современного состояния, обусловлены причинами, которые действуют и сегодня, и нет необходимости для их объяснения предполагать существование каких-то иных, ныне исчезнувших движущих сил.

Ясно, что принцип актуализма относится только к геологической истории Земли, т. е. к истории, которую мы читаем по горным породам. Более ранняя история Земли, когда наша планета была еще расплавленной или представляла собой уплотненное облако межзвездного вещества, не оставила следов в земных породах, и, следовательно, эту историю можно назвать догеологической. Поэтому критика идей шотландского геолога Джеймса Геттона (1726—1797) физиком Уильямом Томсоном (1824—1907), более известным как лорд Кельвин, основана на недоразумении. Геттон пишет, что, изучая по горным породам геологическую историю, он не мог найти «следов начала». Томсон возражал, что физика и астрономия свидетельствуют о том, что Земля существует не вечно, «начало» должно быть, и Геттон ошибся. Но Томсон говорил о догеологической истории Земли, а Геттон — о геологической, и критика Томсона направлена в пустоту.

Основу теории актуализма заложил Геттон, но лишь почти через полвека она стала общепринятой, заменив теорию катастроф. Этим мы обязаны в основном другому шотландцу, Чарльзу Ляйелю (1797—1875). Идеи Геттона противоречили не только главенствовавшей в то время теории непутизма, развитой немецким геоло-

гом А. Вернером (1749—1817), но и геологии, учившей, что одна из прерогатив божественного провидения — возможность пренебрегать законами природы и свысока вмешиваться в земные дела [7].

Принцип актуализма стал общепринятым только под влиянием великого труда Ляйеля «Основы геологии, или попытка объяснить древние изменения поверхности Земли действующими и сейчас процессами» (1830—1833).

Как уже говорилось во втором разделе этой главы, актуализм подразумевает лишь единство причин, а не постоянство условий или неизменность результатов. Мы уже видели, что к неправильному пониманию данного принципа особенно легко прийти, если использовать термин «униформизм». Никто и не говорил, что процессы, идущие на Земле, не подвержены большим и малым количественным изменениям. Главные из них — это, например, перемены климата, ослабление и усиление процессов выветривания, изменение интенсивности движений коры, эрозии, переноса, осадкообразования, колебания вулканической активности и т. д. Но, повторяю, все это чисто количественные изменения.

Вот что еще важно: катастрофизм требует таких катастроф, которые человеку трудно даже вообразить. Влияние Чарльза Ляйеля на современную геологическую мысль состоит в основном в том, что он показал, как незначительные изменения, накапливающиеся достаточно долго, могут привести в конце концов к последствиям столь значительным, что их невольно относят на счет каких-то гигантских катастроф. Извержение вулкана, землетрясение или цунами производит на людей огромное впечатление, особенно если такое событие случается в густонаселенном районе. Убедительный пример: местное наводнение, разлив двух крупных рек, Тигра и Евфрата, запомнилось на тысячи лет и вошло в священное писание под именем всемирного потопа.

Но и самые крупные, с человеческой точки зрения, катастрофы не могут удовлетворить теории катастрофизма. Возьмем наводнения: они вызываются выпадением необычно большого количества осадков (как в Месопотамии), цунами — волнами от подводных землетрясений (как на берегах Тихого океана) или штормовым нагоном воды на приморские низменности (как в Голландии). Любое из таких наводнений может быть столь значительным, что войдет в народный эпос как опустошительное бедствие, уничтожившее всякую жизнь. Но ни одно из таких наводнений не могло бы изменить весь облик Земли. Эффект его в любом случае остается местным. Только если такие наводнения случаются постоянно, они могут приобрести геологическое значение. То же относится и к извержениям вулканов. Описанное Плинием Мл. извержение разрушило всего три города (Геркуланум, Помпеи и Стабию), расположенные на юго-западном склоне Везувия. И если бы при

катастрофе не погиб дядя Плиния Младшего, мы вряд ли имели бы подробный отчет даже об этом крупном извержении.

Случающиеся время от времени наводнения, землетрясения, даже сопровождающиеся извержением, не противоречат принципу актуализма. Эти страшные для человека события, если их рассматривать в масштабах всей Земли, незначительны. Их причины — постоянно идущие геологические процессы, они никогда не охватывают очень больших районов и не приобретают глобального значения.

Ляйель в своих «Основах» подчеркнул эту ограниченность в пространстве и времени любых крупных, с нашей точки зрения, катастроф. В конце первого тома, после описания опустошений, вызванных вулканической деятельностью в районе Неаполя, мы читаем<sup>1</sup> [8]: «...признаки перемен, запечатленные на ней [этой области] в течение периода, когда она служила жилищем человеку, могут представиться в веках грядущих указанием на целый ряд беспримерных несчастий... Если те, которые изучают эти явления... сообразят многочисленные доказательства часто повторявшихся катастроф, которым подвергалась эта страна, они, может статься, пожалуют о несчастной судьбе существ, коим суждено было жить на планете во время ее зародышного и хаотического состояния, и возблагодарят судьбу, что их счастливому поколению удалось избежать подобных картин анархии и беспорядка». Далее мы читаем: «Но каково же было действительное состояние Кампании во время этих годин жестокого потрясения? Климат, в котором дыхание неба благоухает сладостно и заманчиво — природа сильная и роскошная, не имеющая ничего себе подобного по своим произведениям, — берег, некогда бывший волшебным краем поэтов и любимым убежищем великих людей. Даже тираны создания люббили эту заманчивую страну, берегли ее, украшали ее, жили в ней, умирали в ней. Правда, ее жители не наслаждались изъятием из бедствий, составляющих удел человечества; но главное зло, ими претерпенное, должно быть скорей приписано нравственным, а не физическим причинам — бедственным событиям, над которыми человек мог бы иметь некоторую власть, чем неизбежным катастрофам, происшедшим от подземной деятельности. Когда Спартак стал лагерем со своими десятью тысячами гладиаторов в древнем угасшем кратере Везувия, вулкан этот сделался несравненно большим предметом ужаса для Кампании, чем он был когда-либо с тех пор, как снова возжег свой огонь» ([8], т. I, стр. 654—655).

Как мы видим, трудно дать строгое определение актуализма. Между катастрофизмом и актуализмом нет четкой границы. Может

<sup>1</sup> Цитируется по русскому изданию: «Основные начала геологии, или новейшие изменения Земли и ее обитателей, Чарльза Ляйэлла», М., 1866, т. II, стр. 61—62. — *Прим. перев.*

быть, мы смогли бы ее провести, если бы наука давала нам точные количественные сведения обо всех геологических процессах. Тогда можно было бы условиться о точном разграничении, например: движения коры со скоростью до 1 см/год — актуалистический процесс, а более быстрые движения надо считать катастрофическими. Но пока геологу в решении подобных вопросов приходится в большей или меньшей степени опираться на интуицию, а интуиция у каждого работает по-своему.

Возьмем наводнения: подъем воды на 1 м — довольно обычное дело, а 10 м — это уже нечто исключительное с точки зрения бременного человеческого существования. Но если бы мы нашли геологические свидетельства случившегося некогда гигантского потопа, вызвавшего подъем воды на 100 м, неверно было бы говорить здесь об актуалистическом процессе. К счастью для геологов, подобных катастроф, видимо, в действительности не было. Наводнения обычно остаются в пределах 1—10 м, очень редко — чуть выше. Однократное извержение вулкана наносит вред лишь части близлежащей местности. И радиус действия даже самых страшных землетрясений ограничен. Только благодаря неоднократному повторению эти катастрофические с нашей точки зрения, но незначительные в масштабе Земли события могут за тысячи и миллионы лет стать в целом фактором глобального значения.

Неспециалисту, физику или химику, может показаться, что отстаивать столь упорно этот основной принцип геологии — значит ломиться в открытые ворота. В самом деле, что может быть более естественным, чем привлечение сведений о современных процессах для объяснения прошлого? Разве нельзя считать, что это всего лишь частный случай принципа «бритвы Оккама»? Но дело в том, что представление о быстротекущем геологическом времени прочно укоренилось в геологической литературе и в подсознании большинства геологов. Часто говорят, что год человеческой жизни равен миллиону лет в жизни Земли. Каждый кинолюбитель поймет, как изменились бы его фильмы, если бы их прокручивали в миллион раз быстрее. Самое медленное движение коры, например со скоростью 1 мм в год, покажется катастрофическим, если пересчитать его на другой промежуток времени: 1 км (т. е. 1 млн. мм) в 1 млн. лет. В следующем разделе вы поговорим о влиянии такого «сжатия времени», характерного для всей геологической литературы и геологического мышления вообще. Без этого сжатия невозможно обойтись. Мы не способны представить себе период «хотя бы» в 1 млн. лет; диаграмма геологической истории Земли с мелкими делениями ценой в 1 год не поместится ни в одной книге. Итак, по необходимости мы представляем себе ход геологического времени сильно ускоренным, но надо четко понимать, какие опасности таятся в такой особенности нашего мышления.

## 6. АКТУАЛИЗМ И ВРЕМЯ

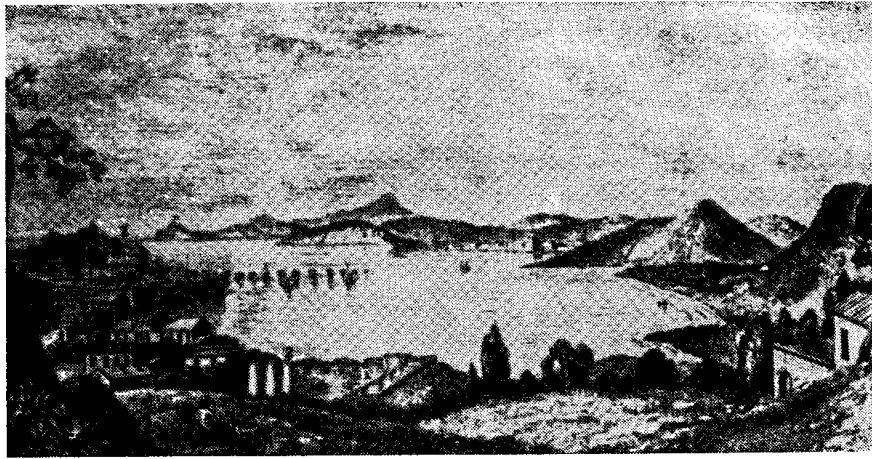
Мне думается, что Ляйелевское описание великих перемен, вызываемых медленно действующими процессами за достаточно долгое время, больше, чем что-либо другое, способствовало переходу



Фиг. 1. Колонны так называемого храма Сераписа в Позцуоли близ Неаполя. На них хорошо видны колебания уровня моря, благодаря чему этим колоннам отведено важное место в труде Чарльза Ляйеля [8]. Трансгрессия моря ясно отмечена темными кодами сверлящих моллюсков, расположенными не выше 2—3 м над основанием колонн. Выше сильно источенной зоны видны отдельные отверстия; они проделаны моллюсками во время более поздней, гораздо более сильной, но краткой трансгрессии. Сейчас уровень моря стоит намного ниже; вода у основания колонн — пресноводный пруд, устроенный городскими властями вокруг развалин.

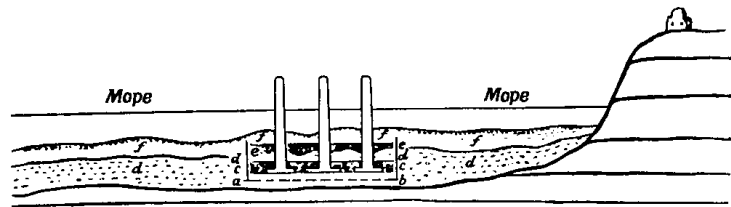
геологов с позиций катастрофизма к актуализму. Время — союзник актуализма. Дайте срок, и смещение коры на 1 мм в год создаст горные цепи или океаны. Дайте срок, и высокие горы сотрут-

ся эрозией и целые моря заполнятся материалом, снесенным с этих гор. Дайте срок, и вулкан погребет все окрестности под толстым слоем лавы и пепла, даже если ни одно из его извержений



Фиг. 2. Вид на Балеийский залив вблизи Неаполя.

Изучив историю вулканических извержений и медленных движений коры в этой области, Чарлз Ляйель высказал ставший теперь классическим принцип актуализма. Городок Поццуоли расположен слева (1), колонны так называемого храма Сераписа — слева на первом плане (2). Оригинальный рисунок из книги Ляйеля [8].



Фиг. 3. Разрез через так называемый храм Сераписа в Поццуоли близ Неаполя.

Видны пласты отложений, от которых колонны затем были освобождены. Указан наивысший уровень моря, отмеченный на колоннах ходами морских сверлящих моллюсков (см. фиг. 2). *a—b* — мозаичный пол здания; *c—c* — темные морские отложения; *d—d* — первый слой вулканического пепла; *e—e* — пресноводные известковые отложения; *f—f* — второй слой вулканического пепла.

не сравнится с описанным у Плиния. Дайте срок, и из прежней фауны постепенно разовьется новая, а древние формы почти незаметно вымрут.

Нам, живущим в совершенно ином масштабе времени, может показаться, что горная цепь вздыбилась внезапно, океан «ушел под землю» после гигантской катастрофы, одно мощное извержение вулкана сразу изменило ландшафт, а древняя фауна вымерла после какого-то ужасного бедствия и вместо нее была сотворена новая.

Из примеров, приведенных Ляйелем, пожалуй, наиболее интересно описание окрестностей города Поццуоли близ Неаполя. На двух рисунках и небольшом схематическом разрезе (фиг. 1—3) видно, что в периоды подъема уровня моря сверлящие моллюски оставляли следы своей работы на колоннах древнеримских развалин, считавшихся во времена Ляйеля руинами храма Сераписа. От других периодов, когда суша поднималась, остались слои вулканического пепла и озерных отложений. Эти подъемы и опускания суши происходили гораздо позже библейского потопы. Притом они относятся к историческим временам, и хотя вулканическая деятельность в этом районе отмечена в хрониках, сам город Поццуоли остался незатронутым ею. Описанные колебания уровня Средиземного моря происходили почти на наших глазах, но никаких всеокрушающих катастроф в этой местности не наблюдалось. Надо ли искать других доказательств того, что незначительные причины могут произвести большой эффект, если они действуют достаточно долгое время!

## 7. ВРЕМЯ И ГЕОЛОГ

Итак, при изучении процессов, управляющих развитием Земли, мы нередко бываем сбиты с толку их медленностью. Наш недолговечный и эгоцентрический разум склонен считать Землю неизменной и устойчивой. Ничего подобного!

Континенты как бы плавают в более плотном субстрате, или, выражаясь научным языком, находятся в *изостатическом равновесии*. В действительности никакого равновесия нет; геолог знает, что материки постоянно то погружаются, то поднимаются. Вулканы, как гигантские кроты, выносят часть плотного глубинного вещества на поверхность. Эрозия разъедает горы и возвышенности, и обломки их откладываются в низинах и морях. Чтобы изучать историю Земли, надо отказаться от эгоцентрического образа мыслей и принять как нечто само собой разумеющееся медленность геологических процессов и огромную длительность геологической истории.

Геолог видит не «твердь земную», а постоянно меняющуюся картину. Он видит, как образуется каменная неразбериха Альп, или Скалистых гор — образуется лишь для того, чтобы тут же стать жертвой эрозии. Он видит, как континенты заливаются морями, как мелкие моря бесследно высыхают, уступая место бога-

той наземной флоре и фауне, как на недавнем морском дне разыгрываются впечатляющие вулканические явления. Геолог может видеть, как перемещаются континенты, как они разламываются, уходя на дно морское... Но помните, что все эти события мысленно ускорены в миллион раз. Все эти «катастрофы» на нашей старой-престарой Земле в действительности шли черепашью шагом.

Конечно, не будешь же все время напоминать о гигантских масштабах геологического времени. Поэтому неизбежна некоторая схематичность стиля геологической литературы. Возможно, многие геологи слишком вольно выражают то, что видится их воображению, привыкшему ускорять события в миллион раз. Для иллюстрации этого возьмем один пример из описания *орогенических*, т. е. горообразовательных, процессов.

Образование крупных горных систем, таких, как Альпы, Гималаи и Анды, заняло около 50 млн. лет. Земная кора при этом вздымалась со скоростью около 1 мм в год. До того земная кора была гораздо спокойнее и двигалась не быстрее 1 мм в столетие, но этот первый, спокойный период тянулся значительно дольше — 100—200 млн. лет.

Теперь геологи уверенно говорят о «периоде катастрофического горообразования», о «бурных революциях в истории земной коры», имея в виду сравнительно короткий период неустойчивости, занявший «всего» 50 млн. лет. Они хотят подчеркнуть различие между периодом горообразования и предыдущим, более продолжительным и спокойным. При этом они определенно «пересаливают» — может быть, не находя нужных слов, а может быть, по лености, выбирая самый легкий путь. Мы часто забываем напомнить читателю, что описываемые в геологической литературе катастрофы и перевороты весьма далеки от катастроф в обычном смысле слова. Ни один геолог не отрицает изменчивости лица Земли, колебаний скорости и интенсивности различных процессов, идущих на поверхности и в недрах нашей планеты. Но эта изменчивость не противоречит принципу актуализма и не мешает объяснять геологическое прошлое на основании знания современных процессов.

Другой пример — часто встречающаяся в учебниках диаграмма, где на одной странице форматом, скажем, 15 на 20 см изображен весь фанерозой, включающий палеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую эры (более 500 млн. лет). Палеонтологи изображают на схеме смену фаун одной чертой, хотя вымирание фауны, о которой идет речь, длилось, быть может, 50 млн. лет (см. [10]). Ничего не скажешь, несколько самонадеянно, особенно для такого молодого вида, как наш: *Homo sapiens* не прожил еще и 50 000 лет. И все же факт остается фактом — подобного рода схематизация и сжатие времени обычны для геологической литературы.

## 8. КОЛЕБАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ: «ПУЛЬС ЗЕМЛИ»

Итак, признание изменений интенсивности геологических процессов на протяжении истории Земли никак не противоречит принципу актуализма. Я уже говорил об изменении подвижности земной коры в периоды горообразования. Другой хорошо известный пример — ледниковые периоды. Сейчас от ледникового щита, покрывавшего некогда почти весь север Европы и Североамериканского континента, остались лишь ледники Гренландии, Исландии и Шпицбергена. Но причины и процессы образования ледников (местные климатические условия, сильные снегопады, растекание ледяных шапок к периферии, образование морен) сейчас те же, что и в прошлом, разница лишь в масштабах. Зная процессы, действующие сейчас в Гренландии, можно понять, как образовались огромные ледяные щиты, некогда покрывавшие север Европы и Америки. Размах другой, но суть та же.

Эти колебания интенсивности геологических процессов воспел Виктор фон Шеффель<sup>1</sup> в геологических стансах из сборника «Гаудеамус!». В стихотворении «Базальт» мы находим следующее описание спокойного периода, во время которого вулканическая деятельность отсутствует:

Вулканическая сила была тогда в немилости  
Из-за своих разрушительных ударов.  
Земле требовался отдых,  
И этому лучше соответствовало развитие «мокрым» путем.  
Монотонно колыхались волны,  
Они ненавидели  
Все твердое, с острыми краями.  
Они разбили скалы в щебень,  
А щебень — в песок.

Затем последовал период вулканической активности. Возникает вулкан, извергающий базальтовую лаву.

...Что случилось дальше, неизвестно,  
Но вдруг он пришел в бешенство,  
Огненным пламенем дохнул наружу,  
Его жилы пылали и сверкали.  
Бушуй, он рванулся вверх  
И опаляющим жаром  
Взорвал толщу слоев, которые, как кошмар,  
Тяжело на него давили.

<sup>1</sup> Иосиф Виктор фон Шеффель — немецкий поэт и романист (1826—1886). — *Прим. перев.*

Удар за ударом — глухой гром  
 Многих тысяч гроз.  
 Земля треснула, в глубине ее пронизала дрожь,  
 Судорога.  
 Затем из зияющих трещин величественно  
 Восстало раскаленное вещество недр,  
 И усеянные обломками вода и суша  
 Склонились перед колоссом.

В стихотворении «Гранит» также описывается спокойный период, за которым последовало внедрение гранитной магмы (которое поэт в последней строке ошибочно называет извержением):

Старый гранит ворчал в своей подземной камерке:  
 Эту мокрую дрянь там, наверху,  
 Я больше не стану терпеть.  
 Тоскливо катятся  
 По земле соленые волны.  
 Погибло все лучшее, гордое, прекрасное,  
 Остался один ил и песок.  
 Если вся земная кора  
 Превратится в сплошную осадочную кашу,  
 Получится достойная сожаления геологическая клееварня.  
 В конце концов горы, высоты, глубины  
 Останутся только в преданиях;  
 К черту это расслоение и напластование,  
 Ура! Я извергаюсь!»

Эти вариации интенсивности удачно названы покойным проф. Умбгрове «пульсом Земли» [16]. Основываясь на чередовании орогенных и более спокойных периодов в истории Земли (так называемый цикл горообразования, см. гл. X), Умбгрове указал, что многие другие геологические процессы также то усиливаются, то ослабевают, так что создается некий «пульс». Не все геологи приняли идею Умбгрове о строгой синхронизации многообразных геологических процессов в единый ритм с периодом около 250 млн. лет. Но, как мы увидим, основная идея циклически повторяющихся изменений интенсивности движений коры оказалась весьма плодотворной. Если вам покажется, что эти предполагаемые «судороги» Земли трудно совместить с актуализмом, вспомните, что одно «биение пульса» продолжается примерно 250 млн. лет и, значит, мало похоже на катастрофу в обычном понимании слова.

Отметим, наконец, что внедрению в умы идей актуализма мешает тот факт, что современный период истории Земли нельзя считать нормальным. Наш период является и послеорогеническим, и межледниковым, а нормальным можно назвать неледниковый и

неорогенический период [13, 14]. Об этом мы поговорим подробнее в гл. XI. Наше время характеризуется, с одной стороны, сильным поднятием основных континентальных районов (видимо, это наследие альпийского горообразования) и с другой — затоплением всех континентальных шельфов вследствие эвстатического подъема уровня моря со времени последнего оледенения.

Соответственно в учебниках геологии большое внимание уделяется таким темам, как «Геоморфология гор и нагорий», «Ледниковая и речная эрозия», «Геоморфология побережий», «Механическое выветривание» и «Отложение обломочного материала». В нормальные периоды геологической истории материка сильно стачиваются денудацией, а континентальный шельф из-за отложения материала, снесенного с материков, поднимается до уровня прибою. В такие периоды вряд ли действует механическое выветривание и не происходит отложения обломочного материала, а оледенения нет совершенно. Сейчас условия, аналогичные условиям нормального периода, сохраняются лишь в некоторых уголках Земли, например на северо-западном побережье Австралии, на Багамских островах, на берегах Красного моря. Главы геологических учебников, написанных в более нормальный период истории Земли, могли бы называться: «Геоморфология пенепленов», «Речная эрозия», «Прибрежные болота», «Химическое выветривание» и «Отложение известняков и эвапоритов».

Следовательно, изменения интенсивности геологических процессов сильно влияют на облик окружающего нас мира. Но, повторяю, это всего лишь изменения скорости идущих постоянно процессов и они никоим образом не опровергают принцип актуализма.

## 9. ПРИНЦИП АКТУАЛИЗМА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ

Теперь ясно, как мы можем применить принцип актуализма к выяснению происхождения жизни. Мы будем искать естественные причины возникновения жизни, подобные тем, какие действуют и в наши дни. Мы не поверим, что жизнь появилась сразу во всех уголках Земли в результате какого-то внезапного события. Возникновение жизни должно было занять огромный, по нашим меркам, промежуток времени. Развитие в этот период шло очень медленно, так медленно, что это почти невозможно себе представить.

Притом способы, формы и условия возникновения жизни могли быть бесконечно разнообразными. Насколько мы знаем, переход от неживого к живому мог идти по нескольким параллельным линиям. Возможно, лишь некоторые из них, быть может даже всего одна, привели к появлению жизни, какой мы ее теперь знаем. Медленное возникновение жизни подчинялось тем же физическим и



химическим законам, которым подчиняется жизнь и сейчас. Как мы позже увидим, в те времена, когда шла настоящая *борьба за жизнь* — борьба за возникновение жизни, — атмосфера, реки и океаны, очевидно, сильно отличались от современных. Но даже если окружающий мир был тогда совсем иным, совершенно чуждым для нас, законы природы с тех пор не изменились. Поэтому мы можем применять данные современной биохимии и микробиологии к тем далеким дням.

Рассматривая главные принципы, лежащие в основе восстановления геологической истории, мы достигли важного результата: теперь мы знаем, каким образом геологам удастся делать выводы о событиях далекого прошлого. Мы узнали, что в основе такой работы лежит принцип актуализма, и мы получили представление о его применении на практике. Большое впечатление на нас произвел «возраст» жизни: она появилась в ранние дни геологической истории. Теперь пора узнать, как измеряют геологические промежутки времени и насколько достоверны эти измерения. Итак, следующая глава будет посвящена именно этим вопросам, и только получив ответы на них, мы сможем вернуться к нашему основному предмету.

#### Список литературы

1. *Albritton C. C.* (Editor), *The Fabric of Geology*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 372 pp. (1963).
2. *Albritton C. C.* (Editor), *Uniformity and Simplicity. A Symposium on the University of Nature* — Geol. Soc. Am., Spec. Papers, 89, 99 pp. (1967).
3. *Goodman N.* Uniformity and simplicity. In: C. C. Albritton (Editor), *Uniformity and Simplicity. A Symposium on the University of Nature* — Geol. Soc. Am., Spec. Papers, 89, 93—99 (1967).
4. *Harris S. A., Fairbridge R. W.*, Uniformitarianism. In: R. W. Fairbridge (Editor), *Encyclopedia of Applied Geology and Sedimentology*, Reinhold, New York, N. Y., 1970.
5. *Hölder H.*, *Geologie und Paläontologie*, Orbis Academicus II, Freiburg, München, 566 pp., 1960.
6. *Hooykaas R.*, *Natural Law and Divine Miracle. A Historical-Critical Study of the Principle of Uniformity in Geology, Biology and Theology*, Brill, Leiden, 237 pp., 1959.
7. *Hubbert M. K.*, Critique of the principle of uniformity, Geol. Soc. Am., Spec. Papers, 89, 1—33 (1967).
8. *Lyell C.*, *Principles of Geology: Being an Enquiry how far the Former Changes of the Earth's Surface are Referable to Causes now in Operation*, 12th ed., John Murray, London, 1875.
9. *Mayr E.*, Theory of biological classification, *Nature*, 220, 545—548 (1968).
10. *Newell N.*, Revolutions in the history of life. In: C. C. Albritton (Editor), *Uniformity and Simplicity* — Geol. Soc. Am., Spec. Papers, 89, 63—92 (1967).
11. *Opdyke N. D.*, Paleoclimatology and continental drift. In: E. K. Runcorn (Editor), *Continental Drift*, Academic Press, New York, N. Y., London, pp. 41—66, 1962.
12. *Potonié R.*, Vom Wesen den Geschichte der Geologie, *Geol. Jahrb.*, 74, 17—30 (1957).

13. *Rutten M. G.*, Actualism in epeirogenetic oceans, *Geol. Mijnbouw*, 11, 222—228 (1949).
14. *Rutten M. G.*, Shallow shelf sea sedimentation during non-glacial and a-tectonic times in geological history, *Compt. Rend. Congr. Géol. Intern.*, 19e, Alger, 4, 119—125 (1953).
15. *Rutten M. G.*, Principle of actualism. In: R. Fairbridge (Editor), *Encyclopedia of Earth Sciences*, Reinhold, New York, N. Y., 3, 1970.
16. *Umbgrove J. H. F.*, *The Pulse of the Earth*, 2nd ed. Nijhoff, The Hague, 358 pp., 1947.

## Глава III

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ В ГЕОЛОГИИ

## 1. ГОД В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА И В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Датирование событий истории человечества основано почти исключительно на единицах «день» и «год», соответствующих периоду оборота Земли вокруг своей оси и обращения Земли вокруг Солнца. Только эти две единицы времени можно считать естественными. День можно было бы с таким же успехом делить не на 24, а на 20 часов, час — не на 60, а на 50 или 100 минут. Искусственность нашего деления естественных единиц времени подчеркивается тем, что день мы делим на основе двенадцатеричной и шестеричной систем, а годы считаем по десятичной системе. Логично было бы в крупную единицу «век» включать не 100, а 144 года.

Единицы «год» и «день» обычно не используются при измерении геологического времени, если не считать двух методов, позволяющих проникнуть лишь в самое недавнее геологическое прошлое. Для всех геологических событий давностью более 20 000 лет измерение времени основано на другом принципе: мы непосредственно измеряем время, прошедшее с тех пор. Для удобства это время выражают в годах, но сам счет идет не по годам. Как мы увидим, геологическое время измеряют с помощью так называемых *геологических часов*. Этот метод основан на использовании естественной радиоактивности некоторых элементов. Степень распада таких элементов служит мерой времени, прошедшего с тех пор, как эти элементы были включены в данную породу. Зная физическую константу — скорость распада, можно рассчитать, за сколько лет могло распасться данное количество атомов.

Есть, правда, два метода измерения геологического времени, основанные на непосредственном подсчете лет. Это так называемая *дендрохронология* и *изучение ленточных глин*. Нас они не интересуют, поскольку жизнь появилась на Земле так давно, что нам нужны методы для измерения промежутков времени в миллионы и миллиарды, а не какие-то жалкие тысячи и десятки тысяч лет. Оба эти метода в свое время широко использовались в археологии, и потому о них слышали и негеологи. Кратко рассмотрим их, чтобы читатель не удивлялся, почему в книге нет ни слова об этих широко известных методах.

Дендрохронология использует простой подсчет годичных колец на спилах деревьев. Ширина годичных колец позволяет сделать некоторые выводы о климатических изменениях. Сейчас найдены деревья, живущие уже более 3000 лет, и все же метод дендрохронологии не позволяет углубиться в геологическое прошлое.

Ленточные глины — это глины микрослоистого строения, отлагавшиеся в озерах у края отступающего ледяного щита в последний ледниковый период. Они имеют годичную слоистость, образовавшуюся потому, что стекавшая летом с ледников талая вода приносила сравнительно много крупных минеральных частиц, осаждавшихся на дно озер. Зимой озера покрывались льдом, и в совершенно спокойной воде шло отложение тонкой глинистой фракции. Терпеливо считая слои, можно углубиться в прошлое на 20 000 лет. Этот метод раньше широко применялся для изучения отступления ледников последнего ледникового периода, но теперь он почти полностью заменен радиоуглеродным методом определения возраста, в котором используется распад углерода-14 ( $^{14}\text{C}$ ). Радиоактивные методы измерения геологического времени вполне подходят для наших целей, и сейчас мы перейдем к их рассмотрению.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО И АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА

Сразу подчеркнем, что современный метод измерения времени, протекшего с некоего события, очень молод. Он внедрен в практику после второй мировой войны, хотя первые опыты проводились еще в конце тридцатых годов.

До того вся датировка в геологии была основана на методах, позволявших определять только относительный возраст события, т. е. судить о том, случилось ли оно раньше или позже других событий. Результаты определений возраста выглядели тогда примерно так: «древнее, чем...» или даже «лишь немного моложе, чем...» и «гораздо древнее, чем...». Теперь это называется *относительным* возрастом, современные же методы позволяют получить действительное количественное представление об абсолютном возрасте.

Для геолога все это само собой разумеется. Но именно из-за этого геологи не всегда констатируют, что большинство определенных возрастов в геологии имеет относительный характер. Поскольку нас интересуют не только голые факты, но и способы их получения, я думаю, было бы полезно разобрать подробнее, в чем состоит различие между обычным повседневным методом определения относительного возраста в геологии и новыми способами, позволяющими измерять геологическое время в абсолютных единицах — в годах, миллионах или миллиардах лет.

О молодости метода абсолютного датирования наглядно свидетельствует тот факт, что первая монография по этому методу, чрезвычайно ценная книга проф. Цейнера «Датирование прошлого» (ср. с изд. 1958 года [19]), вышла первым изданием совсем недавно — в 1946 году, причем тогда радиометрический метод датирования едва вышел из колыбели и основной упор еще делался на изучение ленточных глин.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Итак, в обычной, повседневной работе геолога используются только методы определения сравнительного, или относительного, возраста. Эти методы основаны на идеях английского землемера и инженера У. Смита (1769—1831). Их главные принципы — *принцип суперпозиции* и *принцип развития фауны в течение геологического времени*.

#### *Принцип суперпозиции*

Он довольно прост; согласно этому принципу, в любом разрезе осадочных пород каждый следующий пласт отлагался на предыдущем. Следовательно, более молодой слой всегда лежит на более древнем, отсюда и название принципа (суперпозиция — наложение).

Таким образом, относительный возраст можно связать с последовательностью пластов породы, видимых, например, в обнажении или в керне, взятом из буровой скважины. Если ту же последовательность удастся обнаружить в других обнажениях или в скважинах, пробуренных в других районах, то можно установить корреляцию между этими районами. А если при этом кроме уже известной нам серии слоев удастся обнаружить более молодые, лежащие выше нее, или более древние, подстилающие ее породы, то наша местная относительная временная шкала может быть расширена.

В некоторых районах, например в Лондонском и Парижском бассейнах, для которых и были впервые разработаны принципы определения относительного возраста, удастся проследить обнаженные пласты на довольно большом протяжении. Но любой перерыв в таком ряде обнажений, например широкая речная долина, озеро или океан, служит препятствием для распространения местной шкалы на соседние районы и ограничивает тем самым применимость метода. Обычно бывает трудно или даже невозможно точно совместить и идентифицировать пласты по обе стороны такого разрыва. Это верно даже для такого небольшого разрыва, как Ла-Манш. Белые меловые утесы Дувра и мыса Блан-Не, столь сходные на первый взгляд, сильно различаются деталями строения: их слои, разделенные проливом, не продолжают друг друга.

### *Органическая эволюция*

Но тут на помощь приходит эволюция флоры и фауны. Осадочные породы, отлагавшиеся в самых разных точках Земли, могут содержать остатки животных и растений. Поскольку большинство высших организмов с течением времени развивалось, в любом периоде геологической истории были организмы, свойственные только этому периоду и не встречавшиеся ни позже, ни раньше. Если эти организмы в достаточной степени отличались от своих предков и потомков и если эти отличия хорошо заметны даже на окаменелостях, то можно считать, что органическая эволюция сделала геологу прекрасный подарок — «руководящие ископаемые». Сравнивая руководящие формы, можно создать относительную шкалу времени для удаленных друг от друга разрезов. Обычно при этом говорят, что данный метод основан на эволюции фауны, хотя, конечно, здесь подразумевается органическая эволюция, процесс развития и флоры, и фауны. Просто руководящими ископаемыми чаще служат представители фауны — при фоссилизации они сохраняются лучше.

Идея использовать органическую эволюцию для целей геохронологии, хотя бы относительной, заманчиво проста. Но, спросит читатель, знакомый с геологией или хотя бы с геологами, почему же тогда геологи так много спорят, сопоставляя возраст пластов из различных, удаленных друг от друга районов Земли? А дело здесь в том, что, хотя сама идея проста, на практике все гораздо сложнее. Во-первых, нередко мы находим у разных групп организмов параллельные линии развития, так что две группы организмов могут быть схожи между собой, не будучи близкими родственниками или современниками. Во-вторых, живые существа всегда склонны собираться там, где условия наиболее благоприятствуют их жизни. Поэтому породы, образовавшиеся одновременно, но в разных условиях, могут содержать разные наборы окаменелостей. Наконец, многие группы организмов со сравнительно высокими темпами эволюции (т. е. самые пригодные на роль руководящих ископаемых) никогда не были массовыми формами, и потому их остатки встречаются редко.

### 4. ЭРЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ

Впрочем, для понимания того, как геологи научились датировать события прошлого, не обязательно вникать в подробности, важные для установления шкалы относительной геохронологии. Оставим детали практического применения принципа органической эволюции специалистам по стратиграфии и палеонтологии. Для нас важно, что геологи, педантично применяя принципы су-

перпозиции и органической эволюции накопили впечатляющее количество фактов.

Теперь можно датировать геологические события прошлого по относительной временной шкале. Все общепринятые подразделения геологического времени и даже главные эры — палеозой, мезозой и кайнозой — выделены именно на основании эволюционных изменений живых существ, точнее, на основании эволюции фауны. Уже названия этих эр, означающие «древний, средний и новый животный мир», говорят, что эры и их границы были установлены по остаткам фауны, а флора играет в геологическом датировании незначительную роль.

Палеозой, мезозой и кайнозой можно в какой-то мере сравнить с древней историей, средневековьем и новейшей историей нашей цивилизации. Эти три геологические эры в последнее время часто объединяют под общим названием *фанерозоя*, ближайшего к нам периода истории Земли, во время которого богато развился животный мир.

Подобно тому как в истории человечества есть доисторические и раннеисторические времена, к изучению которых неприменимы обычные методы, так и в геологической истории есть долгий раннеисторический период, к которому методы относительного датирования неприменимы из-за полного отсутствия ископаемых остатков<sup>1</sup>. Этот ранний период истории Земли называется *докембрием*, так как он предшествовал кембрийскому периоду, который является первым периодом палеозоя и, следовательно, фанерозоя в целом (фиг. 10).

Докембрий делили раньше на протерозой — эру, от которой почти не осталось окаменелостей, — и архей — эру, когда на Земле не было жизни. Но скудость обнаруженных остатков и их спорность делают такое подразделение бессмысленным. Никаким подразделениям докембрия на «протерозой» и «архей», проводившимся в старой литературе, на основе ископаемых остатков доверять нельзя. К докембрию применимы лишь методы абсолютной датировки. Пример такого новейшего подразделения докембрия для миннесотских отложений дается в гл. XIII.

Поиски истоков жизни непременно уведут нас в эту раннюю геологическую историю. Но сейчас позвольте мне еще раз подчеркнуть, что чаще всего в геологии применяется определение относительного возраста. Оно указывает, например, что пласты мезозоя моложе пластов палеозоя. Любое утверждение типа «мезозой начался столько-то миллионов лет назад» есть результат абсолютной датировки.

<sup>1</sup> Впрочем, при изучении позднего докембрия можно использовать так называемые строматолиты — отложения, образованные водорослями. Подробнее об этом см. в гл. XII, разд. 5.

## 5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВОЗРАСТ ОСАДОЧНЫХ И ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОД

Конечно, методы определения относительного возраста применимы только к осадочным породам. Изверженные породы, образовавшиеся в земной коре из постепенно остывшей и кристаллизовавшейся магмы, не подчиняются принципу суперпозиции. Жидкая магма часто прорывает кору, и тем самым нарушается закон суперпозиции. Даже в том случае, когда магма, излившаяся из вулкана, застывает, как положено по этому закону, над слоями отложений, она все равно не содержит остатков организмов, а без них нельзя воспользоваться принципом органической эволюции. Таким образом, в обычной геологической шкале времени возраст изверженных пород является дважды относительным. Он относителен по отношению к также относительному возрасту осадочных пород. Вот каким образом удается найти место изверженных пород на шкале времени. Изверженные породы, естественно, всегда моложе тех осадочных пластов, которые ими прорваны. В то же время они древнее тех отложений, которые их покрывают. Позже мы увидим, что применение методов абсолютного датирования ставит эту ситуацию «с ног на голову», т. е. возраст осадочных пород определяется по отношению к изверженным (фиг. 8).

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА

Методы абсолютной датировки позволяют измерять непосредственно возраст пород, т. е. время, прошедшее с момента их образования. Обычно оно выражается в миллионах ( $10^6$ ) или миллиардах ( $10^9$ ) лет. Два упомянутых в первом разделе этой главы метода позволяют углубиться в прошлое на 3000 и на 20 000 лет:

Единственный метод, пригодный для более древних пород, основан на радиоактивных часах. В нем используется распад радиоактивных элементов, содержащихся в горных породах.

Абсолютная датировка — лишь одно из очень многих направлений в науке, использующих наличие в природе стабильных и нестабильных разновидностей одного и того же элемента, называемых изотопами [3, 8]. *Изотопная геология* решает и многие другие проблемы. Одно из самых блестящих ее достижений — палеотемпературный метод Юри, основанный на определении содержания стабильных изотопов кислорода в известковых раковинах. Полный обзор методов и перспектив изотопной геологии, а также список элементов, имеющих естественные изотопы, можно найти у Ранкамы [13, 14].

В изотопной геологии используются и стабильные, и нестабильные изотопы. Но при определении абсолютного возраста, основанном на скорости распада некоторых элементов или изотопов, используются только нестабильные изотопы.

## 7. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЧАСЫ; РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ

Все тяжелые элементы неустойчивы. Нестабильны и некоторые изотопы легких элементов. Если они встречаются в природе и сейчас, то лишь потому, что распадаются они чрезвычайно медленно. В сравнении со временем их распада возраст горных пород и даже возраст Земли невелик. Имеющиеся сейчас количества этих изотопов — остаток того запаса, который был на молодой Земле.

Атом радиоактивного изотопа распадается в результате спонтанного процесса, идущего в ядре. Момент, когда данный атом распадется, непредсказуем. Но если имеется большое число таких атомов, в игру вступают статистические законы, которым подчиняется процесс распада этого изотопа. Вероятность того, что определенная доля данного количества атомов радиоактивного изотопа распадется за определенное время, постоянна для каждого изотопа. Она не зависит от того, сколько атомов мы взяли. Но у каждого изотопа она другая. Зная эту вероятность, мы можем предсказать, как будет уменьшаться со временем количество нестабильного изотопа.

Так как распад отдельных атомов — случайный процесс, то скорость распада некоего количества радиоактивного изотопа пропорциональна числу исходных атомов. Коэффициент пропорциональности, характерный для данного изотопа, называется *постоянной распада* [15].

Скорость распада радиоактивного изотопа для удобства можно выразить через так называемый *период полураспада*. Это время, за которое любое исходное количество атомов уменьшится в результате распада вдвое. Постоянная распада  $\lambda$  и период полураспада  $T$  связаны формулой

$$\lambda = \ln 2T, \quad \text{или} \quad T = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Понятно, что для сравнения скорости распада разных изотопов мы не можем пользоваться периодом полного распада: он, по крайней мере теоретически, одинаков для всех изотопов и равен бесконечности. Распад радиоактивных изотопов — это так называемый *экспоненциальный процесс*. Пусть мы имеем некоторое количество изотопа, равное  $a$ . За время, равное периоду полураспада, распа-

дается половина этого количества,  $\frac{a}{2}$ , за следующий период полураспада — половина оставшегося количества, т. е.  $\frac{a}{4}$ , и так

далее. Теоретически весь первоначальный запас  $a$  распадется за бесконечно большое время.

Первичный, нестабильный изотоп называется материнским, или исходным, изотопом ( $P$ )<sup>1</sup>, а последний стабильный изотоп, получившийся в результате серии распадов, называется дочерним ( $D$ )<sup>2</sup>. Обозначим число материнских атомов, бывших в горной породе в момент ее образования, через  $P_0$ , а число материнских и дочерних атомов, присутствующих в ней сейчас, через  $P_t$  и  $D_t$  соответственно. Нетрудно рассчитать, сколько материнских атомов было в породе в момент ее образования:

$$P_0 = P_t + D_t.$$

Если мы примем, что ни материнские, ни дочерние атомы не уходили из породы и не поступали в нее извне за все геологическое время, то можно рассчитать, сколько времени прошло с момента образования интересующей нас породы:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{D_t}{P_t} + 1 \right).$$

Кроме такого анализа пород или отдельных минералов на содержание материнских и дочерних изотопов разных радиоактивных семейств, были сделаны попытки применить для целей датирования и другие радиометрические методы. В принципе эти методы сходны с только что рассмотренными. В настоящее время они имеют очень небольшое значение, поэтому я не буду их перечислять. Читатель может найти их доступное описание в литературе [3].

## 8. ПОСТОЯНСТВО РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Все методы датирования, использующие радиоактивный распад, основаны на одном общем допущении, а именно что радиоактивный распад на протяжении всей долгой истории Земли шел с одинаковой скоростью.

Теоретическая физика утверждает, что это именно так. Согласно теории, радиоактивный распад — ядерный процесс, и все его характеристики тесно связаны со свойствами ядра данного элемента. В отличие от конфигурации электронных орбит вокруг ядра, от которой зависят химические свойства атома, ядро не поддается внешним воздействиям. Ни скачки температуры или давления, ни изменения электрического и магнитного полей, имевшие место на протяжении геологической истории, не могли повлиять на ядерный процесс, каковым является радиоактивный распад. Физики-экспериментаторы подтвердили теорию, испробовав все возможные крайние факторы воздействия. Но геолога не удивит сильными колебаниями температуры, силы тяжести, земного магнетизма или

<sup>1</sup> От англ. parent — родительский, исходный. — Прим. перев.

<sup>2</sup> От англ. daughter — дочерний. — Прим. перев.

сверхвысокими давлениями. А важнейший фактор геологических процессов — время — нельзя моделировать в лаборатории. Правильно ли, спросит геолог, применять теории ядерной физики, науки, которой еще не исполнилось и века, к истории Земли, насчитывающей не один миллиард лет?

### Плеохроичные ореолы

Ответ на этот вопрос мы находим в минералогии. Во многих минералах обнаруживаются мелкие темные пятна. Под микроскопом они выглядят как концентрические кольца (фото 1)<sup>1</sup>. В поляризованном свете эти кольца становятся окрашенными, причем их окраска обычно отличается от той, которая появляется при таком освещении у различных минералов. При повороте столика поляризационного микроскопа окраска колец меняется. Отсюда и название — плеохроичные<sup>2</sup> ореолы. Эти ореолы образовались вследствие разрушения кристаллической решетки минерала под действием излучения, источником которого служат вкрапления радиоактивных элементов.

Излучение, сопровождающее распад радиоактивного элемента, всегда имеет одну и ту же энергию, характерную для процесса распада ядер этого элемента или изотопа. Значит, если в минерале содержится микроскопическое включение радиоактивного элемента, то его излучение всегда будет проникать в кристаллическую решетку минерала на определенное и неизменное расстояние. Вокруг радиоактивного включения образуется сферическая зона разрушения кристаллической решетки. Под микроскопом на тонком шлифе эта сфера будет выглядеть как кольцо или идеальный круг [2].

В рядах распада уран — свинец и торий — свинец, включающих многие промежуточные стадии между материнским и дочерним элементами, испускается целая серия излучений. Они обладают разными энергиями, разной «пробивной силой», поэтому вокруг зерна урана или тория во вмещающем минерале образуется несколько концентрических зон разрушения. Такая серия сфер (в сечении — колец) схематически показана на фиг. 4.

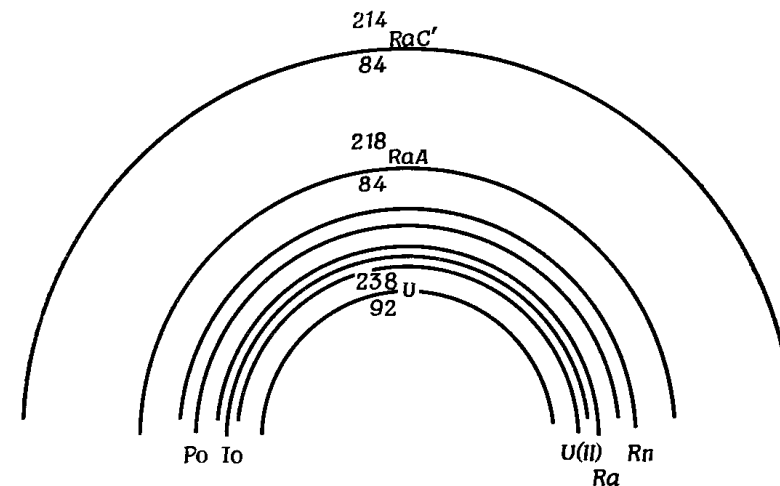
Если бы в ходе геологической истории энергия радиоактивных процессов менялась, то менялся бы со временем и радиус зон разрушения в плеохроичных ореолах. В результате медленного изменения энергии радиоактивного распада на протяжении миллионов лет вместо системы четких концентрических колец образовывалось бы расплывчатое пятно. Поскольку скорость распада прямо пропорциональна энергии, испускаемой при распаде, мы можем

<sup>1</sup> Все фотографии помещены в конце книги. — *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Многоцветные — от греч. *pleōn* (больше) и *chrōs* (цвет). — *Прим. перев.*

сделать вывод, что и скорость распада на протяжении геологического времени не менялась.

Конечно, в действительности почти всегда дело обстоит сложнее. Радиоактивное зерно, включенное в минерал, очень невелико, но все же обладает каким-то конечным размером, поэтому самое узкое кольцо пропадает. В некоторых случаях радиоактивный элемент склонен постепенно рассеиваться во вмещающем минерале, и

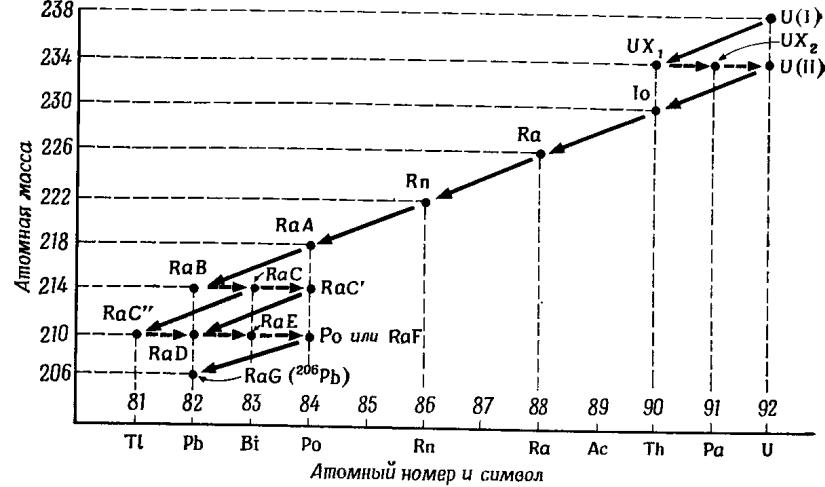


Фиг. 4. Схематическое изображение плеохроичных ореолов вокруг включения урана.

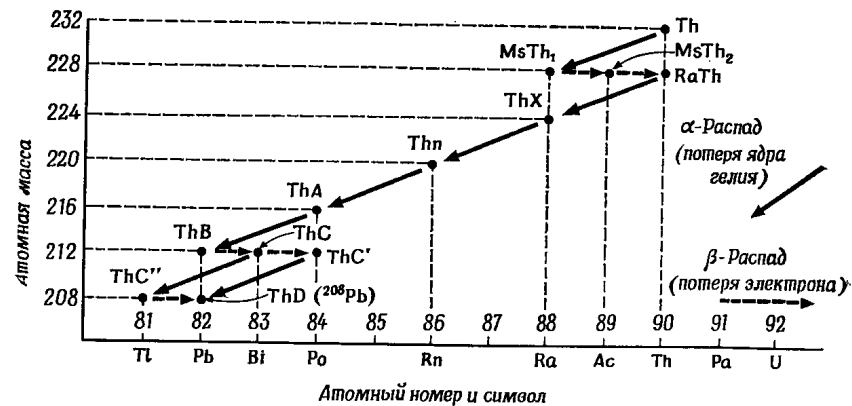
В обычных породообразующих минералах радиус наружной сферы, образовавшейся в результате распада  $RaC'$ , составляет около 30 мкм.

вместо четких колец часто получают смазанные пятна. Однако факт остается фактом — прекрасно различимые плеохроичные ореолы встречаются во многих минералах.

Итак, мы с уверенностью можем утверждать, что геологические часы, основанные на распаде природных радиоактивных изотопов, действительно измеряют абсолютное время. Но градуировать их циферблат в годах мы не можем. Эти часы равномерно идут вот уже миллиарды лет, но что толку в этой равномерности, если методы чтения их показаний недостаточно точны. Невозможно абсолютно точно измерить оставшееся количество материнского элемента и количество атомов дочернего стабильного изотопа. Довольно точные измерения возраста пород содержат ошибку примерно в 5%. Если определяемый возраст — 1 млрд. лет, то ошибка составит 50 млн. лет. Поэтому обычные стратиграфические методы, устанавливающие стратиграфическую последовательность более древних и более молодых пластов, нельзя полностью заменить



Фиг. 5. Схемы естественного радиоактивного распада в рядах урана и актиния [6].



Фиг. 6. Схема естественного радиоактивного распада в ряду тория [6].

(во всяком случае, для фанерозоя) методиками определения абсолютного возраста. Последние лишь дают нам ряд отправных точек, в соответствии с которыми мы упорядочиваем наши относительные стратиграфические датировки. В современной геологии оба метода датирования, абсолютный и относительный, должны идти рука об руку.

#### 9. РЯДЫ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА

Сейчас мы можем использовать один процесс радиоактивного распада для определения возраста молодых пород и пять — для датирования более древних.

Молодые породы можно датировать с помощью так называемого радиоуглеродного метода, или метода  $^{14}\text{C}$ , в котором используется самопроизвольное превращение  $^{14}\text{C}$  в  $^{14}\text{N}$ . Период полураспада радиоактивного углерода составляет около 5570 лет, и никакие технические ухищрения не позволяют датировать этим методом породы древнее примерно 50 000 лет.

Процессы распада, применяемые для определения возраста более старых пород, перечислены в табл. 1 и на графиках, приведенных на фиг. 5 и 6. Вот их перечень (в порядке увеличения атомного номера материнского элемента): калий — аргон, рубидий — стронций, торий — свинец и уран — свинец. Последние два ряда всегда используются вместе. Начинаясь с трех разных элементов, а именно с тория и двух изотопов урана, и протекая по-разному, они приводят к одному стабильному дочернему элементу — к свинцу. Правда, получаются разные изотопы свинца (табл. 1). На этом основан новый, свинец-свинцовый метод, описанный в разд. 15 этой главы.

Из упомянутых методов самые старые — торий-свинцовый и уран-свинцовый. Лишь после второй мировой войны введение технических усовершенствований, главным образом разработка масс-спектрометров<sup>1</sup>, позволило использовать для целей датирования и другие ряды распада. Да и свинцовые методы, как уже сказано, были значительно усовершенствованы. Поэтому я считаю необходимым кратко описать устройство и работу масс-спектрографа — прибора, без которого методология определения абсолютного возраста так и не вышла бы из пеленок. Впрочем, понимание устройства этого прибора не обязательно для понимания нашей главной проблемы. Поэтому читатель может пропустить следующий раздел, если материал покажется ему слишком сложным.

<sup>1</sup> Принцип масс-спектрографии впервые разработан и применен Дж. Томсоном (1910 г.). Первый масс-спектрограф с фокусировкой пучка ионов построен Ф. Астоном (1919 г.). Значительные усовершенствования конструкции действительно сделаны в 40—50-х годах. — *Прим. перев.*

Таблица 1

Процессы распада природных радиоактивных элементов, используемые при определении абсолютного возраста древних пород

Материнский элемент <sup>1</sup>	Процесс распада	Период полураспада, $10^9$ лет	Дочерний стабильный изотоп
$^{40}_{19}\text{K}$ (калий)	Захват электрона	1,3	$^{40}_{18}\text{Ar}$ (аргон)
$^{87}_{37}\text{Rb}$ (рубидий)	Потеря электрона ( $\beta$ -излучение)	47	$^{87}_{38}\text{Sr}$ (стронций)
$^{232}_{92}\text{Th}$ (торий)	Процесс идет в несколько этапов	14,1	$^{208}_{82}\text{Pb}$ (свинец)
$^{235}_{92}\text{U}$ (уран)		0,7	$^{207}_{82}\text{Pb}$ (свинец)
$^{238}_{92}\text{U}$ (уран)		4,5	$^{206}_{82}\text{Pb}$ (свинец)

<sup>1</sup> $^{40}_{19}\text{K}$  означает: 40 — атомная масса, K — символ элемента, 19 — атомный номер.

#### 10. ИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ

До второй мировой войны горные породы умели анализировать только классическими методами химического анализа. Для определения абсолютного возраста годились лишь пробы пород со сравнительно высоким содержанием урана, тория и свинца; методы, основанные на других рядах распада, еще не были разработаны. Опыты проводились на урановых рудах, содержащих минерал урановую смолку. Об определении возраста других пород, скажем гранита, никто и не мечтал. И при всем том полученные результаты были неверными, так как с помощью метода химического анализа невозможно различить разные изотопы одного элемента. В пробах определялось содержание урана, тория и свинца. Зная скорости распада урана и тория до свинца, рассчитывали, какая доля обнаруженного свинца образовалась из урана, а какая из тория. Считая, что весь имеющийся в породе свинец возник в результате этих двух распадов, определяли возраст пробы по периоду полураспада материнских элементов.

Получившиеся цифры были довольно далеки от истины, потому что в свинце содержатся не только изотопы  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  — стабильные продукты распада  $^{238}\text{U}$  (урана),  $^{235}\text{U}$  (актино-

урана) и  $^{232}\text{Th}$  (тория), — но и нерадиоактивный изотоп  $^{204}\text{Pb}$ . Тогда уже знали, конечно, о недостоверности допущения, на котором был основан метод. Но лучше получать недостоверные цифры, чем не получать никаких. И хотя позже была доказана несостоятельность многих ранних определений, они сделали свое дело. Они впервые недвусмысленно указали нам на ошеломляющую длительность геологической истории. Для того времени уже это было большим достижением. Раньше утверждения геологов и астрономов об огромном возрасте Земли и всей Вселенной некоторые физики встречали с недоверием. Теперь же геологи получили первые результаты прямого определения возраста конкретных горных пород, послужившие неоспоримым и наглядным доказательством их правоты.

Разделение изотопов одного элемента стало возможным только с помощью масс-спектрографа и масс-спектрометра — приборов, разработанных только после войны. Новые методы позволяют анализировать изотопный состав даже очень небольших количеств вещества, до 1 микрограмма (миллионной доли грамма). Все изотопы одного и того же элемента обладают общими химическими свойствами. Это означает, что все они имеют один атомный номер и одинаковое число электронов на внешней орбите (эти электроны и определяют химические свойства элемента). Единственное, чем изотопы различаются, — это строение ядер и атомная масса. Поэтому они обладают разными физическими свойствами, и для их разделения применимы лишь физические методы анализа. Когда изучение изотопов только начиналось, их разделяли методом разгонки, используя различия в температуре кипения и давлении насыщенных паров в точке кипения. Но эти различия слишком малы, чтобы разделение было достаточно полным, и для точного анализа горных пород такой метод совершенно непригоден.

Для определения абсолютного возраста теперь используется почти исключительно *масс-спектрометр*. Принцип его работы состоит в отклонении электрически заряженных частиц в магнитном поле. На заряженные частицы (в нашем случае это ионизованные атомы изотопов) действует сила, перпендикулярная магнитному полю и направлению полета частиц. Величина этой силы пропорциональна массе частиц. В результате частицы разной массы отклоняются по-разному, и отдельные атомы разных изотопов одного элемента (или атомы разных элементов) в масс-спектрометре разделяются в зависимости от своей атомной массы. Атомы с разными массами в конце своего пути пролетают через коллиматорные щели и электронное устройство считает число атомов каждого сорта [15].

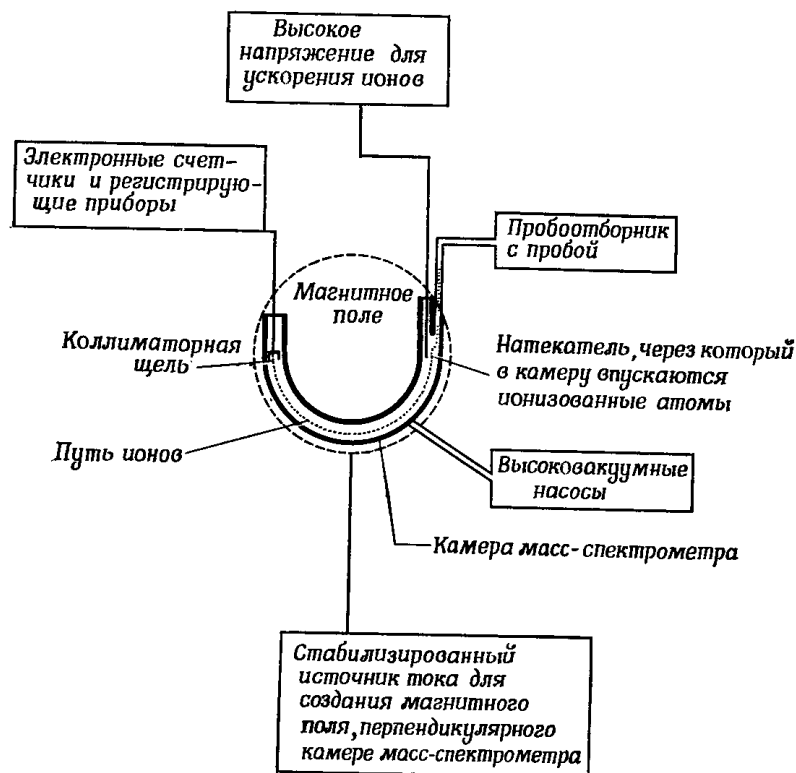
Таким образом можно определить спектр атомных масс в данной пробе. Можно показать не только какие атомы есть в пробе, но и в каких соотношениях они там содержатся.



Как это выглядит на практике? Пучок ионов проходит в глубоком вакууме через магнитное поле, под прямым углом к нему. В начале вакуумной камеры ионы разгоняются сильным электрическим полем (разность потенциалов  $V$ ), приобретая энергию  $\frac{mV^2}{2}$ . Их траектории в камере несколько различаются по своим радиусам; радиус связан с массой по формуле

$$m = e \frac{R^2 B^2}{2V},$$

где  $m$  — атомная масса,  $e$  — электрический заряд иона,  $R$  — радиус траектории иона в вакуумной камере и  $B$  — напряженность магнитного поля (фиг. 7). Итак, общий поток ионов распадается



Фиг. 7. Схема газовой масс-спектрометра с отклонением на  $180^\circ$ .

в магнитном поле на несколько пучков, слегка различающихся по траектории. Число атомов в каждом пучке можно определить или передвигая щель коллиматора от одного пучка к другому, или, наоборот, заставляя разные пучки поочередно проходить через

щель — это достигается небольшими изменениями напряженности магнитного поля<sup>1</sup>.

Для масс-спектрометрии обычно переводят исследуемое вещество в газообразное состояние. Пробы свинца или другого элемента (за исключением калия), анализируемого на изотопный состав, вводятся в прибор в виде газообразных соединений, которые тут же ионизируются. Ионы через небольшое отверстие попадают в камеру с высоким вакуумом и ускоряются в сильном электрическом поле. Таким образом, установка для масс-спектрометрии состоит из трех основных блоков. Первый — химические приборы, в которых проба очищается, обогащается и переводится в газообразное состояние, пригодное для масс-спектрометрии. Затем идет собственно масс-спектрометр — вакуумная камера, находящаяся в магнитном поле. Этот основной прибор установки обычно выглядит совсем небольшим рядом с дополнительным оборудованием. На выходе прибора стоит громоздкая электронная аппаратура для подсчета ионов, пролетающих через коллиматорную щель в конце вакуумной камеры. Конечный результат в удобочитаемом виде записывается на ленте.

Внедрение в геологию метода масс-спектрометрии привело к усовершенствованию многих методик. Например, разработан метод *изотопного разведения*, при котором анализируемое вещество смешивается со смесями известного состава, содержащими те же изотопы, которые нам надо определить. Метод изотопного разведения позволяет анализировать очень малые количества вещества. Это чрезвычайно важно, так как расширяет диапазон применения методов определения абсолютного возраста на большое число изверженных и даже на некоторые осадочные породы. Однако мы не можем углубляться в этот предмет, так как это увело бы нас слишком далеко от нашего основного вопроса. Читатель найдет подробные работы по методам определения абсолютного возраста в списке литературы к этой главе [3, 4, 13, 14].

#### 11. ДОСТОВЕРНОСТЬ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА

В результате развития методов определения абсолютного возраста во многих случаях удается исследовать данную породу несколькими разными методами. Даже к бедным радиоактивными элементами и их дочерними изотопами породам нередко удается применить и рубидий-стронциевый, и калий-аргоновый метод. В других слу-

<sup>1</sup> Масс-спектрометры используются и в других аналитических методиках. Мы еще познакомимся с их применением для анализа продуктов разложения соединений углерода (гл. VI, разд. 9 и гл. XII, разд. 10).

чаях возможна также дополнительная проверка торий-свинцовым и уран-свинцовым методами. Часто результаты определения перепроверяются в нескольких лабораториях. Определение возраста считают достоверным, если с помощью разных методов были получены близкие результаты. Здесь я следую этому правилу, и если я не всегда цитирую самые внушительные цифры из приводимых в литературе, то это потому, что я стараюсь придерживаться самых надежных (на сегодняшний день) данных.

Не знакомого с проблемой человека результаты датирования могут поставить в тупик. Геологи с такой легкостью бросаются миллионами и миллиардами лет, как будто сами жили все это время. Понятно, что свежему человеку такие споры могут показаться несерьезными. Это недоверие еще усиливается тем, что многие из ранних датировок впоследствии оказались неверными. Однако любопытно, что исправляют эти данные обычно в сторону увеличения. Честное слово, может показаться, что по мере совершенствования метода возраст пород с каждым годом увеличивается на пару миллионов лет. Но ничего странного в этом нет: когда определение абсолютного возраста по изотопам только начиналось, геологи были очень осторожны в своих оценках и предпочитали ошибаться в сторону уменьшения.

Я хотел показать, что абсолютное датирование — не словесная игра миллионами и миллиардами лет и не гадание на кофейной гуще. Она основана на фундаментальных законах физики. Датирование проводят несколькими независимыми методами, и результаты сравнивают. Все же надо признать, что эти методы весьма сложны в работе. Они находятся на грани возможностей современной аналитической и электронной техники. Мало того, за долгие тысячелетия геологической истории породы, содержащие «радиоактивные часы», испытали всевозможные превратности судьбы. Поэтому главная трудность сейчас состоит не в том, чтобы измерить «возраст» породы, а в том, чтобы узнать, как расценивать этот «возраст». Он может означать время, прошедшее с момента образования породы. Но не исключено, что в действительности это время, прошедшее после какого-то более позднего события в истории породы, например с момента ее перекристаллизации или другого «происшествия», стершего первичные показания «часов», так что теперь они показывают дату этого события, а не возраст породы. Именно вокруг таких вопросов и ведутся теперешние дискуссии, связанные с проблемой определения абсолютного возраста.

Но не будем углубляться в подробности. В целом надо признать, что величины возраста, получаемые этим методом, достойны доверия как наиболее точные определения реального возраста горных пород, доступные в настоящее время.

## 12. АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОД И ОТЛОЖЕНИЙ

В разд. 5 этой главы говорилось об определении относительного возраста изверженных пород по окружающим их осадочным породам. Здесь мы обсудим применение методов определения абсолютного возраста к этим двум классам пород. Определение абсолютного возраста обычно возможно для изверженных пород и рудных минералов, а для осадочных пород его удастся осуществлять лишь в некоторых, довольно редких случаях. Значит, и в этом отношении методология абсолютного датирования отличается от методологии определения относительного возраста, основанного на анализе руководящих ископаемых и на принципе суперпозиции.

Кроме затруднительных случаев, таких, как позднейшая перекристаллизация породы (см. предыдущий раздел), «абсолютный возраст породы» (или рудного минерала) обычно означает время, прошедшее с момента кристаллизации породы или образования рудной жилы. В это время небольшие количества радиоактивных элементов могли включаться в кристаллическую решетку растущего минерала. Начиная с этого момента продукты распада радиоактивного элемента оставались (вернее, должны были бы оставаться) во вмещающем минерале. Значит, измерив содержание материнского и дочернего элементов либо в целой пробе породы, либо в отдельных кристаллах минерала, мы можем рассчитать возраст породы.

В осадочных породах содержится масса продуктов распада разных радиоактивных рядов. Они были выветрены из более древних пород, а затем снесены и отложены в водоеме. Поэтому анализ пробы осадочной породы «по монолиту» даст не время, прошедшее с момента образования осадка (возраст породы), а совершенно бессмысленную цифру. Известны, впрочем, немногие исключения. Так, анализ некоторых весьма тонкозернистых ордовикских отложений из Швеции торий-свинцовым и уран-свинцовым методами позволяет определить их абсолютный возраст, потому что зерна осадка при отложении сортировались по удельной массе на две группы: зерна, содержащие торий и уран, и зерна, содержащие свинец. В результате свинец отлагался отдельно, и мы можем быть уверены, что весь свинец, обнаруживаемый в осадках первой группы, имеет радиогенное происхождение, т. е. его содержание пропорционально абсолютному возрасту породы. Такой осадок можно назвать девственным. — он не содержит остатков радиоактивных распадов, происходивших до его образования.

Отдельные зерна минералов в осадочных породах обычно тоже не годятся для определения возраста осадка. Как правило, эти зерна — продукт разрушения более древней осадочной породы. Они принесены в осадочную породу водой, в них содержатся материн-

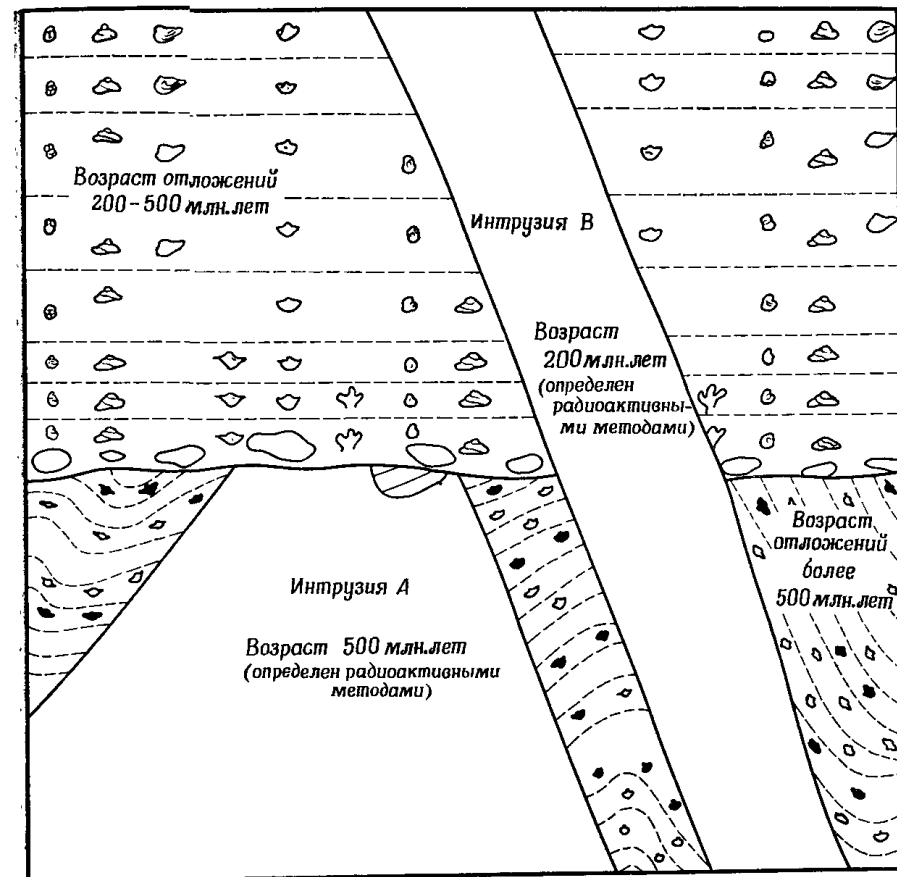
ские и дочерние элементы в пропорциях, соответствующих возрасту этих минералов, когда-то выкристаллизовавшихся из расплава. Правда, эти зерна можно использовать для определения возраста пород, участвовавших в образовании осадка.

Определение абсолютного возраста возможно только для тех осадочных пород, в которых содержатся минералы, образовавшиеся непосредственно во время осадконакопления. Эти новообразовавшиеся, так называемые *аутигенные* минералы, если в них содержатся радиоактивные элементы, ничем не уступают минералам, кристаллизовавшимся при образовании изверженной породы или рудной жилы. В отложениях позднего докембрия и фанерозоя встречается минерал, используемый для целей абсолютного датирования, а именно *глауконит*. Это сложный силикат зеленоватого цвета. В нем присутствует калий; следовательно, он пригоден для датирования калий-аргоновым методом. Глауконит образуется на дне неглубоких теплых морей параллельно с отложением известняка, по-видимому, при участии каких-то биохимических процессов. Но глауконит обычно встречается только в породах, возраст которых не превышает 1 млрд. лет. Поэтому его нельзя использовать для датирования пород из наиболее интересных нас периодов. Определение абсолютного возраста более ранних отложений иногда проводится на осадочных урановых рудах. При этом подразумевается, что хотя бы часть урановых минералов этих руд является аутигенной. Пример такой датировки будет приведен в разд. 10 гл. XIII, но уже сейчас можно отметить, что данный метод ненадежен. Многие минералы урановых руд наверняка возникли ранее образования самой осадочной руды и принесены в нее водой в виде продуктов выветривания более древних пород.

В общем, за исключением только что перечисленных случаев, определение абсолютного возраста обычно проводят на изверженных породах или на рудных минералах. Значит, даже методы определения абсолютного возраста позволяют определять лишь относительный возраст осадочных пород. Об осадочной породе говорят, что она «моложе интрузии А и древнее интрузии В», точно так же как относительный возраст изверженных пород определяется в выражениях типа «они моложе отложения Х и древнее отложения Y». Это основное различие между абсолютным и относительным датированием отражено на фиг. 8.

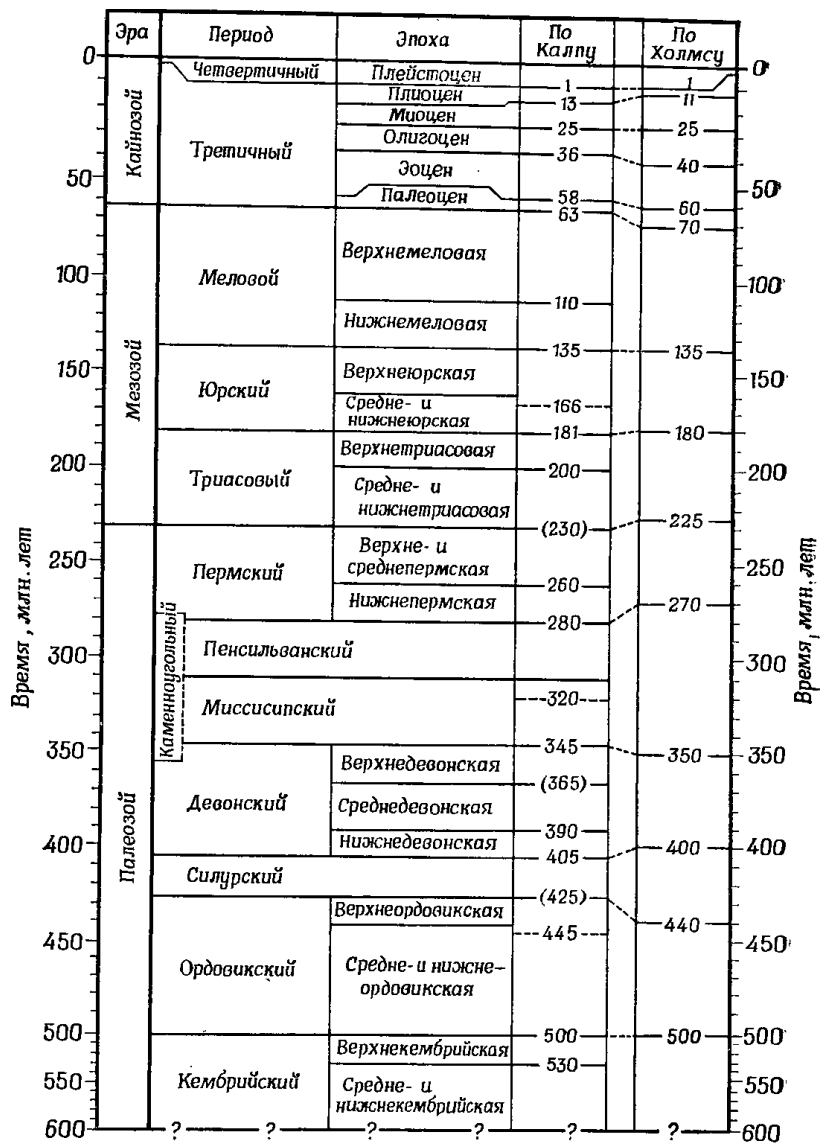
### 13. ДОЛГАЯ РАННЯЯ ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ

Главным результатом распространения методов определения абсолютного возраста было то, что мы получили представление об огромной длительности раннего периода развития Земли. Данные об организмах, живших в этот период, очень скудны. Окаменелости начинают встречаться чаще лишь в слоях, относящихся к тому



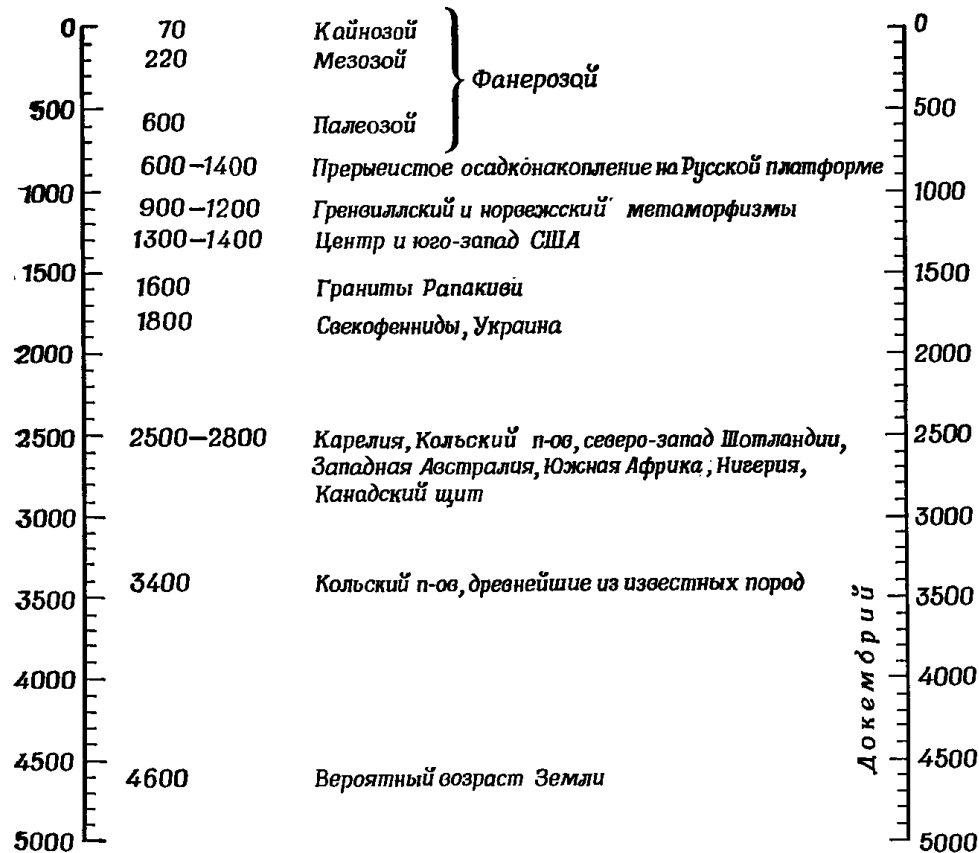
Фиг. 8. Схема, поясняющая применение методов определения относительного и абсолютного возраста.

Толща древних осадочных пород, относительный возраст которых можно определить по содержащимся в них ископаемым остаткам организмов, стоящих на разных ступенях эволюции, была смята в процессе горообразования. В конце орогенного периода в осадочные породы проникла магма (интрузия А). Позднее складчатые толщи вместе с интродуировавшими изверженными породами обнажились и подверглись эрозии. На эродированной поверхности с несогласием залегает пласт более молодых осадков. В нем, вблизи его подошвы, содержится галька изверженной породы интрузии А, и потому можно утверждать, что эта интрузия моложе складчатых отложений и древнее вышележащих горизонтальных пластов. Серия более молодых отложений тоже может быть датирована относительно на основании содержащихся в ней ископаемых остатков, которые можно расположить в эволюционный ряд. В вышележащих горизонтальных пластах нет ни одного из тех ископаемых остатков, которые встречаются в складчатой серии; значит, между отложением этих пород прошло много времени. Но нельзя сказать, насколько велик был этот промежуток времени, невозможно выразить его в годах. Абсолютное датирование дает возраст двух интрузий А и В — 500 и 200 млн. лет соответственно. Но абсолютный возраст отложений может быть выражен только как «древнее 500 млн. лет» и «200—500 млн. лет».



Фиг. 9. Абсолютная временная шкала по Калпу [11] и Холмсу [7].

Подразделение «система», употребляемое в тексте, заменено здесь «периодом». В том же работ, посвященных памяти Артура Холмса [4], можно найти более новую и более подробную временную шкалу, официально принятую Геологическим обществом. Но она для нас слишком подробна, а различия в хронологии невелики — всего на несколько миллионов лет.



Фиг. 10. Временная шкала геологической истории (датировка главных событий указана в миллионах лет).

Как указано в тексте, некоторые приведенные здесь датировки теперь несколько изменены. Эта фигура должна рассматриваться в сопоставлении с фиг. 9, тогда яснее будет видна сравнительная краткость фанерозоя. Некоторые различия в датировках, встречающиеся в литературе (например, возраст пород Кольского полуострова здесь принят равным 3400 млн. лет, а другие авторы указывают 3300 млн. лет), объясняются тем, что методы определения абсолютного возраста дали цифру 3340 млн. лет, и одни авторы округляют ее до 3400, а другие, более осторожные, до 3300 млн. лет.

времени, когда во многих зоологических типах появились организмы с твердым скелетом, т. е. в нижнем и среднем кембрии. Это первая система палеозойской группы, и каждый геолог, имеющий дело с окаменелостями, замечает здесь явный перелом в истории Земли. Существует поздняя геологическая история, начиная с кембрия, породы которой прекрасно удается датировать по руководящим формам, и есть ранняя, темная история Земли, докембрий, почти не оставивший ископаемых остатков. В последние годы этот разрыв подчеркнули еще резче, выделив более поздний, богатый окаменелостями период истории Земли под именем *фанерозоя*. Как уже было сказано, он охватывает три эры — палеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую (фиг. 9, 10). Итак, крупные подразделения геологической истории — это докембрий, начало которого совпадает с началом истории Земли, и фанерозой, начавшийся с кембрия и продолжающийся сейчас.

Этот перелом, относящийся к началу кембрийского периода, произошел, как полагают в настоящее время, 570 млн. лет назад [1]. Но возраст древнейших пород земной коры, по достоверным определениям, равен 3300—3400 млн. лет, а самым древним горным породам, видимо, около 4500 млн. лет (см. следующий раздел). Значит, палеозойская, мезозойская и кайнозойская эры, занявшие вместе 600 млн. лет, составляют менее одной пятой времени существования современной или сходной с ней земной коры. А более четырех пятых геологической истории Земли занимает докембрий, оставивший очень мало палеонтологических документов. Именно в тот ранний период и появилась жизнь.

Читатель получит представление о соотношении этих разделов истории Земли, сравнивая фиг. 9 и 10. На фиг. 9 изображена последовательность эр и периодов фанерозоя, начиная с палеозойской эры и ее первого периода — кембрия, в котором ископаемые становятся более или менее обильными. На фиг. 10 вы видите всю историю Земли. Сразу заметно, как мал фанерозой по сравнению с более ранними эпохами. Фиг. 103 и 104 (в заключительной главе) не менее наглядны. На первой из них приводится схема развития жизни на протяжении фанерозоя, на второй, более обзорной, но менее подробной, дана схема всей истории происхождения и развития жизни.

#### 14. «ДРЕВНЕЙШИЕ ПОРОДЫ»

Теперь надо разобраться, что же мы имеем в виду, говоря о «древнейших породах». Конечно, «древнейшая» порода — не что иное, как образец породы, который, судя по имеющемуся в нем количеству продуктов радиоактивного распада, образовался раньше других исследованных образцов. Его возраст указывает на минимальный возможный возраст Земли. Прямо определить воз-

раст нашей планеты мы не можем, а как оценить его по косвенным данным, будет рассказано дальше.

Оказывается, возраст древнейших ископаемых остатков (гл. XII), возраст древнейших пород и возраст Земли, оцененные различными методами, близки друг к другу. Но прежде всего надо точно определить, какой смысл мы вкладываем в эти термины.

Поскольку мы интересуемся проблемой происхождения жизни, нам не так важен возраст самой Земли, как возраст древнейших пород, которые могли служить субстратом жизни, т. е. возраст поверхностных пород (пород земной коры). Коль скоро мы занялись этим вопросом, нам придется слегка коснуться общей схемы строения Земли.

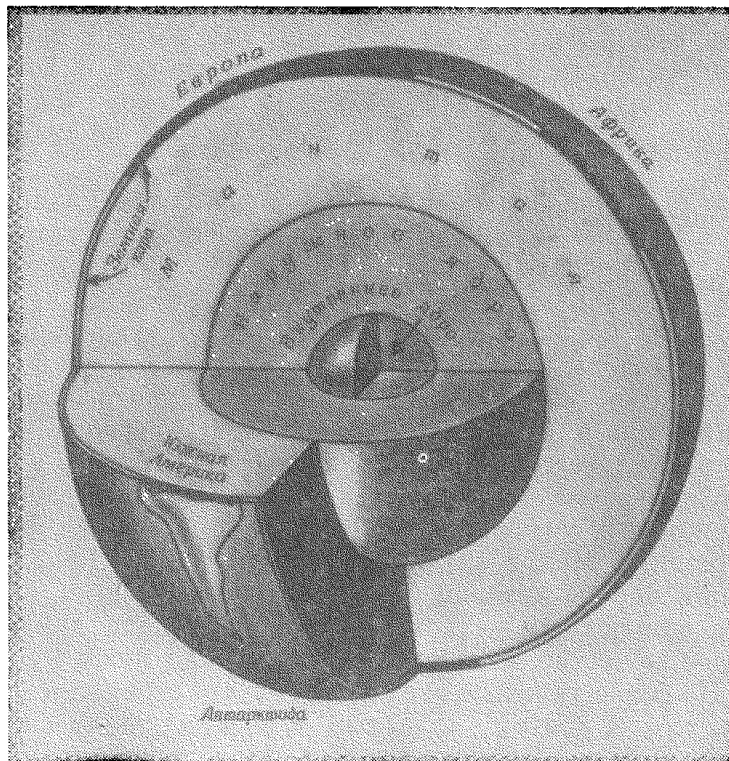
Судя по геофизическим данным, в центре нашей планеты находится ядро, которое окружено сначала мантией и затем корой. Считается, что плотное расплавленное ядро Земли состоит в основном из никеля и железа. Твердая мантия состоит из плотных ультраосновных пород, т. е. пород с малым содержанием кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ). Породы мантии, как думают геологи, внешне напоминают зеленоватый минерал серпентин, часто употребляемый для отделки мраморных архитектурных деталей; в основном они состоят из минерала оливина. Общий состав коры сходен с составом гранита. Кора весьма тонка по сравнению с другими слоями: толщина материковых участков коры — около 30 км, а под глубинами океанов толщина коры всего несколько километров (фиг. 11).

В ранний период истории Земли ее состав, видимо, был более или менее однородным — таким же, каким, надо думать, было межзвездное вещество, из которого она тем или иным путем образовалась. Но более тяжелые элементы сильнее стремились к центру тяготения, т. е. к центру планеты, и собирались во внутренней части земного шара. Постепенно медленная центростремительная диффузия тяжелых элементов привела к выделению ядра и мантии. Поверхность Земли в это время, видимо, подвергалась эрозии и связанным с ней процессам. Предполагают, что со временем они каким-то не совсем еще понятным образом привели к образованию поверхностной коры. Таким образом, сразу после образования Земли началось расслоение ее на ядро, мантию и кору. Значит, Земля в целом должна быть старше, чем мантия и кора.

Начнем с коры. Древнейшие известные сейчас породы коры — это граниты Кольского полуострова (фиг. 10)<sup>1</sup>, возраст которых определен в 3,3—3,4 млрд. лет. Геологи, однако, полагают, что эти

<sup>1</sup> Для некоторых пород африканского континента получены более внушительные цифры, но пока их достоверность не доказана. Из осторожности я принял здесь возраст в 3,3 млрд. лет как максимальный. Возможно, эта цифра окажется заниженной. (В районе Готхоба, Юго-Западная Гренландия, недавно найдены гнейсы возрастом 3,98 млрд. лет. Датировка проведена рубидий-стронциевым методом. — *Прим. перев.*)

граниты нельзя считать первичными породами. Скорее они представляют собой очень древние, подвергшиеся сильному метаморфизму осадочные породы. Этот значительный метаморфизм, или, как говорят геологи, процесс мигматизации, произошел примерно 3,3 млрд. лет назад, во время горообразования.



Фиг. 11. Схематический разрез Земли, показывающий материковую кору, мантию и ядро.  
Толщина коры и высота горных поясов преувеличены.

В гл. XII, разд. 18, мы узнаем об осадочной системе Свазиленд (Южная Африка), о которой можно лишь сказать, что ее породы «имеют возраст более 3,2 млрд. лет», так как в них найдены интрузии именно этого возраста. Методы определения абсолютного возраста пока не позволяют решить, являются ли эти южноафриканские интрузии ровесниками кольских гранитов (3,3—3,4 млрд. лет). Если датировка подтвердится, придется отнести отложения системы Свазиленд к самым древним из известных пород земной коры. Но осторожнее было бы говорить о «самых древних из известных до сих пор осадочных пород».

Не исключено, что тектонические движения местами достигали такого размаха, что выносили вещество мантии на поверхность. Возможно, именно такой случай представляют собой скалы Сан-Паулу — группа утесов в Южной Атлантике посредине глубокой океанской впадины. Эти скалы сложены плотными ультраосновными породами типа тех, из которых, как думают, состоит мантия. Более того, их возраст оценивается в 4,5 млрд. лет [12, 16]<sup>1</sup>.

Таким образом, мы можем предварительно принять, что веществу мантии около 4,5 млрд. лет. Возраст коры (во всяком случае, ее древнейшей части) должен лежать между 4,5 и 3,3 млрд. лет. Даже если мы найдем в породах, метаморфизованных около 3,3 млрд. лет назад, остатки более древних пород коры, все же этот возраст надо считать минимальным приемлемым возрастом «древнейших пород коры». Перефразируя известные слова Джеймса Геттона (1726—1797), можно сказать, что наконец «мы нашли следы начала».

Если даже эти древнейшие породы позже подвергались метаморфизму, то не исключено, что мы сможем найти их следы, изучая минералы, из которых состоят граниты Кольского полуострова. Может быть, некоторые минералы без изменения перенесли интенсивный метаморфизм, сопровождавший горообразование 3,3 млрд. лет назад или какой-то из более поздних периодов горообразования. Как мы узнаем из гл. X, в более поздние периоды горообразования такие случаи были обычны.

Итак, возраст кольских гранитов — 3,3 млрд. лет — минимальный возможный возраст земной коры. Мы знаем, что кора существовала и раньше, но пока не знаем, каков действительный срок ее существования.

Но вернемся к мантии. Получить непосредственные данные о составе и свойствах ее вещества пока не удалось. Даже самые глубокие буровые скважины не доходят до мантии. Ученые США и СССР планировали бурение нескольких сверхглубоких скважин через всю толщу коры. Регистрируемый сейсмографами слой скачка плотности между корой и мантией назван разделом Мохоровичича, по имени югославского геофизика, первым указавшего на существование этого слоя. Американцы сократили термин до «Мохо», и проект сверхглубокой скважины был поэтому назван «Мохол»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Но это не результат прямой датировки. Цифра получена на основании измерения отношения двух стабильных изотопов стронция <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (первый из них имеет радиогенное происхождение — из <sup>87</sup>Rb, второй — нерadiогенный). Ход рассуждений похож на применяемый при датировании свинец-свинцовым методом (см. следующий раздел). Был сделан вывод, что эти ультраосновные породы не подвергались химическим изменениям в течение последних 4,5 млрд. лет. Для прямой датировки содержание радиоактивного материала в этих породах слишком незначительно [5].

<sup>2</sup> Название проекта «Mohole» составлено из сокращения «Moho» и слова «hole» — буровая скважина. — Прим. перев.

Цифра 4,5 млрд. лет — нижний предел возможного возраста Земли. Интересно, что этот нижний предел весьма близок к общепринятой сейчас оценке возраста Земли — 4,5 млрд. лет (фиг. 10). Теперь нам надо узнать, какими методами получены цифры, говорящие о «возрасте Земли». Все новейшие оценки основаны на новом, свинец-свинцовом методе, представляющем собой развитие уран-свинцового и торий-свинцового методов.

### 15. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УРАН-СВИНЦОВОГО И ТОРИЙ-СВИНЦОВОГО МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА

Усовершенствование этих методов стало возможным лишь благодаря развитию масс-спектрометрии. Как следует из табл. 1 и фиг. 5,6, торий, уран и его изотоп актиний распадаются до свинца. Различить изотопы свинца с помощью классического химического анализа невозможно, поэтому раньше нельзя было установить, какая часть свинца, найденного в урановой руде, образовалась в результате распада урана или тория, а какая не имеет отношения к радиоактивному распаду. Иными словами, задача состоит в том, чтобы узнать, сколько обычного, нерадиогенного свинца в урановой руде.

Как уже было сказано, масс-спектрометрия позволяет определить, сколько в этом свинце  $^{208}\text{Pb}$  (продукт распада  $^{232}\text{Th}$ ), сколько  $^{207}\text{Pb}$  (продукт распада  $^{235}\text{Ac}$ ) и сколько  $^{206}\text{Pb}$  (продукт распада  $^{238}\text{U}$ ). Более того, с помощью масс-спектрометра можно определить и процентное содержание обычного, нерадиогенного свинца (изотопа  $^{204}\text{Pb}$ ) в исследуемом образце. Многочисленные химические анализы показали, что два изотопа урана, а именно уран и актиноуран, всегда встречаются в природных минералах в соотношении 139 : 1. Значит, можно и не определять количество актиноурана в пробе, а принять его за  $1/139$  количества урана. На этом и основан свинец-свинцовый метод: анализы и расчеты упрощаются, и возраст можно прямо вывести из формулы

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}} = \frac{(e^{\lambda t} - 1) \cdot ^{238}\text{U}}{(e^{\lambda_1 t} - 1) \cdot \frac{1}{139} ^{238}\text{U}},$$

где  $\lambda$  и  $\lambda_1$  — постоянные распада  $^{238}\text{U}$  и актиноурана ( $^{235}\text{Ac}$ ).

### 16. ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ

Для оценки возраста Земли была использована другая модификация метода. Она основана на том факте, что лишь очень малая часть тяжелых элементов коры (свинца, урана, тория) сконцентри-

рована в рудных месторождениях, а основной запас этих металлов рассеян в породах коры в виде следов.

Английский геолог А. Холмс и немецкий ядерный физик Ф. Хоутерманс независимо друг от друга предложили использовать такое распределение тяжелых элементов в земной коре для расчета возраста Земли. Этот метод теперь известен под названием «модель Холмса — Хоутерманса». В нем используется изотопный состав так называемого обычного свинца, содержащегося в галените — минерале рудных свинцовых жил.

Поскольку свинец, уран и торий сильно рассеяны в земной коре, можно считать, что концентрирование свинца в рудное месторождение — очень редкое событие. Значит с большой вероятностью можно допустить, что атомы свинца, которые мы находим сейчас в руде, претерпели такое концентрирование лишь однажды за время своего существования.

При концентрировании в руду свинец отделялся от своего прежнего окружения, т. е. от пород, в которых он был рассеян в качестве следового элемента. Поскольку свинец переходит в подвижное состояние при гораздо меньшей температуре и давлении, чем уран и торий, он отделялся и от этих элементов, которые вместе с ним были рассеяны в породе. Следовательно, после того как свинец собрался в рудную жилу, прекратилось его накопление за счет распада радиоактивных элементов. Прекратилось и изменение его изотопного состава. Таким образом, свинцовые руды как бы законсервированы. Они сохраняют изотопный состав свинца, рассеянного когда-то в материнской породе.

В материнской породе изотопный состав свинца со временем медленно менялся: накапливались изотопы  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  — конечные продукты распада урана и тория, содержащихся в той же породе. В разных породах исходное содержание свинца, урана и тория, конечно, было различным; кроме того, возраст разных материнских пород, из которых затем мигрировал свинец, также различался. Поэтому изотопный состав обычного свинца, поступившего из разных пород, может быть самым разнообразным.

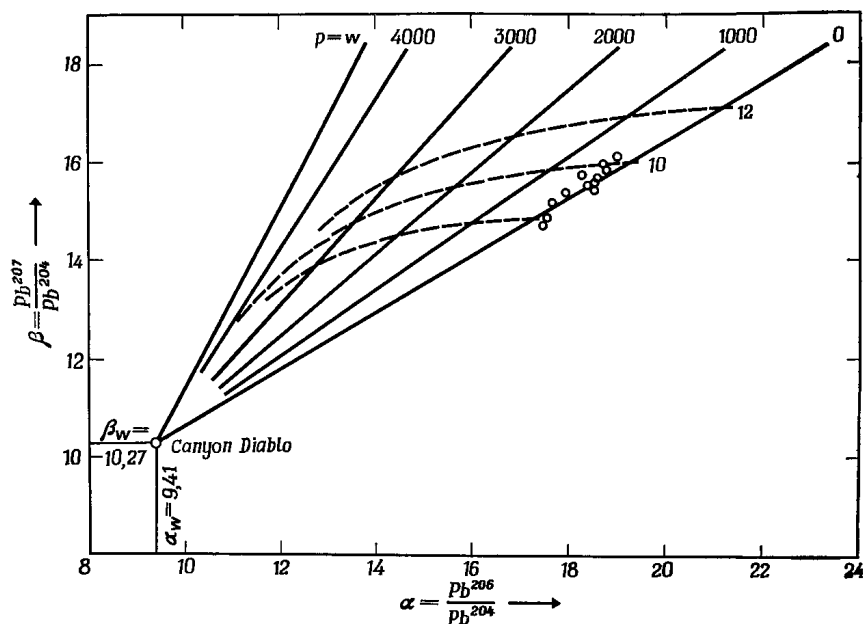
Чтобы принять в расчет различия, зависящие от первичных колебаний относительного содержания свинца, с одной стороны, и урана и тория — с другой, эти различия лучше выразить через коэффициент  $\mu$ . Это отношение количеств  $^{238}\text{U}$  и  $^{204}\text{Pb}$ , экстраполированное к настоящему времени:

$$\mu = \left( \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} \right)_{\text{наст.}}$$

Для каждого значения коэффициента  $\mu$  характерна особая кривая изменения изотопного состава свинца со временем.

Чтобы рассчитать возраст Земли, надо знать изотопный состав первозданного свинца. Конечно, проще всего было бы принять,

что весь первозданный свинец состоял из нерадиогенного изотопа  $^{204}\text{Pb}$ . Но это не так: известно, что в межзвездном веществе, из которого формировалась Земля, содержатся естественные радиоактивные элементы. К тому же оказалось, что в свинце, найденном в метеоритах, есть радиогенные изотопы. Следовательно, первозданный свинец Земли уже должен был иметь сложный изотопный состав.



Фиг. 12. История изменения состава обычного свинца согласно модели Холмса — Хоутерманса [9].

Сплошные линии — изохроны; пунктирные линии — ход изменения современного изотопного состава обычного свинца с разными значениями коэффициента  $\mu$ . Этот коэффициент представляет собой соотношение количеств урана и нерадиогенного свинца в материнской породе. На верхней абсциссе отложено время в миллионах лет. Изохрона  $w$  соответствует  $4,5 \pm 0,3$  млрд. лет.

Хоутерманс [9], далее, принял, что с земным первозданным свинцом наиболее сходен свинец железных метеоритов, практически не содержащих урана и тория. Изотопы свинца 206, 207 и 208, содержащиеся в таких метеоритах, не могли образоваться путем радиоактивного распада за время существования метеорита (ведь урана и тория в нем нет). Лучше других был проанализирован состав свинца из метеорита Canyon Diablo, потому его и выбрали на роль образца первозданного земного свинца.

На фиг. 12 показаны графики изменения изотопного состава свинца при разных значениях коэффициента  $\mu$ . В разных горных

породах значение  $\mu$  варьирует от 9 до 10; чаще всего  $\mu = 10$ . Взяв за основу изотопный состав свинца из метеорита Canyon Diablo, можно построить изохроны. Точки их пересечения с кривыми, описывающими изменение изотопного состава свинца при разных  $\mu$ , указывают изотопный состав обычного свинца, выделившегося из материнской породы, в момент, соответствующий данной изохроне. Кривые ограничены изохронной  $w$ ; это самая древняя из возможных изохрон. Она и соответствует возрасту Земли. Наклон этой изохроны соответствует промежутку времени

$$w = 4,49 \cdot 10^9 \text{ лет};$$

поэтому обычно считают, что «возраст Земли» составляет 4,5 млрд. лет.

Гипотеза Холмса — Хоутерманса, как мы помним, основана на допущении, что свинец в данной руде концентрировался лишь однажды. Однако оно, видимо, справедливо не для всех случаев. Этот метод, примененный к свинцовой руде с недостаточно хорошо известным геологическим прошлым, дает довольно курьезные результаты. Но встречающееся в литературе резко критическое отношение к самой идее метода кажется мне необоснованным. Статистически допущение Холмса — Хоутерманса должно соответствовать действительности, и тезис о параллельном и независимом ходе изменения обычного свинца в разных местах Земли можно считать верным.

Хотя ценность метода Холмса — Хоутерманса кажется несомненной, получаемый результат может меняться в зависимости от того, какие величины принимают в качестве исходных. Тилтон и Стейгер [17], используя свинец гранитов и свинцовых руд возрастом 2700 млн. лет, в котором должно быть много загрязнений, оценили возраст Земли в 4750 млн. лет. Ульрих [18], используя океанические базальты, получил даже цифру  $5430 \pm 40$  млн. лет; правда, она еще нуждается в подтверждении. Таким образом, не исключено, что возраст Земли превышает 4,5 млрд. лет. Это избавило бы нас от очевидного парадокса: возраст пород мантии также составляет около 4,5 млрд. лет, а ведь этим породам требовалось какое-то время для кристаллизации. Так или иначе, согласно современным данным, возраст Земли не превышает 5 млрд. лет.

Теперь мы видим, как быстро развивались события в ранний период истории Земли. Если нашей планете не более 5 млрд. лет, то в ранние дни (точнее — ранние миллионы лет) геологической истории темп развития Земли был сравнительно быстрым. Затем наступил довольно спокойный период сменяющих друг друга циклов горообразования. Этот не сопровождавшийся значительными пертурбациями период длится уже более 3,3 млрд. лет.



## Список литературы

1. *Anonymous*, The Geological Society Phanerozoic time-scale, Quart. J. Geol. Soc. London, 120s, 260—262 (1964).
2. *Deutsch S., Hirschberg D., Picciotto E.*, Étude quantitative des halos pléochroïques, Bull. Soc. Belge Géol., Paléontol. Hydrol., 65, 267—281 (1956).
3. *Faul H.*, Ages of Rocks, Planets and Stars, McGraw-Hill, New York, N. Y., 109 pp., 1966.
4. *Harland W. B., Smith A. G., Wilcock B.*, A symposium dedicated to Professor Arthur Holmes, Quart. J. Geol. Soc. London, 120s, 458 pp. (1964).
5. *Hart R. S.*, Ultramafic rocks of St. Paul's islands, Ann. Rept. Terrestrial Magnetism—Carnegie Inst., Washington, D. C., 63, 330—331 (1964).
6. *Holmes A.*, The construction of a geological time-scale, Trans. Geol. Soc. Glasgow, 21, 117—152 (1947).
7. *Holmes A.*, A revised geological time-scale, Trans. Edinburgh Geol. Soc., 17, III: 183—216 (1960).
8. *Holmes A.*, Introduction. In: K. Rankama (Editor), The Precambrian, Interscience, New York, N. Y., 1, XI—XXIV, 1963.
9. *Houtermans F. G.*, Die Blei-Methoden der geologischen Altersbestimmung, Geol. Rundschau, 49, 168—196 (1960).
10. *Kulp J. L.*, The geological time-scale. Intern. Geol. Congr., 21st, Copenhagen, Rept. Session, Norden, 3, 18—27 (1960).
11. *Kulp J. L.*, Geological time scale, Science, 133, 1105—1114 (1961).
12. *Melson W. G., Jarosewich E., Bowen V. T., Thompson G.*, St. Peter and St. Paul Rocks: A high-temperature mantle-derived intrusion, Science, 155, 1532—1534 (1967).
13. *Rankama K.*, Isotope Geology, McGraw-Hill, New York, N. Y., 535 pp., 1954.
14. *Rankama K.*, Progress in Isotope Geology, Interscience, New York, N. Y., 705 pp., 1963.
15. *Russel R. D., Farquar R. M.*, Lead Isotopes in Geology, Interscience, New York, N. Y., 243 pp., 1960.
16. *Stubbs P.*, The oldest rocks in the world, New Scientist, 25, 82 (1965).
17. *Tilton G. R., Steiger R. H.*, Lead isotopes and the age of the earth, Science, 150, 1805—1808 (1965).
18. *Ulrych T. J.*, Oceanic basalt leads; a new interpretation and an independent age for the earth, Science, 158, 252—256 (1967).
19. *Zeuner F. E.*, Dating the Past. An Introduction to Geochronology, 4th ed., Methuen, London, 516 pp., 1958.

## БИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Из второй главы мы узнали, что восстановление истории Земли по сведениям о составе, строении и залегании горных пород основано на принципе актуализма. Этот принцип гласит, что, с некоторыми разумными ограничениями, знания о современных геологических процессах можно применять и к древним процессам, шедшим миллионы и миллиарды лет назад. Теперь познакомимся с результатами биологических исследований современных живых существ. Что характерно для жизни? Что можно назвать живым и что надо считать неживым? Какие процессы идут в живых существах или, другими словами, каков метаболизм современных живых существ?

Как уже отмечалось в гл. I, именно биологи вновь возбудили интерес к проблеме возникновения жизни путем естественного самозарождения, без вмешательства творца. Пионером этого движения стал русский биохимик А. И. Опарин, уже в первом издании своей книги (1924 г.) изложивший теоретические основы современных взглядов. Мировой научной общественности идеи Опарина стали известны в основном из английского перевода его книги, вышедшего под названием «The Origin of Life on Earth» [16] (см. также [18, 20]). Совершенно независимо от А. И. Опарина английский биофизик Дж. Холдейн пришел к мысли, что анаэробный тип обмена примитивнее аэробного, а это в свою очередь привело его к выводам, очень сходным с выводами А. И. Опарина. Идеи Опарина и Холдейна были объединены английским физиком Берналом в небольшой, но содержательной книге «Физические основы жизни» [1]. Бернал подвел под идеи биологов прочный фундамент физики и химии.

И все же эти новые взгляды почти не привлекли к себе внимания ученых. Некоторые из них заинтересовались было, но какого-либо реального участия в разработке проблемы они так и не смогли принять. Во-первых, развитию этих идей помешала вторая мировая война, во время которой люди больше интересовались проблемами наиболее эффективного уничтожения жизни, чем ее происхождением. Во-вторых, ученые вообще не очень-то были склонны размышлять над этой проблемой, о чем я уже говорил в гл. I.

Поворотным моментом, мне кажется, стал первый симпозиум Международного биохимического союза, проходивший в Москве в 1957 году [17]. Симпозиум был посвящен обсуждению проблем, связанных с возможностью возникновения жизни естественным путем, с точки зрения биологии, физики, химии, геологии и астрономии. Этими проблемами заинтересовалось немалое число ученых. Кроме того, стало ясно, что возможна экспериментальная проверка предложенных теорий.

Следующим шагом и явилась постановка экспериментов в этой области. В 1959 году Миллер [14] смог в неживой системе синтезировать органические молекулы. Он использовал специально разработанную среду, моделирующую гипотетическую первичную атмосферу, основные свойства которой читатель уже знает и о которой мы поговорим подробнее в гл. VI.

Конечно, химики и раньше умели синтезировать органические вещества без помощи живых организмов, но Миллер впервые подошел к органическому синтезу с точки зрения проблемы происхождения жизни, и его эксперименты получили заслуженную известность.

Эти результаты возбудили интерес в широких научных кругах. Эксперименты по синтезу органических молекул в условиях первичной атмосферы повторялись разными учеными в различных вариантах. Вторая встреча в Москве, на Пятом международном биохимическом конгрессе [19], продемонстрировала значительный прогресс в этой области.

Любой подробный обзор современных успехов в экспериментальном подходе к проблеме устарел бы, еще не сойдя с печатного станка. Все же в гл. VI я позволю себе набросать в общих чертах пути развития экспериментов в этой области, находящейся сейчас главным образом в руках биохимиков, химиков и так называемых «молекулярных» биологов. В 1965—1966 годах итоги работ были подведены на трех конференциях [4, 8, 13]. Труды последней из них особенно достойны упоминания: здесь собрана полная и подробная библиография. Есть и более новые обзоры [7, 24]. Дж. И. Буханан [8, стр. 109 русского издания] так охарактеризовал результаты, достигнутые экспериментаторами: «Результаты, полученные за последнее десятилетие несколькими группами исследователей, свидетельствуют о возможности образования абиогенным путем в определенных условиях, моделирующих предбиологические, целого ряда биологически важных соединений из таких простых предшественников, как метан, аммиак, водород и вода. К числу таких биологически важных соединений относятся органические кислоты, пурины, пиримидины и многие аминокислоты...

В настоящее время синтезированы многие, если не все, низкомолекулярные соединения, являющиеся составными компонентами макромолекул... Не вызывает, по-видимому, сомнений, что все эти

соединения термодинамически и энергетически являются наиболее вероятными продуктами...

Сейчас перед нами стоит очередная весьма сложная задача — выяснить, каким образом могло происходить образование функциональных макромолекул. Установлено, что низкомолекулярные соединения способны агрегировать с образованием биологически активных макромолекул<sup>1</sup>. Вопрос о возникновении биологически активных соединений представляет значительные трудности. Мы считаем, что такие соединения могли образоваться не в результате случайного появления высокоспециализированного фермента, а путем эволюции макромолекул, обладающих определенными преимуществами с химической и биологической точек зрения».

Эксперименты такого рода теперь очень усложнились и стали очень разнообразными. Я не стану входить в подробности, чтобы не слишком нарушить задуманную последовательность изложения, а отсылаю читателя к гл. VI, в которой приведены также формулы важнейших биохимических соединений. Гл. VI более насыщена специальными подробностями, в этой же главе дается общий очерк биологического подхода к проблеме.

## 2. ЖИВОЕ И НЕЖИВОЕ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Одно из главных затруднений, стоящих перед биологами, — как строго разграничить живое и неживое. Конечно, эта трудность не выступает так открыто в тех случаях, когда мы имеем дело с высокоорганизованными формами жизни — с человеком, животными и высшими растениями. Вопрос об определении границы между живым и неживым не встает перед нами и при чтении колонки с некрологами в газете, хотя точное определение момента смерти важно, например, в случае пересадки сердца. Но, переходя к низшим формам жизни, мы встречаемся с большими трудностями в разграничении живого и неживого. Нелегко провести четкую границу между самыми низшими, одноклеточными или неклеточными организмами, с одной стороны, и крупными неживыми молекулами — с другой. Или между крайне простыми способами метаболизма и размножения, очень сходными с химическими реакциями, но все же неотделимыми от живого организма, и сложными химическими взаимодействиями очень крупных молекул, которые по многим причинам надо считать неживыми.

В этих граничных случаях невозможно сформулировать строгое определение живого в отличие от неживого. Даже тот факт, что все живые существа содержат белок, так как их метаболизм в значительной мере определяется свойствами белков, не может

<sup>1</sup> Эти результаты С. Фокса и сотр. обсуждаются в гл. VI.

стать основой для такого определения. Нам неизвестна небелковая жизнь, но это не значит, что она невозможна. Однако, пожалуй, еще важнее то, что белок, как показал С. Фокс с сотрудниками, можно синтезировать и без участия организмов (см. гл. VI, разд. 6).

Биология отличает живое от неживого, основываясь на знании жизненных функций, а они не оставляют следа в геологической летописи. Геолог никогда не изучает описываемые им организмы (подробнее об этом — в гл. XII, разд. 2). Он находит лишь остатки жизни, мертвые и к тому же окаменелые. Правда, и биологи, особенно биохимики, обычно тоже используют мертвый материал, например срезы убитых организмов, убитые клетки или даже экстракты из разрушенных, растертых клеток. Изучая жизнь по мертвым ее останкам, они, по замечанию Винклера [29], похожи на пьяного, который уронил ключ от дома в темноте у подъезда, но ищет его под фонарем, потому что здесь лучше видно. И все же, хотя биолог использует для изучения жизни труп, он сам только что убил живой организм, подлежащий изучению, и обработал его особым образом, стараясь как можно меньше исказить изучаемую картину. В окаменелостях же вещество живых организмов замещено «камнем», т. е. минералами, а если и осталась какая-то часть исходного органического вещества, то она полностью разложена и изменена. Если замещение происходило упорядоченно, последовательно, молекула за молекулой, то структуры организма могли сохраниться достаточно хорошо, вплоть до мельчайших микроскопических деталей. Это самое большее, на что может надеяться геолог. Как мы увидим в гл. XII, перед геологом стоит проблема совсем иного порядка, чем та, с которой сталкивается биолог: как отличить «окаменелую» неживую материю от окаменелых остатков жизни?

Для наших целей мы можем использовать самое широкое определение жизни, предложенное биологами. Согласно этому определению, жизнь есть «макромолекулярная система, для которой характерна определенная иерархическая организация, а также способность к воспроизведению, обмен веществ и тщательно регулируемый поток энергии» [9].

### 3. ХИМИЧЕСКОЕ ЕДИНСТВО И МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ СОВРЕМЕННОЙ ЖИЗНИ

Знакомясь с данными биологических наук, нельзя не заметить несоответствия между огромным морфологическим разнообразием проявлений жизни и сравнительно малым набором химических реакций, лежащих в ее основе.

Морфологически можно различить громадное число отдельных форм жизни — видов, родов, семейств и более высоких таксономических групп микроорганизмов, растений и животных. Напротив, биохимически вся современная жизнь во всех ее проявлениях очень однообразна: она основана на нуклеиновых кислотах, белках, углеводах и жирах, а также на некоторых менее распространенных соединениях, например фосфорных эфирах. Эти соединения могут быть очень разнообразны в деталях, но все они взаимосвязаны и являются продуктами небольшого числа основных биохимических реакций.

Это биохимическое единство, впервые отмеченное Клюйвером [41, 25], — одно из главнейших характерных свойств современной жизни. Все растения, все животные, морские или наземные, от планктонных форм до кита, от вируса до слона, аэробы и анаэробы, словом, все формы жизни основаны на поразительно небольшом наборе главных органических соединений.

Часто говорят: природа устроена так, что каждое существо входит во всеохватывающую пищевую цепь, т. е. годится кому-то в пищу. Это связано с тем, что вся земная жизнь построена из сравнительно небольшого числа органических соединений. Таким образом, в любом организме найдется что-нибудь съедобное для других. Значит, этот афоризм говорит о биохимической общности всего живого. Вернее будет сказать, что все в живой природе взаимосвязано. В конечном счете это означает, что все живое имеет общее происхождение.

Я не хочу сказать, что химия жизни однообразна и проста, она лишь не так многообразна, как могла бы быть. В самом деле, хотя жизнь использует не все существующие химические элементы, она умеет крайне хитроумно распорядиться теми из них, которые идут в дело, извлечь из них максимум пользы. Эта приспособленность, эта уникальная связь между жизнью и ее субстратом снова и снова поражает биохимиков. Подробно об этом рассказано в книге Нидхема, озаглавленной «Уникальность биологического вещества» [15]<sup>1</sup>.

Эта уникальная связь привела Пири [22] к рассмотрению старого вопроса, есть ли жизнь и материя лишь две стороны одного явления или же это две отдельные сущности, одна из которых замечательно приспособлена к другой. Если верна первая точка зрения, то жизнь и материя созданы одновременно или же организм и материя могут взаимно влиять друг на друга. Наиболее

<sup>1</sup> Есть, конечно, некоторые отклонения от главного русла. Часть из них обсуждалась на симпозиуме «Некоторые биохимические аномалии и их возможное отношение к проблеме происхождения и распространения жизни», организованном Пири [23].

красноречиво это мнение защищал философ Плотин<sup>1</sup>. Другую точку зрения шутливо, но не менее красноречиво высказал Вольтер устами Панглоса в «Кандиде».

По мнению Пири [22], принятие первой точки зрения привело бы к необходимости ниспровержения всех основ науки, а этого ра-

Таблица 2

Минимальные и максимальные значения некоторых факторов среды, освоенной современной жизнью [28]

Фактор среды	Нижний предел	Верхний предел
Температура	—18°C (грибы, бактерии)	104°C (сульфатовосстанавливающие бактерии при гидростатическом давлении 1000 атм)
Eh	— 450 мВ при pH 9,5 (сульфатовосстанавливающие бактерии)	+ 850 мВ при pH 3 (железобактерии)
pH	0 ( <i>Acontium velatum</i> , гриб <i>D. Thiobacillus thiooxidans</i> )	13? ( <i>Plectonema nostocorum</i> )
Гидростатическое давление	Около 0	1400 атм (глубоководные бактерии)
Соленость	Бидистиллированная вода (бактерии-гетеротрофы)	Насыщенные растворы солей ( <i>Dunaliella</i> , галофильные бактерии и т. д.)
$a_w^1$	0,65—0,70 ( <i>Aspergillus glaucus</i> )	Около 1,0

<sup>1</sup>  $a_w$  (активность воды) =  $p/p_0$ , где  $p$  — давление водяного пара в исследуемом веществе, а  $p_0$  — давление пара чистой воды при той же температуре.

дикального шага данные наблюдений пока не требуют. Следовательно, остается вторая точка зрения, которая, заметим, вовсе не связана с признанием полного совершенства приспособленности жизни к среде. Нельзя согласиться с Панглосом, что мы живем в

<sup>1</sup> Плотин (205—270) — философ-мистик. По его учению, все сущее едино и представляет собой разные выражения божественного начала. — *Прим. перев.*

лучшем из возможных миров, но, конечно, стремление жизни к «совершенству» великолепно уже само по себе.

Что касается уникальной приспособленности жизни к среде, то надо помнить, что живое приспособлялось к преобладающим на нашей планете условиям в течение миллиардов лет органической эволюции. В настоящее время подавляющее большинство организмов могут существовать в довольно узком интервале условий среды. Вот эти условия: давление около 1 атм, соленость от 4% до 0, температура от 0 до 40° С. Но и сейчас в некоторых особых средах живут организмы, способные выдерживать условия, выходящие за указанные пределы. Табл. 2 дает представление о крайних значениях некоторых факторов, которые еще могут выносить особые формы жизни. Эта таблица может удивить и многих биологов, не предполагавших, что диапазон освоенных жизнью условий так широк.

Органическая химия начиналась как наука, изучающая, в противоположность неорганической химии, химический состав современных организмов. Природные органические соединения — белки, углеводы, жиры, нуклеиновые кислоты и другие вещества — состоят в основном из элементов С, О, Н, N и Р. Как правило, эти элементы соединены в очень большие молекулы сложного строения, которое ученые сейчас постепенно разгадывают. Но нам с вами не так уж важно строение этих молекул, надо лишь помнить, что большинство естественных органических соединений представляет собой сложные крупные молекулы.

#### 4. НЕВОЗМОЖНОСТЬ СПОНТАННОГО СИНТЕЗА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

Этот вывод чрезвычайно важен для изучения проблемы происхождения жизни. Во-первых, появление больших и сложных молекул без участия живых организмов в современных условиях почти исключено. Во-вторых, такие молекулы в современных условиях освещенности и температуры при современном составе атмосферы нестойки.

Если даже случится почти невероятное и такая органическая молекула образуется, она тут же будет разрушена процессами обычного или органического окисления (например, гниения). Поэтому крупные органические молекулы в наше время не могут существовать сами по себе, не будучи связаны с живыми организмами, или, точнее, не входя в их состав. Такие молекулы образуются за счет химических процессов в неживой природе, а если это изредка и происходит, то они тут же разлагаются. Между органическими и неорганическими соединениями сейчас существу-

ет непреодолимая бездна. До 1824 года, когда впервые был осуществлен синтез мочевины, вообще казалось, что никогда не удастся синтезировать в лаборатории органические молекулы — это считалось привилегией живых существ.

Это фундаментальное различие между неорганическими и органическими веществами сейчас стерто. Химики умеют синтезировать самые разные органические соединения. Можно сказать, что химик-органик имеет дело с соединениями, основанными на атомах углерода, а химик-неорганик — со всеми остальными. Однако так или иначе все эти новые соединения — органические, неорганические или принадлежащие к переходным группам, созданные искусственно (в лаборатории или на заводе), — тоже являются продуктами жизни — продуктами разума.

Нам надо как-то различать те соединения, которые создавались на заре геологической истории живыми существами, и те, что возникали без их участия. Для этого, мне кажется, надо вернуться к первоначальному смыслу терминов «органическое» и «неорганическое». Биологи-систематики всегда отдают предпочтение тому смыслу термина, который вложен в него его автором, т. е. первоначальному смыслу, и я думаю, что это единственно правильный подход. *Органическими* в таком случае мы будем называть соединения, созданные организмами. Это синоним терминов «бисгенные» и «биологически синтезированные». *Органические процессы* — процессы, идущие в живых организмах. *Неорганическими* мы называем соединения, созданные в процессах, идущих без участия живых существ. Такие процессы также надо называть неорганическими. Широко употребляемые синонимы — «абиогенные» и «абиологически синтезированные».

Для тех соединений, которые в настоящее время создаются живой природой, но когда-то, по-видимому, возникали неорганическим путем в условиях первичной бескислородной атмосферы, также применяется термин *органические*. Однако их можно было бы называть *псевдоорганическими*; по-моему, это благозвучный, особенно пригодный для лекций термин.

Но хватит семантики. Запомним, что в настоящее время органические соединения в природе могут продуцироваться только уже существующей живой материей. Значит, сейчас возникновение жизни неорганическим путем невозможно, так как только живая материя может синтезировать органические соединения. *Сейчас только живая материя может создавать другую живую матерю.*

## 5. СОВРЕМЕННАЯ КИСЛОРОДНАЯ АТМОСФЕРА

Итак, дело не в том, что природные органические соединения вообще не могут возникать без участия живых существ, а в том, что это невозможно в современных условиях. В связи с этим осо-

бенно важен тот факт, что наша современная атмосфера содержит значительное количество свободного кислорода, т. е. ее можно назвать *кислородной*.

Атмосферный кислород, а также свободный кислород, растворенный в гидросфере, вызывают уже упомянутые окислительные процессы, и любое органическое вещество, не защищенное, например, мембранами живых клеток, сразу же разрушается окислением. Кроме того, присутствие свободного кислорода в атмосфере делает возможным дыхание, один из важнейших жизненных процессов, свойственный животным и большинству растений. Вот почему кислород поэтически называют элементом, дающим жизнь. Наконец, кислород атмосферы защищает нас от ультрафиолетового солнечного излучения, умеряя его разрушительную силу. В гл. XV будет подробно рассказано о том, что свободный кислород образует в верхних слоях атмосферы тонкий озоновый слой и кислород вместе с озоном задерживают вредоносную часть ультрафиолетовой области спектра. Это очень важно, так как, хотя в умеренных дозах ультрафиолетовые лучи полезны, их полный спектр, не ослабленный озоновым экраном, как правило, более опасен для современной жизни, чем излучение, возникающее при естественном радиоактивном распаде.

В конечном счете из трех эффектов, вызываемых свободным кислородом (окисление и гниение, дыхание, экранирование от ультрафиолета), самым важным для земных организмов надо считать последний. Мы уже видели, что живые существа способны управлять потоками энергии, эффективно защищая свое органическое вещество от окисления и гниения, побеждающих лишь после смерти организма. Мы знаем также, что дыхание свойственно не всем организмам. Известны многообразные виды микробов с такими типами метаболизма, в которых свободный кислород не играет никакой роли. Для большинства из них он даже ядовит, а поскольку в атмосфере много свободного кислорода, такие микробы могут существовать лишь в изолированных от атмосферы биотопах, где они могут восстанавливать небольшие количества проникающего туда кислорода. Таким образом, сейчас на Земле есть существа, живущие и размножающиеся в отсутствие свободного кислорода. Практически это означает — в отсутствие воздуха, поэтому такие организмы называют *анаэробными* в противоположность *аэробным*, живущим в контакте с кислородом атмосферы и гидросферы.

Но для всех организмов смертельно опасно коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца, от которого они защищены сейчас озоном и кислородом. Значит, даже известные нам анаэробные организмы не могли бы выжить без присутствия свободного кислорода в атмосфере. В бескислородной атмосфере их метаболизм не был бы нарушен, но они не вынесли бы воздействия

ультрафиолетового солнечного излучения. На заре развития жизни примитивные организмы, сходные с теперешними анаэробами, могли существовать только под защитой слоя воды или горных пород, т. е. в озерах, океанах или между частицами почвы.

Невозможности спонтанного синтеза органических соединений в неорганических процессах в наши дни посвящены многие страницы книги французского биолога и философа Леконта дю Ньюи [12]. Но автор повторяет ошибку многих философов, занимавшихся вопросами естествознания: доказывая один тезис, они думают, что опровергают этим другой. Доказав, что самозарождение жизни в современных условиях невозможно, Леконт дю Ньюи считает, что опроверг тезис о естественном возникновении жизни и доказал ее божественное происхождение.

Благосклонность, с которой была встречена эта книга, во многом объясняется недоверием верующих к ученым, пытающимся опровергнуть учение о творце, о чем мы уже говорили в гл. I. И вот почтенный ученый, биолог, член французской Академии наук, доказывает с помощью данных науки, что жизнь могла возникнуть только в результате акта творения. На самом деле Леконт дю Ньюи доказал всего лишь, что в условиях современной атмосферы живое не может развиваться из неживого. Но ведь это не аргумент в пользу акта творения. Видимо, автор не имел понятия о том, что могло происходить в условиях бескислородной первичной атмосферы.

## 6. БЕСКИСЛОРОДНАЯ ПЕРВИЧНАЯ АТМОСФЕРА

Все современные теории происхождения жизни, теории, восходящие к идеям Опарина, постулируют существование ранней, или примитивной, атмосферы восстановительного характера, в которой не было или почти не было кислорода.

Видимо, на Земле в то время кислород присутствовал только в составе химических соединений, из которых самым важным, как полагают, была вода. Кроме воды, эта примитивная атмосфера (и связанная с ней гидросфера, т. е. океаны, озера и реки той эпохи) содержала углерод, азот, а также множество других элементов. Среди последних сера и фосфор могли служить катализаторами примитивных энергетических процессов. Основное и единственно важное отличие примитивной атмосферы от нашей — отсутствие значительных количеств свободного кислорода.

В табл. 3 приведены основные соединения, входившие, как полагают, в состав атмосферы, гидросферы и литосферы в то время [3]. Надо сказать, что мнения разных авторов о соотношении перечисленных в таблице компонентов сильно расходятся. Об этом мы поговорим в следующей главе.

Таблица 3

Основные компоненты атмосферы, гидросферы и литосферы в эпоху примитивной атмосферы [3]

Атмосфера	Гидросфера	Литосфера
CO <sub>2</sub> (или CH <sub>4</sub> ) N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O, вода NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> , песок AlSiO(OH)Fe(OH) <sub>2</sub> , глина
NH <sub>3</sub> H <sub>2</sub> S H <sub>2</sub> O } очень мало	H <sub>2</sub> S NaCl KCl KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> } в низких концентрациях	CaCO <sub>3</sub> , известняк неорганического происхождения

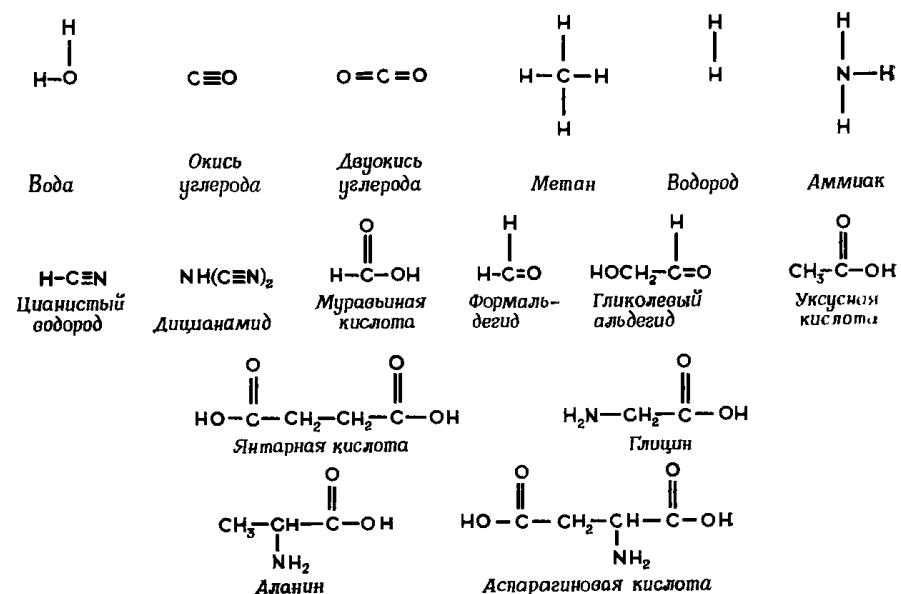
## 7. НЕОРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ «ОРГАНИЧЕСКИХ» СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПРИМИТИВНОЙ АТМОСФЕРЫ

Но нам не так уж важен точный состав примитивной атмосферы и гидросферы. Важно, что на Земле не было свободного кислорода и были сравнительно простые абиогенные соединения углерода с другими элементами, такими, как O, H, N, S, P и другие (фиг. 13). Сейчас такие соединения можно найти только в живых организмах или в продуктах их жизнедеятельности. Наряду с ними встречались и другие абиогенные соединения, такие, как CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, силикаты, сульфаты и т. д., — они и сейчас образуются абиогенным путем.

Соединения углерода дважды обязаны своим возникновением отсутствию свободного кислорода. Во-первых, только в условиях бескислородной атмосферы они и могли образоваться абиогенным способом, тогда как в современных условиях лишь процессы жизни дают необходимую для таких синтезов энергию. Во-вторых, только в бескислородных условиях они могли оставаться стабильными или хотя бы разрушаться медленнее, чем шел их синтез. Ведь в бескислородной атмосфере, как мы помним, не протекали процессы окисления и органического разложения.

Почему же простые «органические» соединения могли создаваться неорганическим путем? Дело в том, что тогда не было кислородно-озонового экрана, поглощающего самые коротковолновые ультрафиолетовые лучи Солнца. Эти лучи свободно проходили через бескислородную атмосферу и падали на поверхность Земли. Такое коротковолновое излучение несет очень большую энергию. Оно вызывало неорганические фотохимические реакции, невозможные теперь, под защитой озонового экрана. Коротковолновая часть ультрафиолетового излучения Солнца настолько богата энер-

гией, что она вынуждала элементы атмосферы и гидросферы образовывать химические связи, т. е. образовывать после поглощения световых квантов молекулярные соединения (фиг. 14). Конечно, это неорганический процесс, но, как мы увидим в гл. VI, он может давать начало типичным «органическим» молекулам. Поскольку



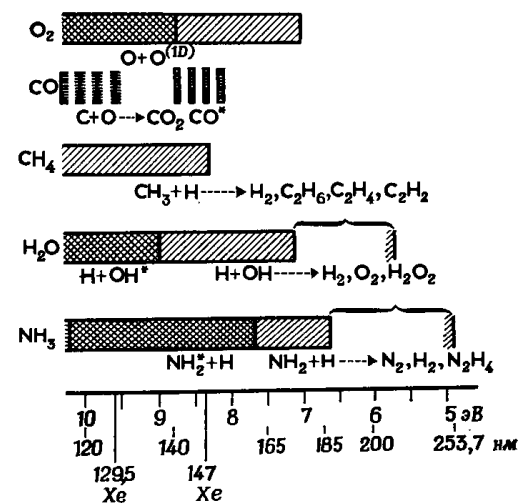
Фиг. 13. Строение малых молекул, которые неизбежно должны присутствовать в любой планетной примитивной атмосфере и гидросфере [6].

Объединяясь, они образуют более крупные «органические» молекулы, а те в свою очередь могут служить строительными блоками для еще более крупных молекул жизни (более подробно об этом — в гл. VI).

процесс этот основан на поглощении квантов света, идущих от Солнца, его можно назвать фотосинтезом. Но это *неорганический фотосинтез*. Не путайте его с органическим фотосинтезом, который протекает сейчас в растениях при участии хлорофилла. В органическом фотосинтезе используется главным образом энергия квантов красной части спектра. Она не так велика, и все же благодаря тому, что процесс разбит на множество последовательных стадий, растениям удается синтезировать те же органические соединения, которые создавались за счет энергии ультрафиолетового излучения без участия организмов. Каждая стадия реакции требует гораздо меньше энергии, чем весь процесс, поэтому растения могут использовать красную часть спектра, несущую гораздо меньше энергии, чем ультрафиолет.

Как уже говорилось, мы не знаем точного состава примитивной атмосферы. Точно так же мы не имеем ясного представления о

составе, количестве и концентрации простых соединений углерода с другими элементами, создававшихся за счет неорганических процессов в бескислородной атмосфере и на поверхности Земли. Многие ученые, особенно химики-органики [6], считают, что сре-



Фиг. 14. Фотохимические реакции, идущие в различных газах при облучении их светом с разной длиной волны.

Кислород поглощает ультрафиолетовые лучи с длиной волны 185 нм и менее. Энергия световых квантов этого участка спектра возрастает с 7 эВ (для 180 нм) до 10 эВ (для 120 нм). Свет этой области спектра активирует и другие газы —  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NH}_3$ , что показано столбиками с различной штриховкой. Звездочки, поставленные у некоторых радикалов, отмечают длину волны, при которой эти радикалы начинают светиться. Это их свойство не имеет значения для синтеза молекулярных соединений, но важно для определения данных радикалов в эксперименте. Пунктирными стрелками указаны участки спектра, в которых из атомов и радикалов образуются сложные молекулы. Две линии ксенона — 129,5 и 147 нм — указывают области строго монохроматического излучения ксеноновой лампы, которую Грот еще в 1938 году использовал в подобных экспериментах. Значит, наша современная атмосфера непрозрачна для тех длин волн, которые активируют простые устойчивые газообразные соединения, такие, как  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NH}_3$ . Следовательно, в современной атмосфере из этих газов не могут путем неорганического фотосинтеза образоваться более сложные соединения, так как наиболее коротковолновое солнечное излучение не достигает поверхности Земли. Но водород совершенно прозрачен для такого излучения, и поэтому в атмосфере, состоящей главным образом из водорода, оно беспрепятственно проникало бы до поверхности Земли.

ди них были такие реакционноспособные вещества, как цианистый водород (или синильная кислота), а также дицианамид и их производные. Гидросфера представляла собой смесь воды с этими веществами. Часто эту смесь изображают как нечто вроде «жидкого бульона», что избавляет от необходимости подробнее описать ее состав.

Нелегко подыскать подходящее название для жидкости, из которой состояла ранняя гидросфера. В ней содержались «органические» молекулы, созданные чисто неорганическими, или, если вам этот термин нравится больше, абиогенными, процессами. Эту жид-

кость часто сравнивают с бульоном потому, что малые «органические» молекулы, встречавшиеся в ней, служили пищей для развивавшейся жизни. Впрочем, некоторые авторы считают термин «бульон» чересчур обиходным и предпочитают говорить о «предбиологическом», «доббиологическом» или «питательном» бульоне. Опарин [20] использует термин «первичный бульон». Я думаю, что представление о «жидком бульоне» уже так широко распространено (в том числе и среди неспециалистов), что его можно использовать и в дальнейшем. Кавычки напоминают, что этот бульон был мало похож на обычный.

Его особенности мы рассмотрим позже. Философ Д. Гаукинс [10] назвал этот бульон «чем-то вроде водного Эдема» — ведь тогда в любой капле океана жизнь могла найти все необходимое на этой ранней стадии чисто химической эволюции.

Как мы увидим в гл. XVI, весьма вероятно, что химические реакции, приводящие к образованию «бульона», шли долгое время и после того, как на Земле возникла жизнь. На заре своего развития жизнь могла сосуществовать с преджизнью в течение примерно 2 млрд. лет, наслаждаясь изобилием этого первобытного рая. Тогда в пищу живому шли «органические» молекулы, синтезированные неорганическим путем.

## 8. GENERATIO SPONTANEA

В литературе для процесса неорганического фотосинтеза «органических» соединений используют иногда термин *generatio spontanea* — спонтанное зарождение, или самозарождение. Но этот термин долгое время употреблялся для обозначения любого непонятного способа возникновения живого. Иногда под спонтанным зарождением понимали акт творения, иногда же его, напротив, интерпретировали как нечто противоположное акту творения. Во всяком случае, сейчас, когда проблема происхождения жизни стоит в центре интенсивного научного исследования, лучше было бы совсем не пользоваться термином «самозарождение».

Здесь мы подходим к вопросу, было ли спонтанное зарождение единичным событием или оно многократно повторялось? Споры по этому вопросу имели место в эпоху философских спекуляций на гему происхождения жизни. Тогда обсуждался и такой вопрос: был ли акт творения единичным или он повторялся несколько и даже много раз? Существование органической эволюции уже было доказано тогда палеонтологами, и философы задавались вопросом, сколько актов творения понадобилось, чтобы жизнь дошла до ступени, с которой могла начаться ее самостоятельная естественная эволюция.

Со старым термином «самозарождение» мы привносим в обсуждение все эти старые словопреия, которые только запутают

нас. Возможно, выражение *неорганический синтез «органических» соединений* звучит слишком длинно, но оно точно отражает суть интересующего нас процесса<sup>1</sup>. Это понятие не отягощено грузом метафизики, и ему следует отдать предпочтение.

Рискуя надоесть читателю постоянными повторениями, я должен подчеркнуть еще раз, что в этих процессах нет ничего божественного, сверхъестественного, мистического, виталистского или хотя бы неестественного. Эти процессы начнутся неминуемо, как только возникнут необходимые для них физико-химические условия, что многократно доказано разнообразными экспериментами, описанными в гл. VI.

Чтобы уяснить себе обыденный характер этих процессов, надо помнить, что в основе своей они не отличаются от всех других неорганических процессов, в том числе и тех, что идут по сей день. Конечно, условия на первобытной Земле отличались от современных — отсюда и различие в продуктах реакций. Но природа процессов, образовавших эти продукты, ничуть не отличается, например, от природы процессов образования облаков, отложения кристаллов соли в лагунах, высыхающих на жарком солнце, или, скажем, процессов ржавления железа.

Ведь капли дождя, снежинки или градины «самозарождаются» в облаках, как только создаются необходимые физико-химические условия. Кристаллы гипса и каменной соли спонтанно выпадают на дно лагуны, если солнце достаточно сильно испаряет морскую воду. Железо ржавеет, если его не покрыть защитным слоем краски. У нас ведь не возникает вопроса, единожды ли «самозародились» капля дождя или кристаллик соли или этот процесс будет повторяться. Мы хорошо знаем, что капли и кристаллы будут появляться каждый раз, когда возникнут необходимые для этого условия среды. Поэтому нас больше интересует вопрос, каковы же эти условия. Более того, нам вовсе не нужно знать все факторы среды, зато факторы, от которых зависит ход данного процесса, интересуют нас в мельчайших подробностях. Скажем, влияние атмосферной пыли на конденсацию водяных капелек или влияние илистого дна лагуны на кристаллизацию солей, несомненно, важны для нас. Нам безразлично, будут ли возникать кристаллы и капли сто тысяч или сто тысяч и один раз; нам важно знать, при каких условиях и как они формируются. Крупные или мелкие будут получаться капли? Будут ли кристаллы гипса и каменной соли осаждаться в чистом виде или на дно выпадет смесь кристаллов этих солей? Таковы примерно вопросы, интересующие нас в отношении этих неорганических процессов.

<sup>1</sup> Этот синтез — первый шаг процесса, который Бернал [2] назвал *биогенезом* и который теперь часто называют *биогенезом* (гл. VII).



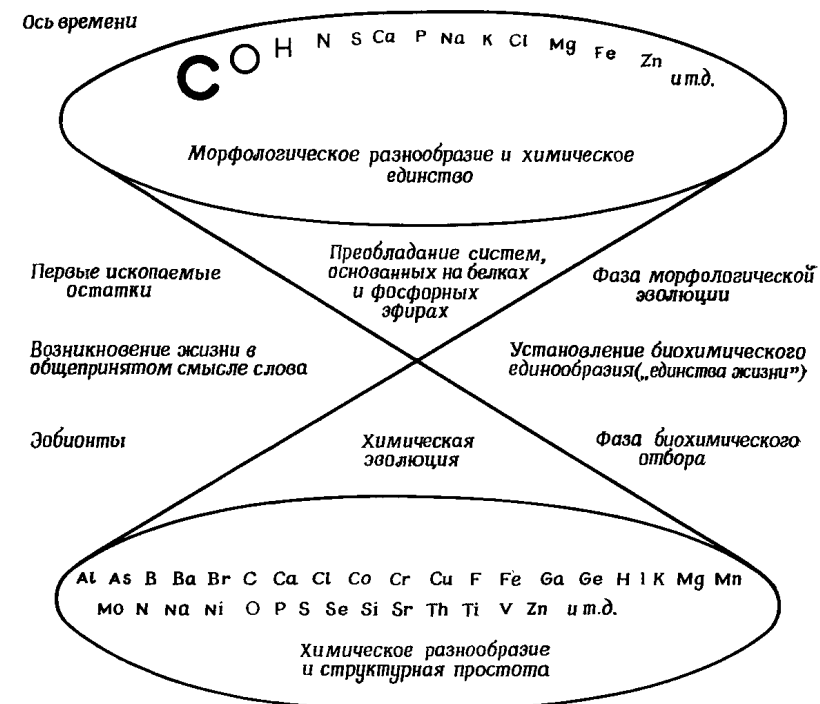
Продолжим сравнение: конечно, нам хотелось бы знать и дальнейшую судьбу продуктов, однажды образовавшихся в таком неорганическом процессе. Долго ли они просуществуют? Останутся ли они неизменными или будут реагировать с другими веществами? При изучении облаков нас интересует, превратятся ли снежинки или капли снова в водяной пар или упадут на землю. А может быть, на воду? Возьмем пример с лагуной: растворятся ли кристаллы солей во время очередного прилива? Или это произойдет только в период дождей или же после урагана, который нагонит воду в лагуну? А при каких условиях кристаллы могли бы покрыться слоем ила и сохраниться в осадочной породе надолго?

В общем нас интересуют физико-химические факторы, управляющие такими неорганическими процессами, факторы, приводящие к образованию тех или иных продуктов, зависимость физико-химических свойств продуктов от изменения условий и дальнейшая судьба продуктов реакции. Нас интересует также, какие условия среды благоприятствуют их сохранению или распаду. Во всяком случае, пока существуют подходящие условия, эти процессы будут повторяться не раз и не два, а многократно.

Вернемся теперь к проблеме происхождения жизни. Нам надо узнать, какие факторы управляли процессами, приведшими к накоплению «органических» веществ. Конечно, важен для нас вопрос, велик ли, очень велик или, напротив, очень мал был выход этих процессов. Но точные количественные данные нам не нужны. Впрочем, в последнее десятилетие наша область науки развивалась так бурно, что кроме этих основных вопросов возникли и другие. Нас уже интересуют не только возможность образования таких «органических» веществ, но и процессы, приводящие к концентрированию этих веществ, к их сохранению, их возможному разделению в соответствии с химическим составом, и, наконец, процессы перехода от такой преджизни к жизни, а также влияние изменения земной атмосферы на эти процессы. Итак, интересующие нас процессы в своей основе ничем не отличаются от других неорганических процессов. Более того, точно так же, как в случае капель дождя или кристаллов соли, продукты реакций и в дальнейшем подвержены действию процессов, принципиально сходных с процессами их образования. При изменении условий капли дождя могут вновь образовываться путем конденсации, причем между конденсацией и «самозарождением» нет принципиального различия, как и между испарением капель и их «самоисчезновением», даже если они не испарятся, а исчезнут, упав на землю или в воду. Единицы в своей основе и процессы, создававшие неорганическим путем в условиях примитивной атмосферы «органические» вещества, и процессы, разрушавшие или сохранявшие продукты реакций, и даже процессы, приводившие к дальнейшему развитию, — все они зависели от условий окружающей среды.

## 9. ХИМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ПРЕДЖИЗНИ И ХИМИЧЕСКОЕ ОДНООБРАЗИЕ ЖИЗНИ. СХЕМА ПИРИ

Кроме важнейших элементов, перечисленных в предыдущем разделе, в ранних процессах неорганического фотосинтеза могли участвовать и другие химические элементы. Современная жизнь обладает почти бесконечным морфологическим разнообразием,



Фиг. 15. Упрощенная схема возникновения и развития жизни на Земле по Пирри [21].

Нижний конус — ранние неорганические химические процессы преджизни. Они разнообразны по своей химии, но не имеют морфологического выражения. Верхний конус — развитие жизни, характеризующейся морфологическим разнообразием, основанным на ограниченном числе биохимических реакций. Об этом еще будет сказано подробнее в гл. XVIII.

основанным на небольшом наборе биохимических реакций. Напротив, ранние процессы неорганического фотосинтеза, вся эта *преджизнь*, видимо, обладали большим химическим разнообразием, но не были связаны с определенными морфологическими структурами.

Английский химик Пирри [21] отразил это различие в своей известной схеме (фиг. 15). В упрощенном виде эволюцию живого можно представить себе в виде двух конусов, напоминающих

песочные часы. Нижний конус — преджизнь с ее большим числом элементов, участвующих в неорганическом фотосинтезе и близких процессах, шедших в бескислородной атмосфере. Верхний конус — развитая жизнь, отличающаяся большим морфологическим разнообразием и основанная на небольшом наборе биохимических реакций. Как мы увидим в дальнейшем, жизнь возникла еще в бескислородной атмосфере, но полностью развилась лишь в присутствии свободного кислорода.

Много времени должно было пройти от первых реакций неорганического фотосинтеза, давших в итоге «первичный бульон», до появления чего-то схожего с живой материей. Продолжительность этого богатого событиями периода трудно оценить, да это, пожалуй, и не нужно. Не так уж важно знать, где в непрерывном процессе развития провести границу между неживым и живым, важнее помнить о резком различии между первичной и современной атмосферой и понимать, что жизнь, конечно же, существовала на Земле и во времена первичной атмосферы. Настоящая жизнь, от которой сохранились ископаемые остатки, существовала тогда с представителями преджизни, *зобионтами* (термин Пири), и тем самым с фотосинтетическими реакциями, которые приходится считать неорганическими.

Общее направление эволюции в тот ранний период — к более крупным и сложным молекулам, образующим «органические» вещества неорганического происхождения. Эти большие молекулы строились часто из более мелких одинаковых или сходных единиц. Такие молекулы называют полимерами; они обладают периодической структурой и состоят из цепей одинаковых или сходных субъединиц. Часто такие молекулы способны включать в себя новые субъединицы, сходные с уже имеющимися, т. е. они способны *расти*. Такому росту у некоторых типов молекул способствуют свойства субстрата, на котором они находятся. Этим субстратом, адсорбирующим «органические» молекулы, могли быть глины или кристаллы кварца — наиболее распространенные и сейчас на поверхности Земли минералы. В то время, видимо, часто встречались также сульфиды, например в форме пиритовых песков.

На следующем этапе некоторые из более крупных, «растущих» молекул могли стать более многочисленными, чем молекулы других типов. Но отсюда до возникновения «почти живых» соединений со специфическими реакциями обмена, способных к размножению, еще далеко. До этого эволюция должна была пройти еще много этапов. Все же, насколько мы знаем, с точки зрения и неорганической, и органической химии, такое развитие вполне возможно. В гл. VII мы обсудим некоторые из этих этапов.

## 10. ДОПОЛНЕНИЕ

После того как эта книга в рукописи была закончена, в Понт-а-Муссон (Франция) состоялась III Международная конференция по проблеме происхождения жизни, а в Льеже (Бельгия) — Международная конференция по биохимической эволюции. На этих конференциях обсуждалось современное положение проблем, освещенных в гл. VI и VII этой книги, но я не успел включить результаты конференций в рукопись. Интересующихся отсылаю к трудам конференций, опубликованным в двух томах под названием «Молекулярная эволюция» [5, 26]. Из классических экспериментов Миллера [14] выросло целое направление, изучающее возможные способы энергетического обмена, способы образования абиогенных соединений, последующей полимеризации и, наконец, биопоэза.

Из новых открытий кратко расскажу о результатах д-ра Ж. Тупанса из Парижа и проф. Дж. Мэтьюза из Чикаго (их доклады слушались на первой из конференций). Д-р Тупанс показал, что в бескислородных условиях количество энергии, требуемое для неорганического синтеза небольших «органических» молекул, на несколько порядков меньше, чем в присутствии кислорода. Вот еще одна причина того, почему эти «органические» соединения так легко образуются в экспериментах с моделированием бескислородной первичной атмосферы. С другой стороны, это открытие подчеркивает трудность абиогенного образования таких соединений в условиях современной атмосферы.

Проф. Мэтьюз занимается в основном химией HCN и его полимеров. Он показал, что в первичной атмосфере, содержащей HCN и NH<sub>3</sub>, на образование пептидов требуется гораздо меньше энергии, чем на образование аминокислот. Проф. Мэтьюз считает, что синтез пептидов — первичная реакция, а аминокислоты, обнаруживаемые в среде в опытах миллеровского типа, — всего лишь продукты распада первичных пептидов. Если это действительно так, то тогда легче себе представить, как могли синтезироваться пептиды и полипептиды. Таким образом, число стадий, необходимых для неорганического синтеза «строительных блоков» примитивной жизни, сильно сокращается.

### Список литературы

1. Bernal J. D., The Physical Basis of Life, Routledge and Paul, London, 80, 1951.
2. Bernal J. D., The scale of structural units in biopoiesis. In: Опарин А. И. (ред.), Origin of Life on the Earth, Pergamon, London, 385—399, 1959.

3. *Bernal J. D.*, Origin of life on the shores of the ocean. In: M. Sears (Editor), *Oceanography*, Am. Assoc. Advan. Sci., Washington, D. C., 95—118, 1961.
4. *Bryson V.*, *Vogel H. J.* (Editors), *Evolving Genes and Proteins*, Academic Press, New York, N. Y., 629, 1965.
5. *Buvet R.*, *Ponnamperuna C.* (Editors), *Molecular Evolution*, 1, North Holland, Amsterdam, 1971.
6. *Calvin M.*, Chemical evolution, *Proc. Roy. Soc. (London)*, Ser. A., 288, 441—466 (1965).
7. *Calvin M.*, *Chemical Evolution*, Clarendon, Oxford, 278 pp., 1969 (М. Кальвин, *Химическая эволюция*, изд-во «Мир», М., 1971).
8. *Fox S. W.* (Editor), *The Origin of Prebiological System*, Academic Press, New York, N. Y., 482, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», М., 1966).
9. *Grobstein C.*, *The Strategy of Life*, Freeman, San Francisco, Calif., 118, 1965 (К. Гробстайн, *Стратегия жизни*, изд-во «Мир», М., 1968).
10. *Hawkins D.*, *The Language of Nature*, Freeman, San Francisco, Calif., 372, 1964.
11. *Kluyver A. J.*, *Donker H. J. L.*, Die Einheit in der Biochemie. In: *Chemie der Zelle und Gewebe*, 13 (134) (also in. A. F. Kamp, J. W. M. La Riviere and W. Verhoeven, Albert Jan Kluyver, North-Holland, Amsterdam, 241—267, 1959), 1926.
12. *Lecompte du Noüy P.*, *Human Destiny*, Longmans, New York, N. Y., 289, 1947.
13. *Mamikunian G.*, *Briggs M. H.* (Editors), *Current Aspects of Exobiology*, Pergamon, London, 420, 1966.
14. *Miller S. L.*, Formation of organic compounds on the primitive earth. In: *Опарин А. И.* (ред.), *The Origin of Life on Earth*, Pergamon, London, 123—135, 1959.
15. *Needham A. E.*, *The Uniqueness of Biological Materials*, Pergamon, London, 593, 1965.
16. *Опарин А. И.*, *The Origin of Life*, 2nd ed., Dover, New York, N. Y., 270 pp., 1938.
17. *Опарин А. И.* (ред.), *The Origin of Life on Earth*, Pergamon, London, 436, 1959.
18. *Опарин А. И.*, *Life. Its Nature, Origin and Development*, Oliver and Boyd, Edinburgh, 207, 1961.
19. *Опарин А. И.* (ред.), *Эволюционная биохимия*, Материалы Пятого Международного биохимического конгресса (1961), Москва, 3, 1963.
20. *Опарин А. И.*, The chemical origin of life, *Am. Lecture Ser.*, Springfield, 558, 124, 1964.
21. *Pirie N. W.*, Chemical diversity and the origins of life. In: *Опарин А. И.* (ред.), *of Life on Earth*, Pergamon, London, 76—83, 1959.
22. *Pirie N. W.*, Pangloss or Plotinus, *Nature*, 209, 230 (1966).
23. *Pirie N. W.* (Editor), A discussion on anomalous aspects of biochemistry of possible significance in discussing the origins and distribution of life, *Proc. Roy. Soc. (London)*, Ser. B, 171, 1—89 (1968).
24. *Ponnamperuma C.*, *Gabel N. W.*, Prebiological synthesis of organic compounds. In: A. Renbaum and R. F. Landell (Editors), *Chemistry in Space Research*, 1969.
25. *Postgate J. R.*, Fringe biochemistry among microbes, *Proc. Roy. Soc. (London)*, Ser. B., 171, 67—76 (1968).
26. *Schoffeniels E.* (Editor), *Molecular Evolution*, 2, North-Holland, Amsterdam, 1971, in press.
27. *Теренин А. И.*, Photosynthesis in the shortest ultraviolet. In: *А. И. Опарин* (ред.), *Origine of life on Earth*, Pergamon, London, pp. 136—139, 1959.
28. *Vallentyne J. R.*, Why exobiology? In: G. Mamikunian and M. H. Briggs (Editors), *Current Aspects of Exobiology*, Pergamon, London, pp. 1—12, 1965.
29. *Winkler K. C.*, *Virus Mirabile, Leven en Dood*, Bohn, Haarlem, pp. 86—99, 1960.

## ТОЧКА ЗРЕНИЯ АСТРОНОМА

Таблица 4

Атмосферы планет [13]

Планета	Соединение	Наличие	Количество, см·атм (при нормальных условиях)	На чем основана оценка
Меркурий	—	—	—	—
	CO <sub>2</sub>	Да	10 <sup>5</sup>	По данным спектроскопии
	H <sub>2</sub> O	»	Океаны	По поляризации облаков
Венера	N <sub>2</sub>	»	?	По данным спектроскопии
	CO	»	< 100	То же
	CO <sub>2</sub>	»	3600	» »
Марс	H <sub>2</sub> O	»	?	По поляризации облаков
	N <sub>2</sub>	Нет	1,8 · 10 <sup>5</sup>	По полному давлению
	CH <sub>4</sub>	Да	1,5 · 10 <sup>4</sup>	По данным спектроскопии
Юпитер	NH <sub>3</sub>	»	700	То же
	H <sub>2</sub>	Нет	2,7 · 10 <sup>7</sup>	По плотности планеты
	He	»	5,6 · 10 <sup>6</sup>	
N <sub>2</sub>	»	4 · 10 <sup>3</sup>		
Сатурн	Ne	»	1,7 · 10 <sup>4</sup>	По данным спектроскопии
	CH <sub>4</sub>	Да	35 000	
	NH <sub>3</sub>	»	200	
Уран	H <sub>2</sub>	Нет	6,3 · 10 <sup>7</sup>	По плотности планеты
	He	»	1,3 · 10 <sup>7</sup>	
	N <sub>2</sub>	»	9,5 · 10 <sup>3</sup>	
Нептун	Ne	»	2,7 · 10 <sup>4</sup>	По данным спектроскопии
	CH <sub>4</sub>	Да	2,2 · 10 <sup>5</sup>	
	H <sub>2</sub>	»	9 · 10 <sup>6</sup>	
Титан	He	Нет	2,7 · 10 <sup>7</sup>	Рассчитано по Герцбергу
	H <sub>2</sub>	Да	4,2 · 10 <sup>6</sup>	
	He	Нет	8,6 · 10 <sup>5</sup>	
Юри [13]	N <sub>2</sub>	»	4,2 · 10 <sup>6</sup>	Рассчитано по Юри [13]
	CH <sub>4</sub>	Да	3,7 · 10 <sup>6</sup>	
	H <sub>2</sub>	»	Больше, чем на Уране	
Юри [13]	He	»	Уране	По данным спектроскопии
	CH <sub>4</sub>	Да	2 · 10 <sup>4</sup>	
Юри [13]	He	Нет	2 · 10 <sup>4</sup>	» »

## 1. ДАННЫЕ АСТРОНОМИИ

После вводных глав, в которых обсуждаются общие аспекты геологии и биологии, важные в связи с проблемой происхождения жизни, логично поместить главу, в которой следует кратко рассмотреть некоторые аспекты астрономии, имеющие отношение к нашему предмету. Сюда можно включить и некоторые сведения о событиях, происходивших на Земле в эпоху, переходную между астрономической и геологической историей нашей планеты. Это время, прошедшее от формирования Земли как астрономического тела до образования твердой коры, в которой могут храниться данные геологической летописи. Эта глава будет короткой, так как, хотя основные результаты современной астрономии оказали большое и благотворное влияние на развитие наших взглядов относительно возможности возникновения жизни естественным путем, все же подробности, касающиеся, скажем, состава планетных атмосфер или межзвездного газа, не слишком нас интересуют.

Как сказано уже в гл. I, признание биологами того, что абиогенное возникновение жизни, т. е. ее появление без помощи предсуществовавшей жизни, возможно лишь в восстановительной среде, более или менее совпало с развитием взглядов астрономов, которые поняли, что если не вся Вселенная, то, во всяком случае, газы, входящие в состав комет, и планетные атмосферы обычно обладают восстановительными свойствами.

Наши знания о составе планетных атмосфер и межзвездного газа основаны главным образом на данных спектроскопии, расшифровывающей линии испускания и поглощения, характерные для атомов и молекул. Уже в начале двадцатых годов нашего века спектроскоп позволил обнаружить в газовых оболочках планет и комет различные соединения водорода и углерода. Но лишь после классических работ Г. Юри [12, 13] стало ясно, что все эти внеземные газы фундаментально отличаются от нашей земной атмосферы. Юри, химик по образованию, был первым астрономом, попытавшимся сопоставить данные спектрального анализа и термодинамические уравнения, которые описывают совместное существование атомов и молекул, обнаруженных с помощью спектрального анализа в газах. Целью этой попытки было приблизиться к пониманию происхождения Солнечной системы.

В табл. 4 перечислены соединения, входящие или могущие входить в состав планетных атмосфер. Как мы видим, чаще всего обнаруживаются С, Н и N в виде элементов или простых соединений. Кислород встречается только в соединениях; наиболее обычны из них вода (H<sub>2</sub>O) и двуокись углерода (CO<sub>2</sub>). Свободного кислорода в атмосферах планет, видимо, нет, в противоположность земной атмосфере, где он составляет около 21% (табл. 5).

Хотя это не имеет прямого отношения к проблеме происхождения жизни на Земле, напомним, что существуют известные разли-

чия между так называемыми планетами земной группы и большими планетами (табл. 6). Первые ближе к Солнцу; они, кроме того, меньше и плотнее планет-гигантов. Считается, что их высокая

Таблица 5

## Постоянные компоненты современной атмосферы Земли [13]

Компонент	Содержание	Реакционная способность	Самопроизвольные реакции
N <sub>2</sub>	78,084%	Инертен	Медленно реагирует с FeO и соединениями углерода
O <sub>2</sub>	20,946%	Активен	
CO <sub>2</sub>	0,033%	»	Медленно реагирует с силикатами
Ar	0,934%	Инертен	2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> = 2H <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O 2N <sub>2</sub> O = 2N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Ne	18,18·10 <sup>-6</sup>	»	
He <sup>4</sup>	5,24·10 <sup>-6</sup>	»	
He <sup>3</sup>	6,55·10 <sup>-12</sup>	»	
Kr	1,14·10 <sup>-6</sup>	»	
Xe	0,087·10 <sup>-6</sup>	»	
H <sub>2</sub>	0,5·10 <sup>-6</sup>	Активен	
CH <sub>4</sub>	2·10 <sup>-6</sup>	»	
N <sub>2</sub> O	0,5·10 <sup>-6</sup>	»	

Таблица 6

## Физические свойства планет Солнечной системы [9]

Планета	Масса (масса Земли принята за 1)	Радиус (радиус Земли принят за 1)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	
Меркурий	0,0543	0,383	5,33	Планеты земной группы
Венера	0,8136	0,9551	5,15	
Земля <sup>1</sup>	1,0000	1,000	5,52	
(Луна)	0,0123	0,273	3,33	
Марс	0,1069	0,528	4,00	
Астероиды (хондриты)	≤0,00013	≤0,058	~3,5	Малые планеты
Юпитер	318,35	10,97	1,35	Большие планеты
Сатурн	95,3	9,03	0,71	
Уран	14,54	3,72	1,56	
Нептун	17,2	3,38	2,47	
Плутон	0,033?	0,45	2?	

<sup>1</sup> Масса Земли = 5,975·10<sup>27</sup> г; средний радиус = 6371,2 км.

плотность непосредственно связана с близостью к Солнцу: здесь первоначальное пылевое облако было горячее и наиболее летучие его компоненты, такие, как H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>O, оставались главным образом в газообразном состоянии; поэтому планеты земной группы сформировались в основном из окислов металлов, содержащихся в первичной пыли. По мере аккреции эти окислы восстанавливались. Планеты-гиганты по составу больше похожи на Солнце, в них присутствуют в основном перечисленные выше летучие компоненты. Впрочем, различия между планетами не так уж велики: как мы знаем, этих летучих веществ немало и в составе Земли. Во время конденсации планет земной группы часть летучих веществ могла находиться в жидком состоянии и таким образом вошла в состав планет.

## 2. ПЕРВИЧНАЯ И ВТОРИЧНАЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Итак, космическая среда и планетные атмосферы имеют восстановительный характер. Как мы уже видели, это открытие оказало важное влияние на разработку теории возникновения жизни в восстановительной, т. е. бескислородной, среде. Данные астрономии показали, что наша кислородная атмосфера — исключение, во всяком случае для Солнечной системы, а скорее всего и для всей Вселенной. Поэтому идея о возникновении жизни в примитивной, бескислородной атмосфере, сходной по составу с атмосферами других планет или с межзвездным газом (или и с тем, и с другим), была воспринята как вполне естественная. Одним из первых эту идею выдвинул Бернал [2], чье представление о примитивной атмосфере ясно из сказанного выше (табл. 3).

Однако на деле все было не так просто. История Земли вплоть до того момента, когда Земля стала «законченной» планетой, чьи горные породы могут рассказать кое-что о дальнейшем ходе событий, темна и запутанна. Сейчас ученые много спорят о последовательности событий, приведших к формированию Земли. Но нас не должны особенно интересовать все аргументы за и против, поскольку и насчет самих этих событий еще нет единодушного мнения. В качестве примера предложенных вариантов возникновения Земли приведем здесь схему Юри [14].

1. Вскоре после возникновения Солнца вокруг него, в современной плоскости эклиптики, тем или иным путем образовалась туманность.

2. В околосолнечной туманности сформировались из нелетучей фракции межзвездного вещества тела размерами примерно с Луну. Эти тела разогрелись до высокой температуры и приобрели свойства железо-никелевых фаз ахондритных метеоритов (гл. XVII).

3. Около 4,5 млрд. лет назад эти тела, по крайней мере те из

них, которые находились в зоне образования метеоритов, раздробились на более мелкие фрагменты.

4. Можно думать, что в зоне планет земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) формировались «луноподобные» тела, которые затем раздробились. Зона планет земной группы селективно теряла силикатную фракцию; вот почему в составе этих планет много железа. Различия в их плотности объясняются разной степенью потери кремнезема.

5. Газы улетучились из области планет земной группы. Твердые вещества здесь были охлаждены.

6. Твердые тела концентрировались, так что образовывались планеты земной группы. Это происходило так медленно, что общая их температура оставалась невысокой. Вполне возможно, что планеты за всю свою историю никогда не достигали полностью расплавленного состояния.

7—10. Указаны еще четыре стадии, но они не особенно важны для истории Земли.

Нас с вами должны особенно интересовать стадии 2, 4, 5 и 6. Хотя о событиях каждой стадии и о последовательности стадий еще идут споры, мы можем принять к сведению общий вывод: Земля образовалась путем аккреции межзвездного вещества<sup>1</sup> при сравнительно низких (во всяком случае, с точки зрения астронома) температурах. Все же эти температуры были достаточно высоки для того, чтобы Земля потеряла имевшиеся вначале газы и часть легких твердых веществ. Тогда Земля разогревалась за счет гравитационной энергии, переходившей при столкновениях собиравшихся частиц в тепловую. Одна из неясностей (пункт 6 схемы Юри): была ли Земля в это время расплавленной или она оставалась докрасна раскаленным более или менее твердым шаром?

Правда, последний вопрос имеет скорее академический интерес для нашей проблемы. Понятно, что если бы жизнь даже и существовала раньше, она не вынесла бы сильного повышения температуры в период аккреции. Таким образом, устаревшее убеждение, что Земля населена искони, совершенно отпадает. Жизнь должна была появиться на ней, во всяком случае, после шестой стадии, указанной в нашей схеме, так как ничто живое не могло бы вынести такого нагрева.

Все согласны, что самая первая атмосфера Земли была утрачена (пункт 5). После охлаждения сформировавшейся Земли наша планета еще не имела заметной атмосферы. Новая атмосфера создавалась постепенно. Земля выделяла газы (этот процесс еще

<sup>1</sup> Существуют и полностью противоположные гипотезы, принимающие что Земля образовалась из вещества Солнца [5, 10]. В них есть привлекательные для геолога стороны; в частности, с их помощью гораздо легче объяснить химический состав земной коры и дифференциацию магмы. Но астрономы, кажется, не принимают этих гипотез.

продолжается: газы из Земли выделяются, например, при вулканических извержениях, а также выносятся гейзерами и сальфатарами<sup>1</sup>), и в результате образовалась вторичная атмосфера. В то время могла еще продолжаться аккреция — вещество межзвездного пространства выпадало на Землю в форме метеоритов и космической пыли.

Итак, еще в ходе догеологической, астрономической своей истории Земля потеряла раннюю первичную атмосферу. Современная атмосфера образовалась гораздо позже. С астрономической точки зрения она вторична, но поскольку жизнь на Земле появилась в геологический период, нас интересуют только атмосферы, сменившиеся за это время. Поэтому «астрономически вторичную» атмосферу Земли мы делим, с геологической точки зрения, на первичную, бескислородную, и современную кислородную.

### 3. РАЗЛИЧИЯ В СОСТАВЕ МЕЖДУ ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ АТМОСФЕРАМИ ЗЕМЛИ

Один из главных аргументов, свидетельствующих о потере первичной атмосферы, — то, что на Земле благородные газы гораздо менее распространены, чем в космосе (см. табл. 5 и 7). Когда молодая Земля теряла свои летучие компоненты, легче удерживались те из них, которые могли вступить в соединение с другими элементами, образуя более тяжелые стабильные молекулы. Напротив, благородные газы, с большим трудом реагирующие с другими веществами и не образующие более тяжелых молекул с ними, терялись в первую очередь. Сейчас их на Земле очень мало.

Более того, есть и другое глубокое различие в составе первичной и вторичной атмосфер. Состав первичной атмосферы определялся главным образом составом межзвездного вещества и нагреванием при аккреции. Состав же вторичной атмосферы (точнее, первичной бескислородной атмосферы) зависел от других обстоятельств. Из них главное то, 1) какие летучие компоненты остались на Земле, потерявшей первичную атмосферу, в виде тяжелых соединений; 2) как эти соединения разлагались в период обезгаживания, в результате чего постепенно формировалась вторичная атмосфера; 3) каковы были термодинамические отношения между выделившимися газами на примитивной стадии вторичной атмосферы.

Ясно, что установить состав вторичной атмосферы на ее примитивной, бескислородной стадии нелегко. Пример такой попытки — расчеты Эйбелсона [1] — ясно показывает, как много неизвестных в решаемом уравнении. Прежде всего используются гло-

<sup>1</sup> Сальфатары — струи горячих (100—200°С) вулканических газов, выделяющиеся из трещин в вулканическом конусе. — *Прим. перев.*

Таблица 7

Нехватка некоторых элементов в веществе Земли<sup>1</sup> [7]

Элемент	Число атомов на 10 000 атомов Si		Коэффициент нехватки ( $\log b/a$ )
	Земля в целом (a)	Солнечная система (b)	
H	250	$2,6 \cdot 10^8$	6,0
He	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^7$	13,8
C	14	135 000	4,0
N	0,21	24 400	5,1
O	35 000	236 000	0,8
Ne	$1,2 \cdot 10^{-4}$	23 000	10,3
Na	460	632	~0
Mg	8 900	10 500	~0
Al	940	851	~0
Si	10 000	10 000	0
<sup>36</sup> Ar	$5,9 \cdot 10^{-4}$	2 280	6,6
Kr	$6 \cdot 10^{-8}$	0,69	7,1
Xe	$5 \cdot 10^{-9}$	0,07	7,1

<sup>1</sup> Нехватка водорода и (частично) сильная нехватка гелия могут объясняться обезгаживанием. Остальная часть дефицита гелия, как и других благородных газов — Ne, <sup>36</sup>Ar (но не <sup>40</sup>Ar, который представляет собой радиогенный изотоп, продукт распада <sup>40</sup>K) Kr и Xe, — объясняется потерей первичной атмосферы.

бальные данные геохимии, а они, как мы увидим в гл. XIV (разд. 4 и 5), не особенно достоверны. Все же для нашей проблемы эти подробности тоже не так уж важны. Например, неважно, чего было больше в примитивной атмосфере — CO или CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> или HCN. Ведь, как мы узнаем из следующей главы, неорганический синтез «органических» соединений с равным успехом идет в атмосфере, содержащей, скажем, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, N и H<sub>2</sub>, и в атмосфере, состоящей из H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>. Если в среде присутствуют соединения H, C, O и N вместе с P, S и некоторыми другими элементами, то материал для неорганического синтеза «органических» веществ обеспечен. Пока в атмосфере нет кислорода, энергию для синтезов доставляют кванты жесткого солнечного ультрафиолетового излучения.

Итак, хотя состав вторичной атмосферы Земли (вернее первичной бескислородной) представляет весьма интересный объект исследования (см. работы [6, 7, 8]), он не имеет прямого отношения к происхождению жизни. Главное условие — чтобы атмосфера была бескислородной. В остальном ее состав может варьировать без ущерба для неорганического синтеза «органических» соединений.

Подведем итог. Во-первых, нас интересует только та земная атмосфера, которую астрономы называют вторичной. Во-вторых,

состав этой атмосферы на ее первичной стадии определялся составом Земли, а не межзвездного вещества. Главное различие между примитивной стадией вторичной атмосферы и ее современным состоянием заключается в том, что примитивная атмосфера была бескислородной. Об этом мы еще поговорим в гл. XV.

## Список литературы

1. *Abelson Ph. H.*, Chemical events on the primitive earth, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 55, 1365—1372 (1966).
2. *Bernal J. D.*, Origin of life on the shores of the ocean. In: M. Sears (Editor), Oceanography, Am. Assoc. Advan. Sci., Washington, D. C., pp. 95—118, 1961.
3. *Cameron A. G. W.*, Planetary atmospheres and the origin of the moon. In: B. G. Marsden and A. G. W. Cameron (Editors), The Earth-Moon System, Plenum, New York, N. Y., pp. 234—237, 1966.
4. *Hayatsu R., Studier M. H., Oda A., Fuse K., Anders E.*, Origin of organic matter in early solar system. II. Nitrogen compounds, Geochim. Cosmochim. Acta, 32, 175—190 (1968).
5. *Kuhn W., Rittmann A.*, Über den Zustand des Erdinnern und seine Entstehung aus einem homogenen Zustand, Geol. Rundschau, 32, 215—256 (1941).
6. *McGovern W. E.*, The primitive earth: Thermal models of the upper atmosphere for a methane dominated environment, J. Atmospheric Sci., 26, 623—635 (1969).
7. *Rasool S. I.*, Evolution of the earth's atmosphere, Science, 157, 1466—1467 (1967).
8. *Rasool S. I., McGovern W. E.*, Primitive atmosphere of the earth, Nature, 212, 1225—1226 (1966).
9. *Ringwood A. E.*, Chemical evolution of the terrestrial planets, Geochim. Cosmochim. Acta, 30, 41—104 (1966).
10. *Rittmann A.*, Die Bimodalität des Vulkanismus und die Herkunft der Magmen, Geol. Rundschau, 57, 277—295 (1967).
11. *Studier M. H., Hayatsu R., Anders E.*, Origin of organic matter in early solar system. I. Hydrocarbons, Geochim. Cosmochim. Acta, 32, 151—174 (1968).
12. *Urey H. C.*, The Planets, Yale Univ. Press, New Haven, Conn., 425 pp. 1952.
13. *Urey H. C.*, The atmospheres of the planets. In: Handbuch der Physik, Springer, Berlin, 52, 363—418 (1959).
14. *Urey H. C.*, Evidence regarding the origin of the earth, Geochim. Cosmochim. Acta, 26, 1—14 (1962).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Из предыдущих глав мы узнали, что в первичной бескислородной атмосфере теоретически возможен синтез «органических» молекул за счет энергии коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца, энергии электрических разрядов или за счет других источников энергии. Теперь эта возможность неопровержимо доказана экспериментами. Многие исследователи (и число их все растет), используя самые разные виды энергии, получили *in vitro* самые разнообразные «органические» вещества. Во всех этих опытах моделировались условия бескислородной атмосферы.

В литературе, цитируемой в этой главе, можно найти множество названий «органических» соединений, синтезированных таким способом. Я не специалист в этой области, и мне всегда трудно было вспоминать, какие вещества стоят за этими названиями, так часто употребляемыми в биохимической литературе. Нам понадобятся некоторые из этих формул, чтобы мы смогли уследить за удивительно быстрым развитием экспериментального подхода к проблеме происхождения жизни. Поэтому в начале главы дается список наиболее употребительных названий и формул. Это поможет читателю-неспециалисту.

Кроме рассказа о наиболее поразительных синтезах, проведенных до сих пор, мне показалось полезным включить в эту главу описание некоторых новейших методов анализа, позволивших точно определять состав продуктов синтеза, т. е. не только их общую молекулярную массу и химические свойства, но и тонкое строение молекул. В последние десятилетия аналитические методы развивались очень быстро. Без этого мы были бы не в состоянии идентифицировать соединения, образующиеся в экспериментах по синтезу.

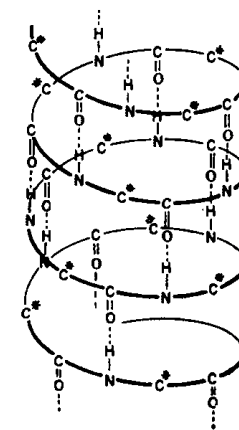
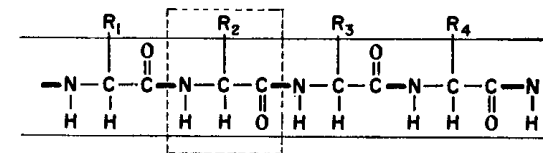
Итак, в этой главе содержится, во-первых, расшифровка самых важных для нас химических формул, во-вторых, описание основных опытов, проведенных для проверки теории возникновения жизни естественным путем, и, в-третьих, обсуждение некоторых применяющихся в этих опытах аналитических методов. Если читателя интересует лишь общий очерк состояния проблемы, он может без ущерба пропустить эту главу, возможно, слишком специальную по своему содержанию. Он может поверить мне на слово,

что эксперименты подтверждают теорию (вспомним слова Дж. Буханана, кратко обрисовавшего положение дел в этой области, — они цитировались в начале гл. IV).

Гораздо более подробное рассмотрение вопроса можно найти в статье Поннамперумы и Гейбела [32] и в последней книге проф. Кальвина [4].

## 2. НЕКОТОРЫЕ ФОРМУЛЫ

Прежде чем идти дальше, надо обсудить некоторые важные для нас химические формулы. Читатель, желающий получить более подробную информацию, может заглянуть в учебники, например [17], или в «Молекулярную биологию» Хаггиса и др. [20].



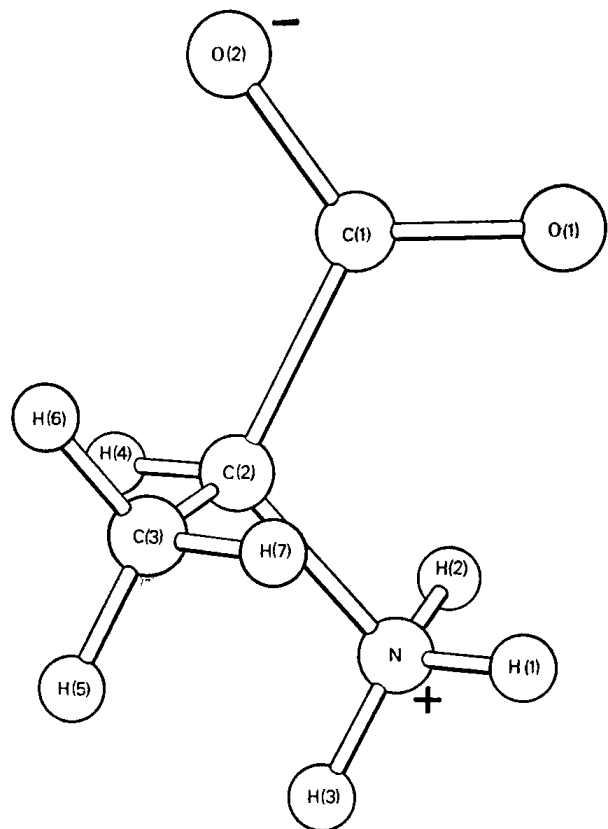
Фиг. 16. Схема строения белка.

Вверху — цепь полимеризованных аминокислотных строительных блоков; все блоки различаются по составу, следовательно, здесь изображен гетерополимер. Внизу — структурная модель такой полипептидной цепи. Водородные связи (пунктирные линии между атомами Н и О разных витков) заставляют цепь свертываться в спираль. Диаметр и шаг спирали определяются природой радикалов  $R_1$ — $R_4$  полипептидной цепи [3].

Среди групп соединений, существенно важных для современных организмов, надо выделить белки, полисахариды, липиды и нуклеиновые кислоты. Поскольку в большинстве проводившихся экспериментов особое внимание уделялось белкам и нуклеиновым кислотам, мы должны познакомиться с этими соединениями. Бел-



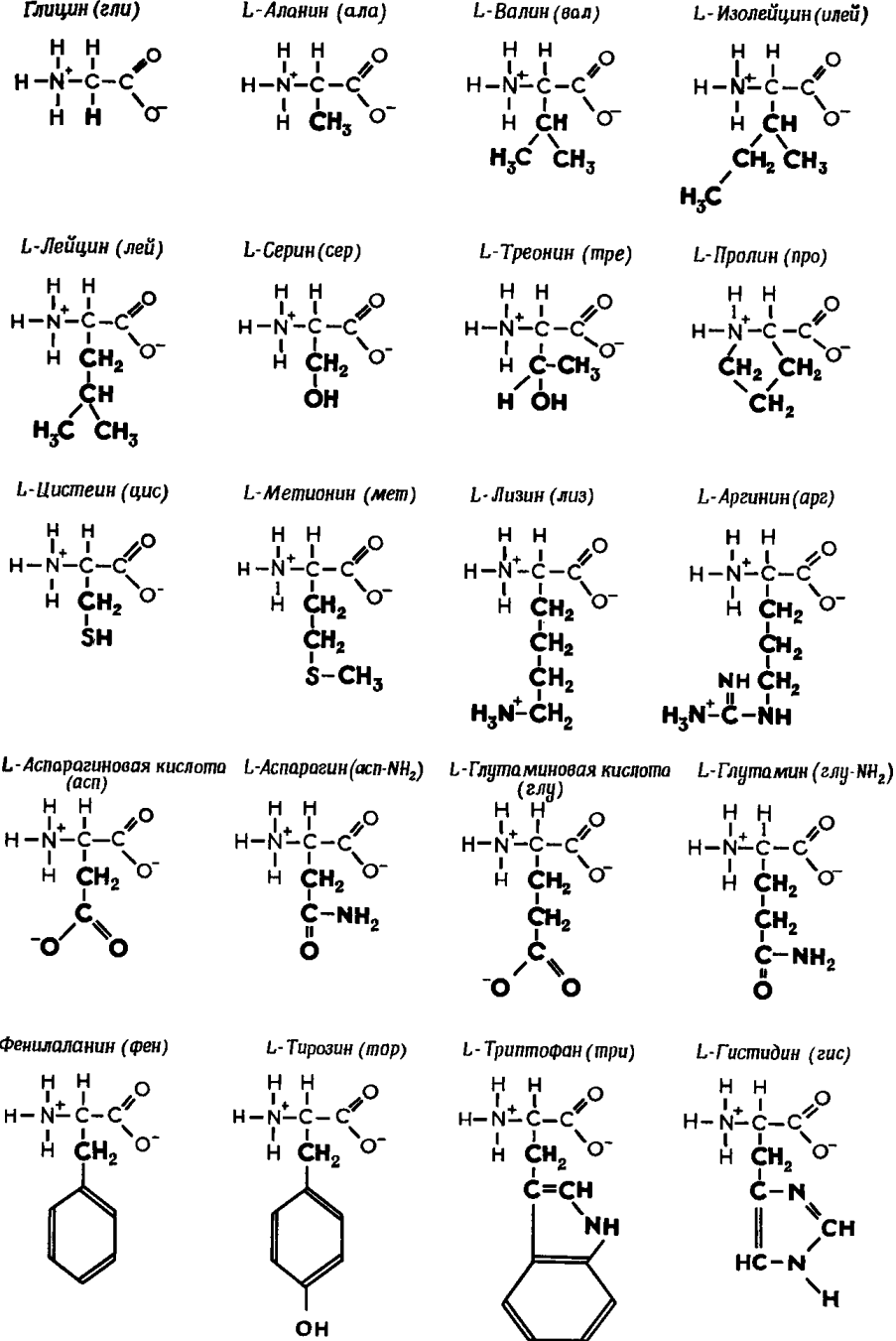
ки, полисахариды, липиды и другие подобные соединения «работают» в повседневных жизненных процессах, а нуклеиновые кислоты управляют процессами воспроизведения и пополнения, обеспечивая создание новых молекул. Нуклеиновые кислоты несут



Фиг. 17. Трехмерное изображение молекулы аминокислоты L-аланина [2].

генетическую информацию. Благодаря ей новые молекулы в точности похожи на те, которым требуется замена или пополнение. Кроме этих двух групп соединений, существуют и другие типы молекул, выполняющие особые функции. Примером могут служить гем и хлорофилл (фиг. 41) — важнейшие соединения, обслуживающие дыхание и фотосинтез соответственно.

Все белки состоят из большого числа строительных блоков — молекул аминокислот. Обычно в составе природных белков встречается около 20 различных аминокислот. Отдельные их молекулы соединяются в цепи, образуя так называемые *полипептиды*

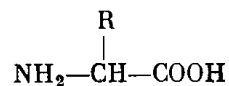


Фиг. 18. Двадцать аминокислот, входящих в состав белков [2].

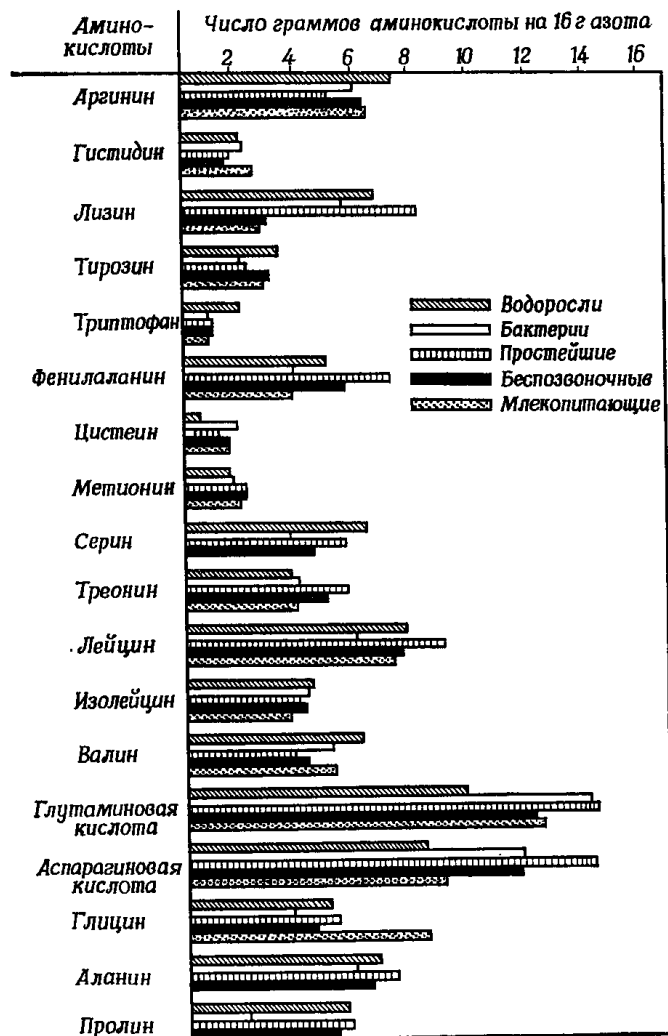
Кроме этих, в современных белках встречаются и некоторые другие, менее распространенные аминокислоты. Очевидно, во времена неорганического фотосинтеза вполне могли возникать многие другие, сходно построенные аминокислоты. В период возникновения предбиологических систем, конечно, создавались самые разнообразные аминокислоты. По тем или иным причинам в ходе дальнейшего развития они постепенно «вымерли». Не исключено, что некоторые малораспространенные сейчас аминокислоты раньше встречались гораздо чаще, а то и были преобладающими. Все обычные аминокислоты и большинство редких являются левовращающими, т. е. вращают плоскость проходящего через них поляризованного света влево. Но некоторые менее распространенные аминокислоты являются правовращающими.

(фиг. 16). Некоторые белки состоят из нескольких полипептидных цепей, объединенных друг с другом в одну молекулу.

Все аминокислоты (фиг 17) имеют весьма простую общую формулу



где R (радикал) — та или иная из различных органических групп. Главные аминокислоты, входящие в состав белков, перечислены на

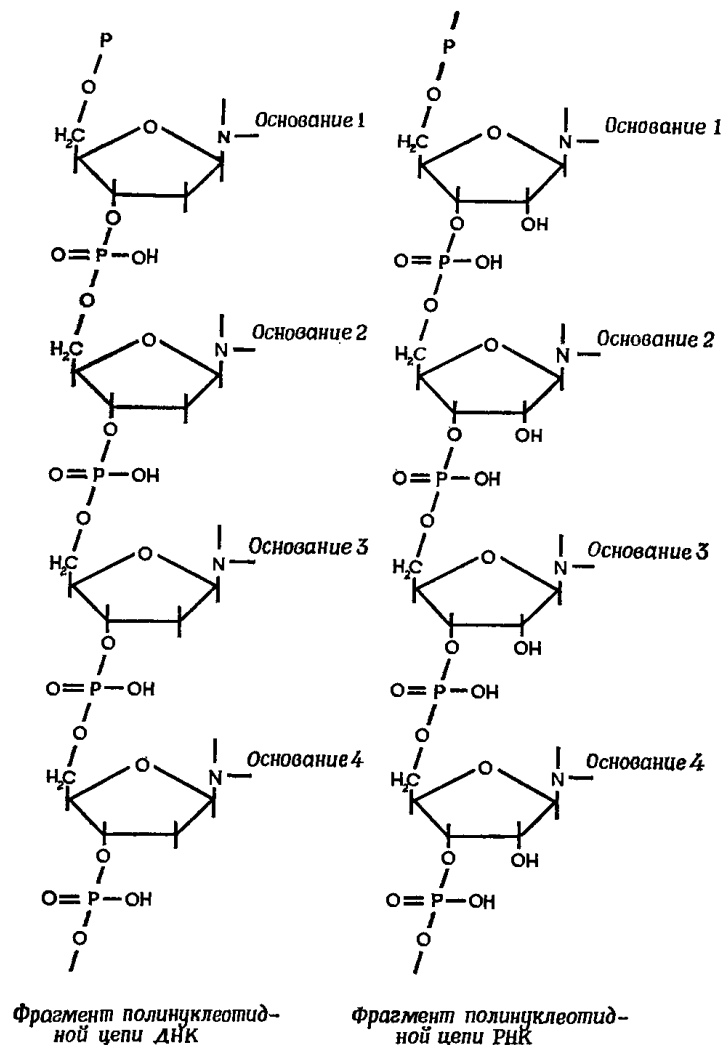


Фиг. 19. Распределение 18 из 20 обычных аминокислот в главных группах современных организмов [44].

В наше время наиболее распространены глутаминовая и аспарагиновая кислоты.

фиг 18. Их распределение в основных группах современных организмов отражено на фиг. 19.

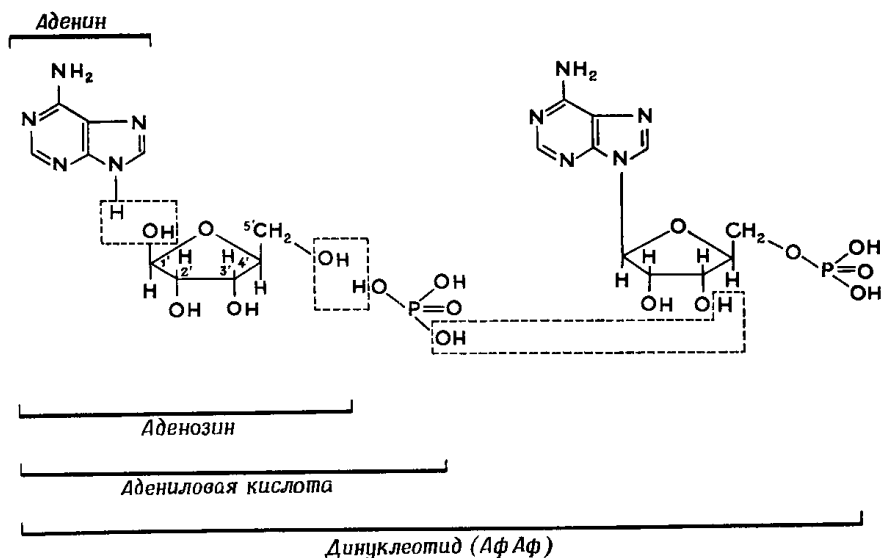
**Нуклеиновые кислоты** представлены двумя главными типами молекул. *Дезоксирибонуклеиновая кислота*, всегда именуемая



Фиг. 20. Строение полинуклеотидов ДНК и РНК.

кратко ДНК, находится в ядрах клеток, а *рибонуклеиновая кислота* (РНК) в основном находится вне ядра, в цитоплазме. Лишь у некоторых простых организмов вроде вирусов имеется только одна нуклеиновая кислота — РНК или ДНК.

Молекулы нуклеиновых кислот состоят из двух длинных цепей<sup>1</sup>, закрученных одна вокруг другой, так что получается спиральная структура — так называемая *двойная спираль*. Каждая цепь построена из сходных блоков — *нуклеотидов*. Итак, каждая цепь представляет собой полинуклеотидную структуру. Каждый



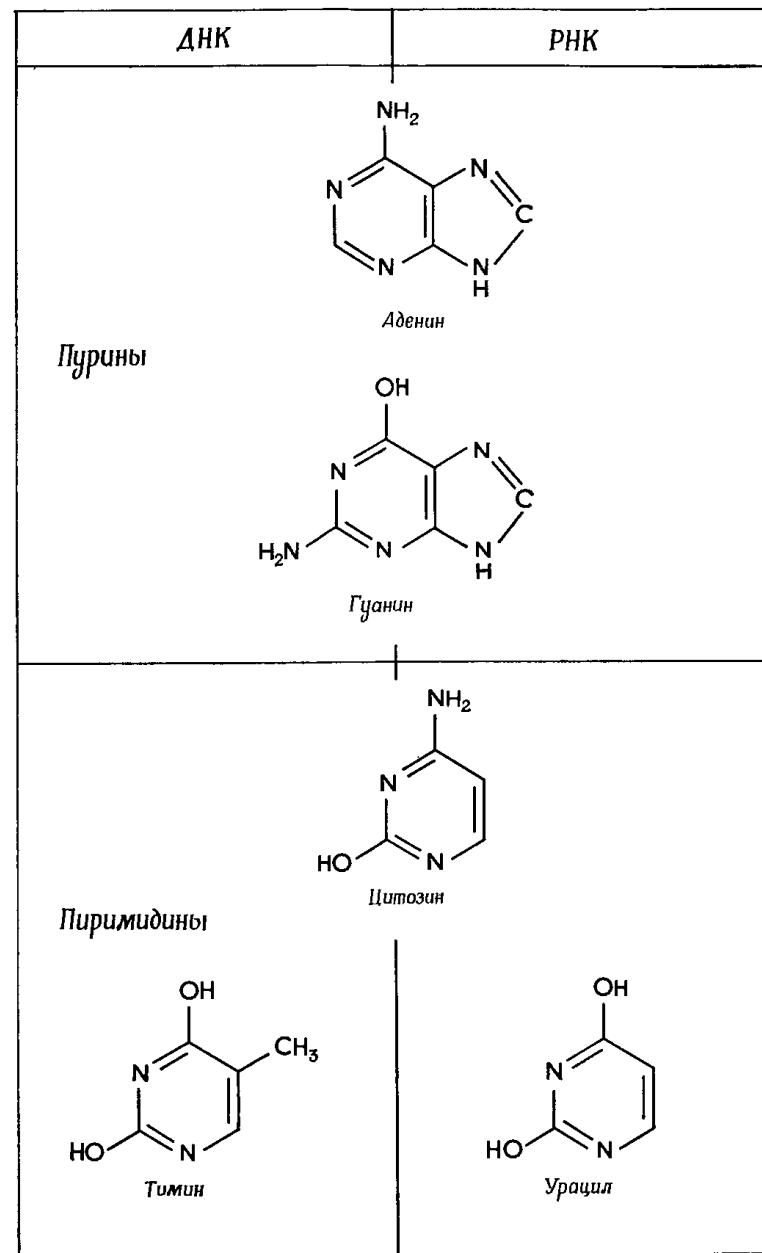
Фиг. 21. Структура цепи нуклеиновой кислоты [3].

Основание, в данном случае аденин, соединяясь с сахаром 2-деоксирибозой, образует аденозин, который в соединении с фосфорной кислотой дает адениловую кислоту. Две молекулы адениловой кислоты объединяются в динуклеотид. Дальнейшая полимеризация с нуклеотидами, содержащими другие основания, приводит к образованию длинной цепи нуклеиновой кислоты.

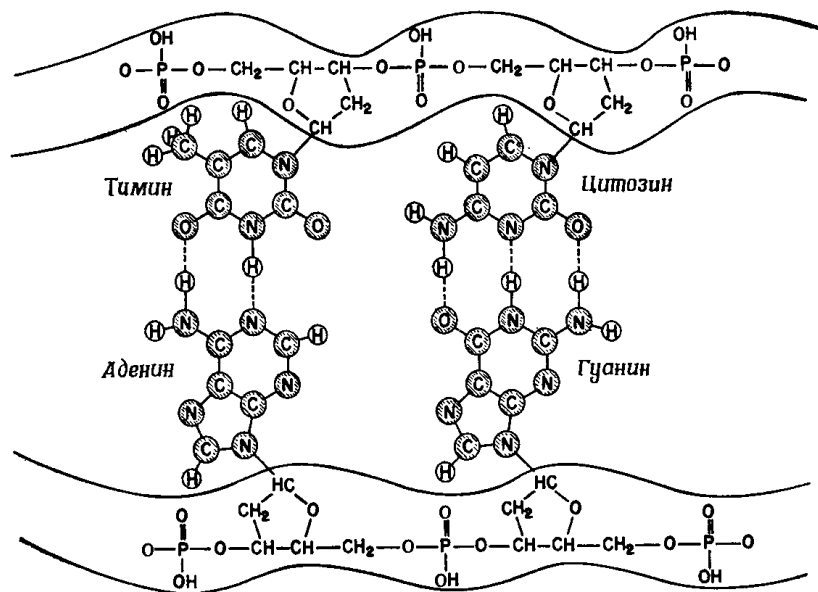
нуклеотид в свою очередь состоит из трех частей: фосфорной кислоты, сахара — дезоксирибозы<sup>2</sup> — и какого-либо одного из четырех азотистых оснований. На фиг. 20—23 показана структура цепей ДНК и РНК. Четыре азотистых основания, входящих в состав ДНК, — это аденин и гуанин (пуриновые основания) и тимин и цитозин (пиримидиновые основания; в РНК вместо тимина присутствует урацил). Их формулы даны на фиг. 22. Две полинуклеотидные цепи молекулы ДНК «скреплены» в двойную спираль водородными связями, которые образуются между пуриновыми основаниями одной цепи и пиримидиновыми основаниями другой.

<sup>1</sup> Существуют также одноцепочечные кислоты — как РНК (молекулы транспортных РНК построены из одной цепи), так и ДНК (генетический материал некоторых бактериофагов представляет собой одноцепочечную ДНК). — *Прим. перев.*

<sup>2</sup> Дезоксирибоза присутствует только в ДНК, в молекулу РНК входит другой сахар — рибоза. — *Прим. перев.*



Фиг. 22. Азотистые основания, входящие в состав ДНК и РНК [2].



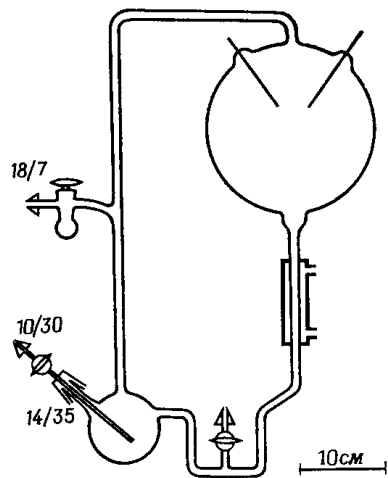
Фиг. 23. Схема строения участка молекулы ДНК [3].

Ясно видно, что две цепи двойной спирали ДНК связаны между собой через основания, входящие в состав каждой цепи.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ МИЛЛЕРА

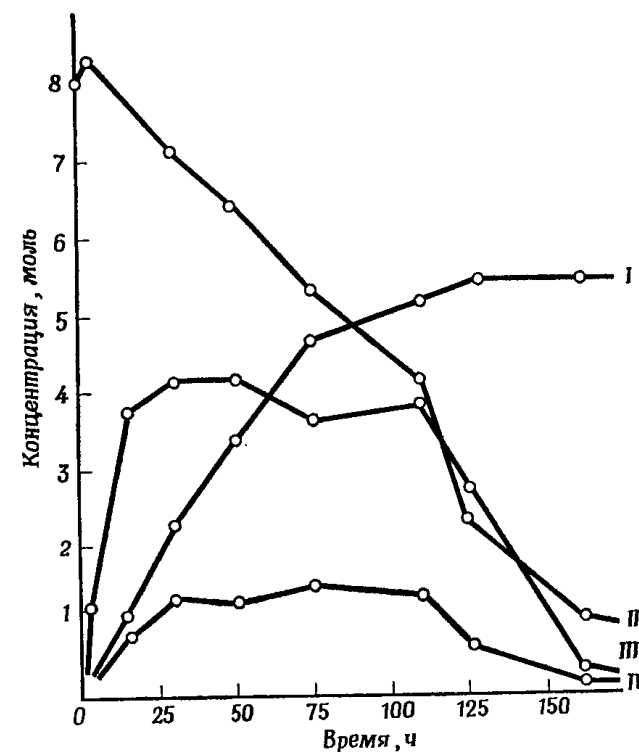
Как уже говорилось, первые эксперименты по неорганическому синтезу «органических» веществ в восстановительной среде, ставшие теперь классическими, провел С. Миллер [25], бывший в ту пору студентом у Г. Юри.

Миллер использовал очень простой прибор — колбу, в которой создаются электрические разряды (схема прибора приведена на фиг. 24). Прибор заполнялся водой и различными газами. В основном использовались водород, метан и аммиак; свободный кислород в колбу не допускался. В верхней части колбы непрерывно происходили электрические разряды. Внизу кипела вода, создавая циркуляцию пара и воды через прибор, причем время от времени анализировались пробы раствора (фиг. 25).



Фиг. 24. Устройство аппарата, в котором под действием искрового разряда из водорода, метана, аммиака и воды в отсутствие кислорода образуются «органические» соединения [25].

В этих первых опытах в качестве источника энергии использовался не ультрафиолет, а искровой разряд. Это упрощало установку. Поскольку разряд дает меньше энергии, чем ультрафиолет,



Фиг. 25. Изменение концентраций аминокислот (I), аммиака (II), цианистого водорода (III) и альдегидов (IV) в опыте с электрическим разрядом, пропускаемым в аппарате, изображенном на фиг. 24 [25].

Измеряли концентрацию аммиака, цианистого водорода и альдегидов в U-образной трубке и концентрацию аминокислот в колбе объемом 500 мл; опыт длился 175 ч. В продолжение первых 25 ч образуются в основном цианистый водород и альдегиды. На их образование расходуется аммиак. Затем рост концентрации цианистого водорода и альдегидов прекращается, а концентрация аминокислот продолжает расти по-прежнему за счет потребления аммиака. После 125 ч опыта концентрация аминокислот перестает расти, а количества аммиака, HCN и альдегидов быстро уменьшаются. Очевидно, в этот период синтез аминокислот уравнивается их потреблением в каком-то другом процессе. Последующие эксперименты показали, что этот процесс — полимеризация аминокислот, не учтенная С. Миллером.

можно было считать, что все полученные в опыте соединения наверняка синтезировались бы и при облучении ультрафиолетом.

Оригинальные эксперименты Миллера вызвали большой интерес. К сходным опытам приступили многие ученые во всем мире, среди них американцы [3, 28, 29, 31], немцы [19] и русские [27].

Мне кажется, важнейшим результатом этих экспериментов было не только подтверждение данных Миллера, но и значительное расширение нашего кругозора. В самом деле, новейшие эксперименты отличаются большим разнообразием исходных веществ, сред, источников энергии и получаемых соединений.

Здесь невозможно рассмотреть все новейшие эксперименты по синтезу «предбиологических» систем. Удовольствуемся несколькими примерами, показывающими, как бурно развивалась эта область исследования.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ УИЛСОНА И ПОННАМПЕРУМЫ

Уже в 1960 году Уилсон [43], добавив в исходный раствор серу, смог получить гораздо более крупные молекулы полимеров, содержащие по 20 и более атомов углерода. В колбе были обнаружены тонкие пленки размером около 1 см (фото 2). Очевидно, синтезировались поверхностно-активные вещества, скопившиеся на поверхности раздела газ — жидкость в виде тонких пленок. Этот результат хорошо согласуется с предположением, что пленки молекул, синтезировавшихся на границе между разными фазами, играли важную роль на ранних стадиях возникновения жизни.

Считают, что сера катализировала образование этих пленок. Это тоже важно в связи с нашей проблемой, так как на примитивной Земле сера, видимо, была широко распространена в форме зерен сульфидов (например, в пиритовых песках; см. гл. XIII, разд. 8).

Поннамперума и сотр. [31] проводили эксперименты, подобные экспериментам Миллера, но с использованием в качестве источника энергии ультрафиолетового света. Хотя по теоретическим соображениям синтеза, идущие под действием ультрафиолета, не должны принципиально отличаться от тех, которые вызываются электрическим разрядом, важно было получить экспериментальное подтверждение этого положения. Ведь в условиях первичной атмосферы гораздо больше энергии поступало с ультрафиолетовым излучением.

Поннамперума не только смог синтезировать аминокислоты и пурины, т. е. строительные блоки белков и нуклеиновых кислот соответственно (фото 3), но и, используя особые условия, смог синтезировать из этих блоков полимеры. Оказалось, например, что в присутствии цианистого водорода аминокислоты полимеризуются, образуя пептидные цепи. При добавлении фосфорной кислоты получались различные нуклеотиды [31, 33—36, 39].

Мы еще вернемся к влиянию цианистого водорода на полимеризацию строительных блоков в более крупные «органические» молекулы при обсуждении экспериментов М. Кальвина и его сотрудников (разд. 7 этой главы).

#### 5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ОРО С НАГРЕВАЕМОЙ ВОДНОЙ СРЕДОЙ

Важного успеха добились Оро и сотр. [28, 29], показавшие, что более крупные «органические» молекулы можно синтезировать и без помощи ультрафиолета, просто нагревая среду.

Мы знаем, что в условиях восстановительной атмосферы малые «органические» молекулы могли синтезироваться за счет энергии ультрафиолетового излучения Солнца. Возникает вопрос, как произошел переход от этой преджизни к ранней жизни. Позднее мы подробно обсудим этот вопрос, а сейчас нужно подчеркнуть, что условия в эпоху примитивной атмосферы были для ранней жизни не менее опасными, чем они оказались бы для современной. Хотя ранняя жизнь в бескислородной атмосфере не подвергалась окислению, ничто не защищало ее от губительного воздействия жесткого ультрафиолетового излучения.

Поэтому надо учитывать, что при переходе от преджизни к жизни и во время дальнейшего развития ранней жизни, возможно, использовались уже другие источники энергии. Свободные радикалы и малые «органические» молекулы создавались за счет высокоэнергетического ультрафиолетового излучения Солнца, а для

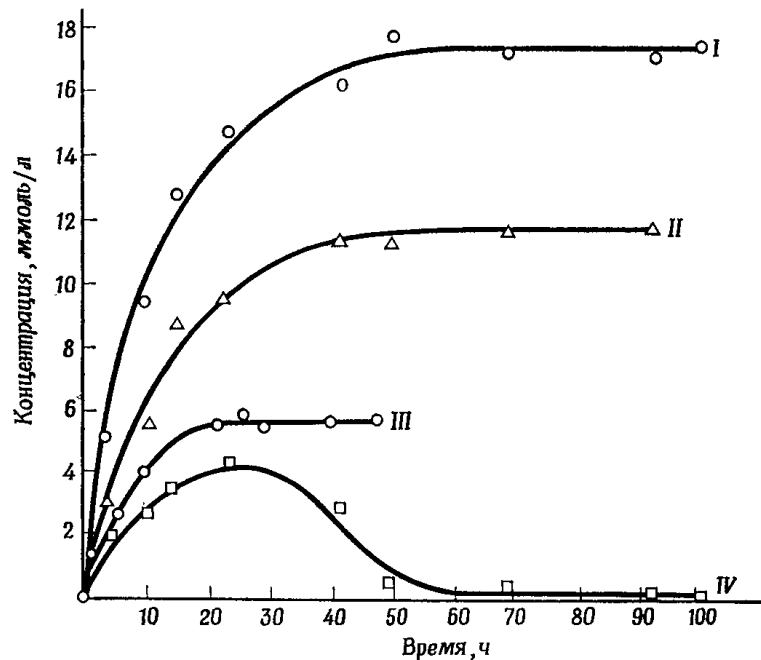
Таблица 8

Аминокислоты, синтезированные в водных растворах из смесей реакционноспособных «органических» соединений [29]

Аминокислоты или амиды аминокислот	Относительное количество
Из смеси $\text{HCN} + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ или из смеси $\text{CH}_2\text{O} + \text{NH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	
Глицинамид	+++
Глицин	+++
Аланин	++
Аспарагиновая кислота	++
Серин	++
Глутаминовая кислота	+
Треонин	+
Лейцин	+
Изолейцин	+
Аргинин	+
$\alpha$ -Амино- <i>n</i> -масляная кислота	+
$\beta$ -Аланин	++
$\alpha, \beta$ -Диаминопропионовая кислота	++
Из смеси $\text{CH}_2\text{O} + \text{N}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O}$	
Глицин	++
Валин	++
Лизин	++

синтеза из малых молекул других, более сложных соединений годились и менее мощные источники энергии.

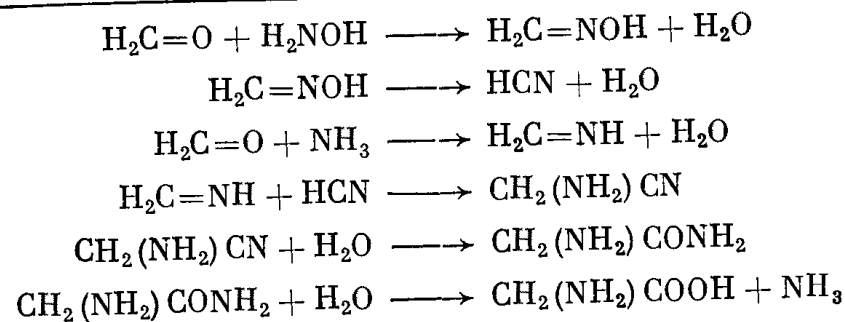
В опытах Оро и его сотрудников водные смеси простых «органических» молекул оставались на несколько дней при температуре от комнатной до 150° С. Таким образом, в отношении температуры эти эксперименты, как правило, не выходили за пределы условий, к которым может приспособиться современная жизнь (табл. 2). Соединения, полученные в опытах Оро, перечислены в табл. 8.



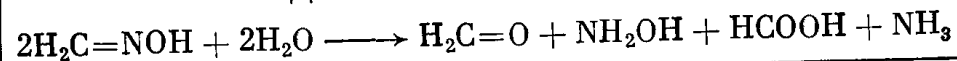
Фиг. 26. Скорость образования аминокислот и других продуктов из водных смесей формальдегида и гидроксилamina [28].

Амиды аминокислот, по-видимому, являются промежуточными продуктами при образовании аминокислот (I — аминокислоты; II — аммиак ( $\times 10^{-1}$ ); III — цианистый водород; IV — амиды аминокислот).

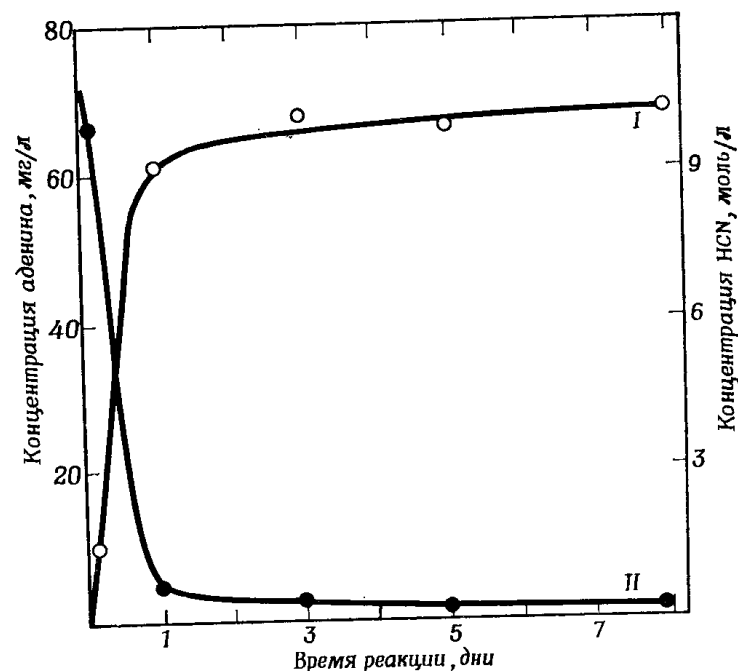
Некоторые результаты анализов полученных соединений показаны на фиг. 26—33. В растворах формальдегида с гидроксил-амином, формальдегида с гидразином и в растворах, содержащих цианистый водород, в конце опыта были обнаружены аминокислоты. В других экспериментах эти продукты полимеризовались в пептидные цепи — большой шаг к неорганическому синтезу белка. В системе с раствором цианистого водорода в водном аммиаке даже появлялись более сложные соединения — пурины и пиримидины (азотистые основания, входящие в состав нуклеиновых кислот).



Дополнительная реакция

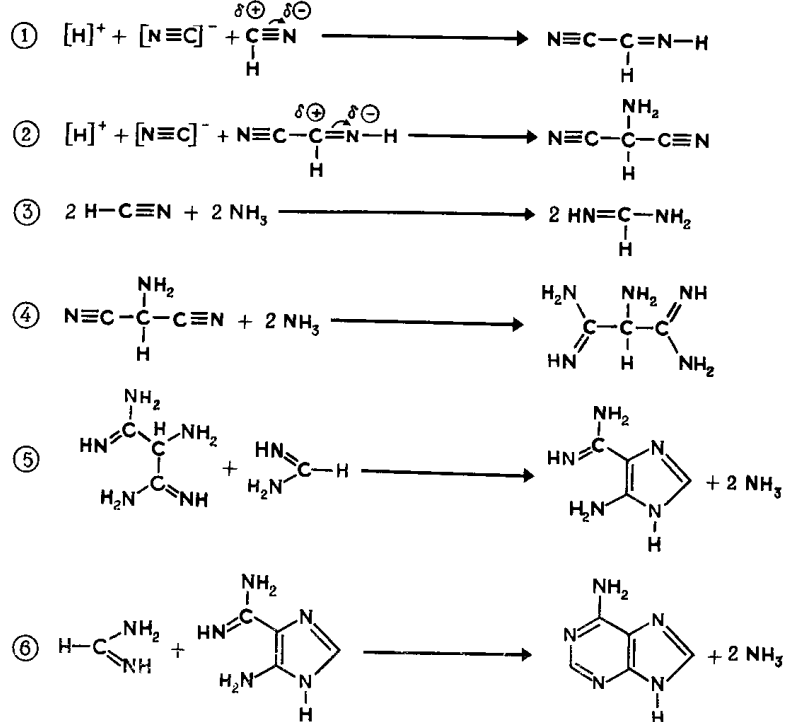


Фиг. 27. Возможный механизм неорганического синтеза аминокислоты глицина из водной смеси формальдегида с гидроксилaminом [28].

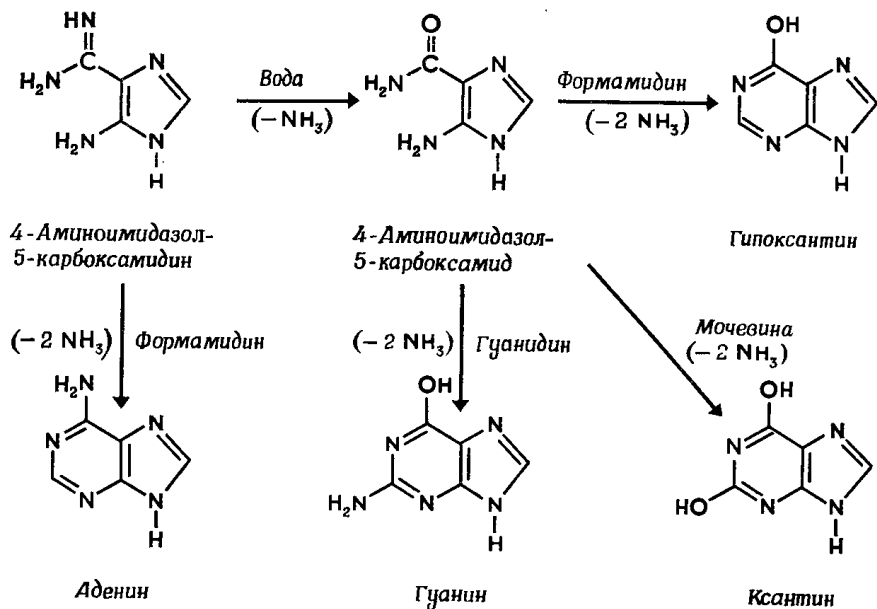


Фиг. 28. Скорость синтеза аденина из водной смеси аммиака и цианистого водорода при температуре 90° С [29].

Молекула аденина образуется из пяти молекул цианистого водорода (I — концентрация аденина; II — концентрация HCN).

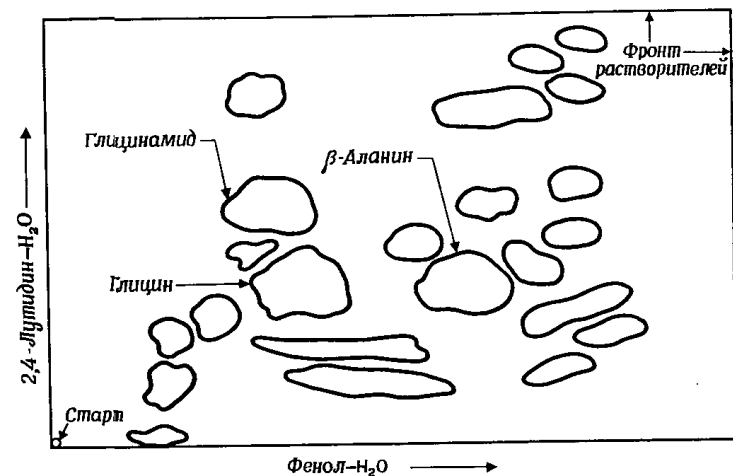


Фиг. 29. Предполагаемый механизм образования аденина из водной смеси аммиака и цианистого водорода (суммарная реакция:  $5 \text{HCN} = \text{Аденин}$ ) [29]. Значки  $\delta^+$  и  $\delta^-$  в уравнениях 1 и 2 означают частичные положительный и отрицательный заряды.



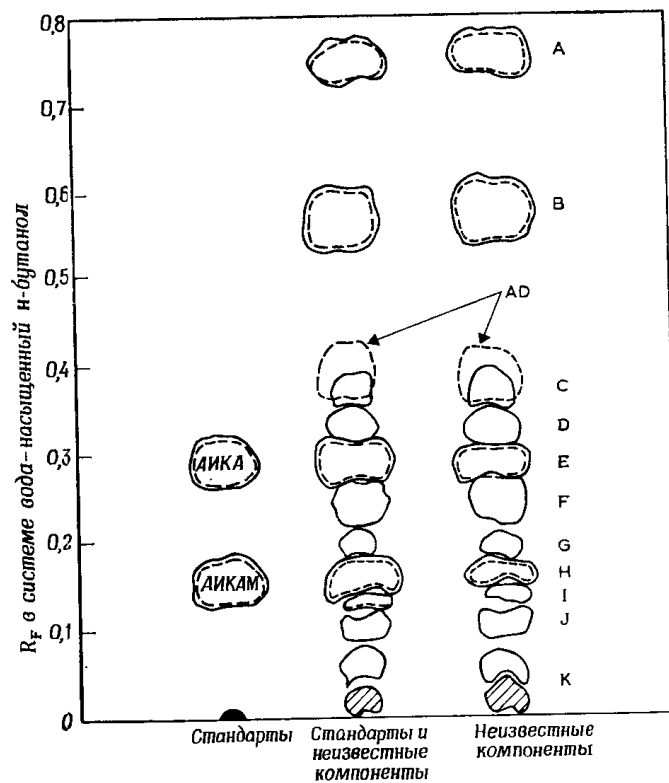
Фиг. 30. Предполагаемый механизм образования пуринов из водной смеси аммиака и цианистого водорода [29].

Промежуточные продукты — 4-аминоимидазол-5-карбоксамидин (АИКМ) и 4-аминоимидазол-5-карбоксамид (АИКА) — были найдены в растворе.



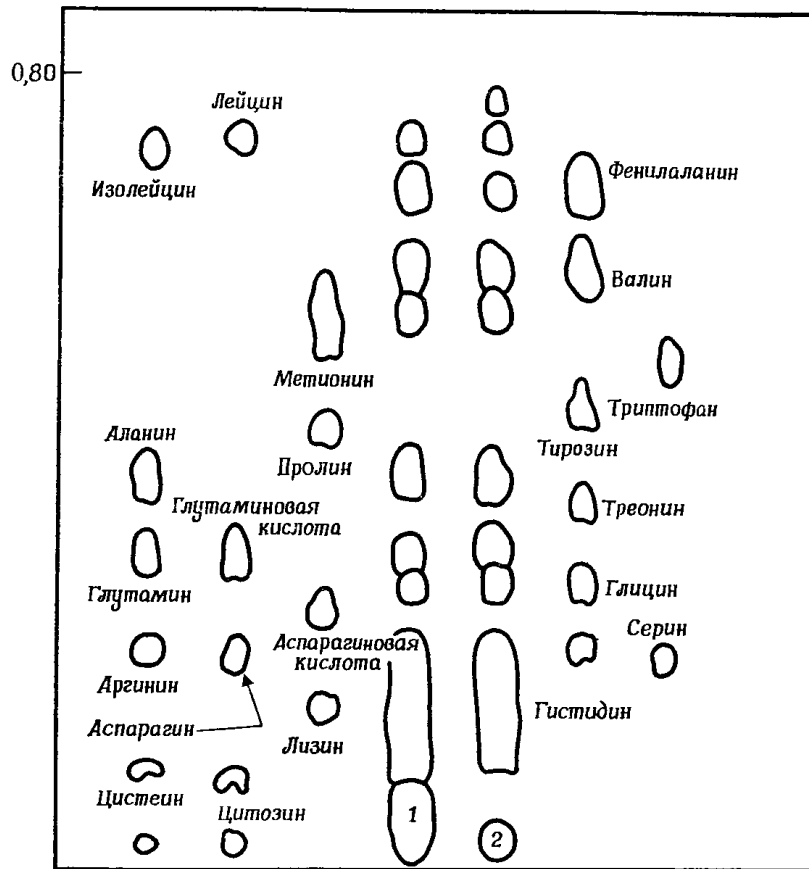
Фиг. 31. Хроматограмма на бумаге (см. разд. 9 этой главы) продуктов, образующихся в системе с формальдегидом и гидроксилмином [28].

Сразу можно идентифицировать глицин и  $\beta$ -аланин. Для определения других аминокислот требуется дальнейший анализ, выявивший в конце концов все аминокислоты, перечисленные в табл. 8 (бумага ватман № 1, проявление нингидрином).



Фиг. 32. Результаты анализа с помощью хроматографии на бумаге диазотируемых аминов, синтезированных из цианистого водорода [28].

Аденин и промежуточные продукты его синтеза, АИКА и АИКМ (см. фиг. 30), можно сразу определить на хроматограмме. Другие продукты приходится анализировать иными методами. Расшифровку всех этих соединений, обозначенных латинскими буквами, см. в работе Оро, откуда взят этот рисунок.



Фиг. 33. Хроматограмма продуктов гидролиза двух полимеров, полученных в водных аммиачных системах из смесей аминокислот.

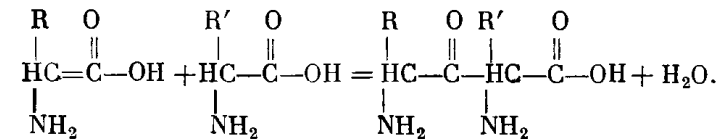
Она наглядно доказывает, что неорганически синтезированные пептиды построены из поразительно большого числа различных аминокислот. В качестве растворителя при хроматографии использовали водонасыщенный фенол; 1 — гидролизат полимера, полученного с использованием эквивалентных количеств аминокислот; 2 — гидролизат полимера, полученного с использованием избытка глутаминовой кислоты. Пятна с надписями — аминокислоты, использованные в качестве стандарта.

Как уже сказано, эти эксперименты указали возможный путь перехода от синтеза малых «органических» молекул за счет энергии ультрафиолетового солнечного излучения к более сложным «органическим» молекулам, образующимся при менее жестких воздействиях. Подробный отчет об этих важных результатах читатель найдет у Оро [28, 29].

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ФОКСА ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ СИНТЕЗА В БЕЗВОДНЫХ СРЕДАХ

Совершенно другим путем в попытках синтезировать неорганическим путем громадные молекулы белков пошли Фокс и сотр. [8, 9, 15]. Как мы знаем, молекулы белков построены из одной или нескольких полипептидных цепей, а те в свою очередь состоят из большого и даже очень большого числа разных аминокислот.

После того как образовались аминокислоты, может произойти следующий шаг — их объединение в полипептидные цепи (фиг. 16 и 35). Эту реакцию можно описать следующим уравнением (R и R' — различные радикалы):



Фокс считает, что выделение молекулы воды, сопровождающее реакцию соединения двух молекул аминокислот, — факт большой важности. Поскольку реакция полимеризации, вернее поликонденсации, сопровождается дегидратацией, очевидно, степень и скорость превращения будут выше при удалении воды из системы. Это соображение привело Фокса к выводу, что раннее развитие жизни должно было происходить вблизи действующих вулканов, — а всем известно, что в ранние периоды геологической истории вулканическая деятельность шла более активно, чем в последующие времена.

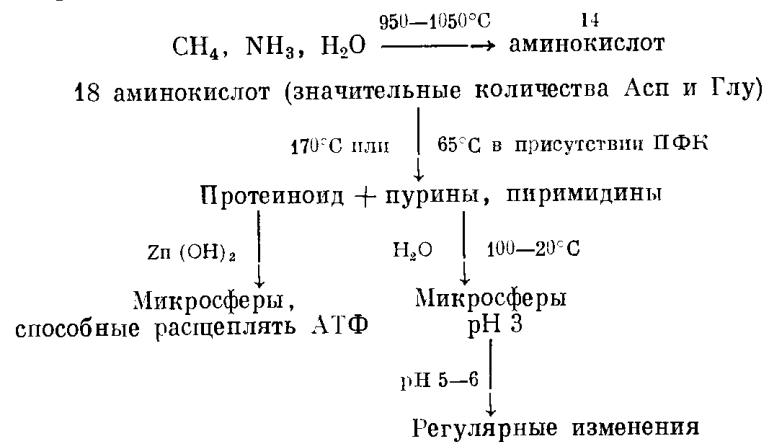
Фокс провел эксперименты, в которых безводную смесь аминокислот подвергали воздействию температур до 170°С. Оказалось, что великолепные результаты получаются со смесями, содержащими аспарагиновую и глутаминовую кислоты. Почему это так, до сих пор непонятно<sup>1</sup>. Кстати, интересно, что именно эти две аминокислоты можно причислить к числу важнейших аминокислот, встречающихся в современных организмах.

В опытах Фокса образовывались соединения, во всех существенных отношениях сходные с природными белками. Так, они состоят из крупных молекул с молекулярной массой до 300 000, сложенных из тех же блоков, что и природный белок. Они содержат 18 из 23 аминокислот, обычно встречающихся у современных организмов. Таким образом, они отвечают общему определению белка. С природным белком они сходны и по ряду других важных

<sup>1</sup> В присутствии избытка аспарагиновой и глутаминовой кислоты смесь аминокислот переходит в необходимое для осуществления реакции жидкое состояние (расплав) при гораздо более низкой температуре. В противном случае она просто обугливается. — Прим. ред.



свойств, например по связыванию полинуклеотидов [41], по пригодности в пищу бактериям и крысам, по способности вызывать реакции, сходные с теми, которые катализируются ферментами в организмах. Так, эти искусственно синтезированные «органические» соединения способны каталитически разлагать глюкозу. Активность их, правда, мала, но, как указывается в сообщении об этом [14], «...первым белкам достаточно было проявлять хотя бы слабую активность». Кроме того, эти вещества могут оказывать действие, аналогичное действию меланоцитстимулирующего гормона [16].



Фиг. 34. Каталитическое, или «ускоряющее», действие неорганически синтезированных протеиноидов [11].

С тех пор многое было сделано для изучения активности этих соединений, и Фокс [11—13] смог сообщить о многих других ее проявлениях (фиг. 34). Терминология с тех пор также усовершенствовалась, и вместо «ферментативной активности» в применении к этим веществам теперь употребляют термин «каталитическая» или даже «ускоряющая» активность. Это делают для того, чтобы провести различие между активностью искусственно синтезированных белковоподобных соединений (так называемых протеиноидов) и активностью соединений, свойственных современным организмам. Конечно, функция ферментов, по сути дела, и есть катализ, т. е. ускорение реакций, но все же довольно слабая активность протеиноидов может показаться несравнимой с сильным и высокоспецифичным действием современных ферментов. Можно назвать активность протеиноидов, скажем, «предферментной». Главное — не в ее отличиях от действия современных ферментов, а в том, что она уже существовала в период перехода от преджизни к ранней жизни, когда высокоактивных и специфичных ферментов еще не было.

Другое важное свойство протеиноидных соединений, о котором мы еще поговорим в разд. 6 следующей главы, — их «ограниченная гетерогенность». Это значит, что последовательность аминокислот в их пептидных цепях не совершенно случайна, а, напротив, более или менее закономерна.

Фокс пишет, что пока невозможно провести строгое сравнение этих искусственных соединений с природными белками, так как молекулы белков настолько сложны, что структура большинства из них еще не определена с достаточной точностью. Стремясь подчеркнуть сходство этих искусственных белковоподобных соединений с природными белками, Фокс называет первые *протеиноидами*. Поскольку они были синтезированы под действием тепла, в дальнейшем их стали называть «термическими протеиноидами».

Полное, хотя и лаконичное описание экспериментов по синтезу этих термических протеиноидов можно найти в статье Фокса [8]<sup>1</sup>.

Следует подробнее рассказать об одном весьма эффективном результате этих экспериментов, а именно об образовании микросфер из термических протеиноидов. Процесс несложен. Промывая горячую смесь искусственных полимеров водой или водными растворами солей, получают многочисленные микросферы. Они очень малы, их диаметр — около 2 мкм. Их морфологические особенности показаны на фото 4—7.

Микросферы довольно стабильны. Если их помещают в растворы иной концентрации, чем концентрация раствора, в котором они образовались, то можно наблюдать их реакцию. В слишком концентрированных растворах они сморщиваются, в разбавленных набухают, т. е. их реакция на изменение осмотического давления сходна с реакцией живых клеток. Видимо, это объясняется наличием у них полупроницаемой наружной оболочки, сходной с мембраной. Судя по электронным микрофотографиям, эта оболочка может быть даже двойной (фото 7).

<sup>1</sup> Приводим основные стадии их синтеза, согласно «термической теории происхождения жизни» по Фоксу [9]. Первым шагом было образование при очень высоких температурах аминокислот. Такой синтез вполне возможен наряду с другими, т. е. при воздействии электрических разрядов (Миллер), ультрафиолетового излучения (Поннамперума) и высокой температуры (Оро). Возможность такого термического синтеза экспериментально доказана Харадой и Фоксом [21].

Следующий шаг — поликонденсация полученных в опыте 18 аминокислот при температуре 170 или 65°С (в последнем случае в присутствии некоторых фосфатов). Эта поликонденсация происходит, если в смеси имеется достаточно аспарагиновой и глутаминовой кислот.

В смеси протеиноидов при воздействии на нее водой или кислыми водными растворами (дождем) образуются микросферы (фото 4—7).

Способность протеиноидов к выполнению некоторых функций, сходных с функциями молекул живых организмов, выражается в том, что они могут в присутствии гидрата окиси цинка расщеплять нуклеотид АТФ, т. е. обладают слабой ферментативной активностью.

Образование микросфер из термических протеиноидов важно потому, что оно дает нам материал для суждения о том, как мог произойти следующий шаг в развитии жизни. Это шаг от разрозненных «органических» молекул к группам таких молекул, собранным в отдельные структуры и отделенным от окружающего мира своеобразной мембраной. Мы еще вернемся к этому вопросу в следующей главе, в разделе о коацервации и образовании мембран.

Но мне как геологу трудно принять один аспект «термической теории», а именно роль высоких температур. Фокс подчеркивает, что такие температуры создавались во время извержения вулканов и в кратере, и на поверхности потоков горячей лавы. Как же тогда совместить идею о появлении малых молекул в «первичном бульоне» с дальнейшим развитием жизни в вулканах и около них при извержениях? Далее мы увидим (особенно в гл. XVI), что преджизнь и ранняя жизнь должны были очень долго сосуществовать, и мне кажется, что такие редкие и случайные события, как извержения вулканов, не могли способствовать появлению жизни из «органических» соединений.

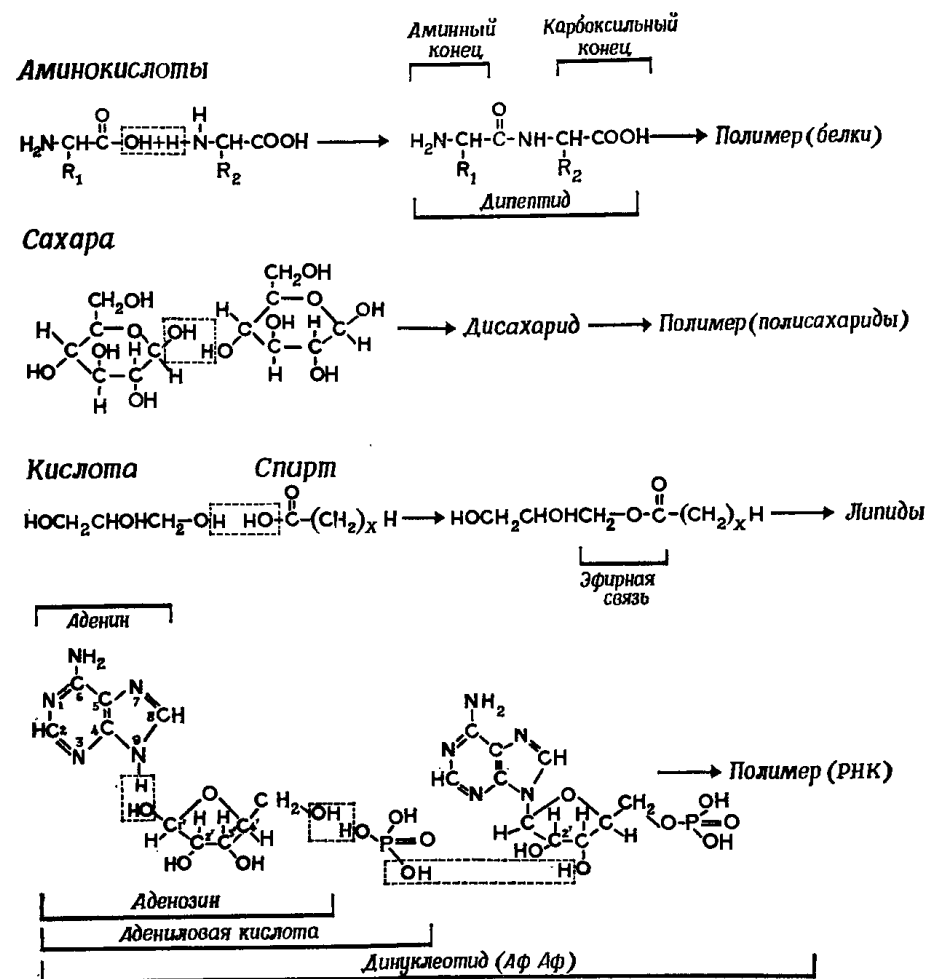
Правда, в природе всегда образуются более разнообразные соединения, чем в упрощенных модельных экспериментах. Так, не исключено, что в природе сходные реакции могли бы идти и при более низких температурах с помощью какого-либо катализатора. Такая возможность уже показана и в опытах Фокса: при добавлении фосфатов к смеси аминокислот их конденсация происходила уже при 65° С (фиг. 34).

### 7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ КАЛЬВИНА. КОНДЕНСАЦИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ЕДИНИЦ В БОЛЕЕ КРУПНЫЕ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ, СОДЕРЖАЩИХ HCN

Рассматривая исходный пункт «термической теории» происхождения жизни, предложенной Фоксом, Кальвин [3] отметил, что такая же дегидратация сопровождается не только полимеризацией аминокислот, но и объединение других строительных блоков в более крупные «органические» молекулы. Такое объединение всегда связано с реакцией конденсации, при которой чаще всего от одного блока «отщепляется» атом водорода, а от другого — гидроксильная группа (фиг. 35).

Не принимая положения Фокса о том, что эта конденсация должна была идти в сухой — безводной — среде, Кальвин попытался показать, каким образом дегидратация могла бы происходить в водной среде, в «первичном бульоне». И ответ был найден: оказалось, что HCN способен связывать молекулы воды «первичного бульона». Присутствие в «первичном бульоне» HCN предполагается

не только теоретически; его возможность доказана уже первыми экспериментами Миллера (фиг. 25).



Фиг. 35. Реакции конденсации с дегидратацией, приводящие к образованию из отдельных строительных блоков более крупных «органических» молекул. Верхние три уравнения: конденсация и последующая полимеризация аминокислот в белки, сахаров в полисахариды и кислот и спиртов в липиды. Нижнее уравнение — конденсация аденина с рибозой и фосфорной кислотой, в результате чего образуется нуклеотид. Полимеризация нуклеотидов в цепь нуклеиновой кислоты также представляет собой реакцию конденсации и протекает с выделением молекул воды [3].

Далее, оказалось, что два других, несколько более сложных соединения — цианамид и дигидроцианамид  $\text{HN}(\text{C}\equiv\text{N})_2$  — обладают такой дегидратирующей способностью в еще большей степени. Реакции с ними более сложны, их механизм еще не выяснен до конца [22]. Во всяком случае, было показано, что в присутствии

HCN и дианамидов конденсация отдельных блоков, сопровождаемая дегидратацией, может идти при нормальных температурах в сильно разбавленных водных растворах [24].

Интересные выводы сделал Эйбелсон [1], указавший, что реакции с HCN сильно зависят от кислотности водных растворов, в которых они протекают. Эти реакции не идут в кислых средах, тогда как щелочные условия (рН 8—9) им благоприятствуют. Вряд ли первичный океан имел такой состав (см. гл. XIV, разд. 7 и 8), но вполне вероятно, что именно таким рН обладала озерная вода, соприкасавшаяся с базальтом, и интересующие нас реакции вполне могли здесь происходить.

## 8. ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДХОДА

Пытаясь резюмировать то главное, что принес экспериментальный подход к проблеме возникновения жизни естественным путем, мы приходим к двум важным выводам. Первый: есть много способов экспериментального получения «органических» молекул неорганическим путем в условиях, моделирующих первичную атмосферу. Второй: результаты этих экспериментов с геологической точки зрения не являются удовлетворительными, ведь в них не моделировалось, да и не могло моделироваться геологическое время.

Рассмотрим сначала первый, положительный вывод. Оказалось, что «органические» молекулы могут создаваться в самых разных условиях среды, за счет разнообразных видов энергии, наверняка имевшихся на Земле в ранний период ее истории. Подобные эксперименты стали настолько обычным делом, что популярный американский журнал *Scientific American* в январском номере за 1970 год дал под названием «Эксперименты по созданию живого вещества из неорганических соединений» подробные инструкции для экспериментаторов-любителей.

Мы рассмотрели далеко не все выполненные эксперименты. Но я попытался подчеркнуть разнообразие испытанных сред и источников энергии. Как мы видели, опыты были успешными при использовании холодных, теплых и даже горячих водных и сухих сред и таких разных источников энергии, как тепло, ультрафиолетовое излучение и электрические разряды.

Следовательно, для появления преджизни естественным путем и последующего перехода к жизни существенно важны только два условия. Во-первых, атмосфера должна быть бескислородной, во-вторых, должно иметься все необходимое для построения «органических» молекул — атомы углерода, азота, неорганические катализаторы, вода и т. д. Если эти условия выполнены, немедленно начнется образование «органических» соединений.

Но это означает, что формирование преджизни — процесс, свойственный не только нашей Земле. На любой планете, отвечающей двум вышеизложенным требованиям, найдешь ее в нашей Солнечной или в любой другой системе, должны идти сходные процессы. В гл. V мы говорили о том, что бескислородная атмосфера, содержащая нужные для синтеза «органических» соединений атомы и молекулы, — обычное для Вселенной явление. Остается одно главное условие для образования преджизни — наличие жидкой воды (см. гл. XVII, разд. 6).

Этот основанный на экспериментах вывод отнимает у преджизни, а следовательно, и у жизни один из самых ревниво оберегаемых ее признаков — уникальную приуроченность к Земле. Приходится признать, что *неорганическое образование «органических» соединений — распространенный космический процесс.*

Следует отметить одну общую особенность экспериментального подхода к проблеме происхождения жизни, а именно трудность экстраполяции результатов на геологические промежутки времени. Эта трудность присуща всем экспериментам, относящимся к истории Земли. Мы знаем, что в результате неких процессов образуются определенные структуры. Прекрасно, но ведь не менее важно знать, сохранятся ли такие структуры с течением времени. Мало констатировать возможность того или иного процесса, приводящего к образованию данных продуктов; необходимо выяснить, могут ли сохраняться и накапливаться эти продукты. Еще в классических опытах Миллера (фиг. 25) было показано, что после того, как установка проработала неделю, получают совершенно иные результаты, чем после одного дня работы.

Учтесть роль геологического времени, этого важнейшего фактора, можно было бы, если бы мы знали, какие соединения возникли бы при определенных условиях эксперимента, в котором существовало бы некое равновесие между образованием и распадом этих «органических» соединений, установившееся за период, скажем, в тысячу лет. Поскольку свойства атомов, из которых состоят «органические» соединения, довольно хорошо известны, не исключено, что расчет такого равновесия (или нескольких равновесий) с помощью ЭВМ был бы более ценен, чем дальнейшее экспериментирование.

Попыткой заложить основу для таких расчетов служит работа Стейнмана [38]. Он доказывает, что при абиотических синтезах пептидов реакции между аминокислотами подчиняются определенным статистическим закономерностям, основанным на сравнительной реакционной способности каждой аминокислоты. Здесь играют роль также физико-химические свойства среды, рН, строение боковой цепи в молекуле аминокислоты и свойства образующегося полимера. Получается, что без участия нуклеиновых кислот, под влиянием условий среды и в зависимости от реакционной

способности различных аминокислот могут абиотически образовываться «популяцией» полипептидов определенного строения. Если бы удалось определить скорость каждой реакции в разных комбинациях условий среды, то можно было бы оценить относительный выход каждого полимера. И так, в полипептидной цепи, растущей в примитивных абиогенных условиях, последовательность аминокислот ни в коем случае не будет случайной.

В более ранней статье Экка и сотр. [6] исследуется термодинамическое равновесие процессов образования «органических» соединений неорганическим путем. Но в таких случаях всегда остается сомнение в идентичности условий эксперимента условиям, царившим на первобытной Земле. Возможно, что для «органических» соединений, возникавших тогда, никогда не достигалось равновесие — ведь они были подвержены мощному воздействию энергии солнечного излучения.

## 9. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Все описанные эксперименты стали возможными лишь благодаря поразительным успехам в развитии методов анализа в органической химии. Без них мы были бы не в состоянии узнать, какие соединения образуются в опытах.

Старые методы анализа в органической химии были в большей или меньшей степени продолжением методов, используемых химиками-неорганиками. Применялся освященный временем принцип: исследуемую молекулу надо разрушить на более мелкие фрагменты, состав которых определить значительно легче. Анализируя природу этих фрагментов и определяя их процентное содержание, во многих случаях удавалось выяснить состав исходного соединения. Конечно, я упростил принцип, и все же подход к анализу органических веществ был раньше именно таким. Информативность этого метода ограничена. Он позволяет определить, имеем ли мы дело, скажем, с углеводородом, сложным эфиром, жиром или углеводом. Но внутри этих классов известны различные соединения, состоящие из одних и тех же атомов или их групп. Такие соединения с одинаковым составом, но разным пространственным расположением атомов называются *изомерами*.

Даже у простых соединений, какими являются предельные углеводороды, или алканы, состоящие только из атомов углерода и водорода, число возможных изомеров одной молекулы возрастает до астрономических величин при удлинении углеродной цепочки. Бутан ( $C_4H_{10}$ ) — первый углеводород, имеющий два изомера. За ним идет пентан ( $C_5H_{12}$ ) — у него есть три изомера; у гексана ( $C_6H_{14}$ ) — пять; у гептана ( $C_7H_{16}$ ) — девять изомеров и т. д. У алкана с формулой  $C_{20}H_{42}$  должно быть 366 319 разных изомеров [30].

Раньше химики-органики не умели анализировать смеси таких сложных изомеров. Новые методы позволяют выделять эти соединения из смеси и анализировать их, не разрушая на фрагменты. Впрочем, старый метод разрушения исследуемого вещества также может применяться, однако только в сочетании с новейшими техническими достижениями, позволяющими определять тонкую структуру, такими, как масс-спектрометрический анализ (см. гл. XII, разд. 11).

Подробные сведения о новейших методах читатель может найти в учебниках и справочниках [42]. Некоторые из новых методов анализа были в разное время популярно описаны в журнале *Scientific American* [5, 18, 23, 37]. Но три метода заслуживают особого разговора. Это жидкостная адсорбционная хроматография (или, короче, просто хроматография), газовая, или парофазная, хроматография, а также масс-спектрометрия.

Метод *жидкостной адсорбционной хроматографии на колонках* был разработан уже давно. Он позволяет разделять сложные смеси на отдельные соединения. Смесь соединений в растворителе заливается в стеклянную колонку, заполненную специальным адсорбентом. Затем через колонку пропускаются большие объемы чистого растворителя; при этом каждый отдельный компонент смеси продвигается по колонке со скоростью, зависящей от силы его взаимодействия с адсорбентом. Время, в течение которого каждый компонент удерживается на колонке (время задержки), зависит от того, насколько трудно его «отмыть» от адсорбирующей поверхности.

Позже жидкостная адсорбционная хроматография была усовершенствована. Развита более эффективные методы — *хроматография на бумаге и тонкослойная хроматография*. В них используется или особым образом обработанная бумага, или тонкий слой специального сорбента, нанесенный на стеклянную или металлическую подложку. Каплю анализируемой смеси наносят в углу на лист бумаги или пластинку, а противоположный край листа опускается в смесь растворителей. Продвигаясь по капиллярам через хроматограмму, растворитель выполняет необходимое разделение. Примеры хроматограмм показаны на фото 3 и фиг. 31. Не все пятна, появляющиеся на хроматограмме после обработки, соответствуют каждому какому-либо одному компоненту. Можно произвести дальнейшее разделение, повернув хроматограмму на  $90^\circ$  и пропуская другую смесь растворителей в направлении, перпендикулярном первоначальному. Это так называемая *двумерная хроматография*.

Комбинируя разные системы растворителей и адсорбенты, удается разделять многие нелетучие соединения, которые раньше разделить не удавалось. Точный контроль условий эксперимента позволяет определять неизвестные соединения, сравнивая их относительную подвижность с подвижностью известных веществ.

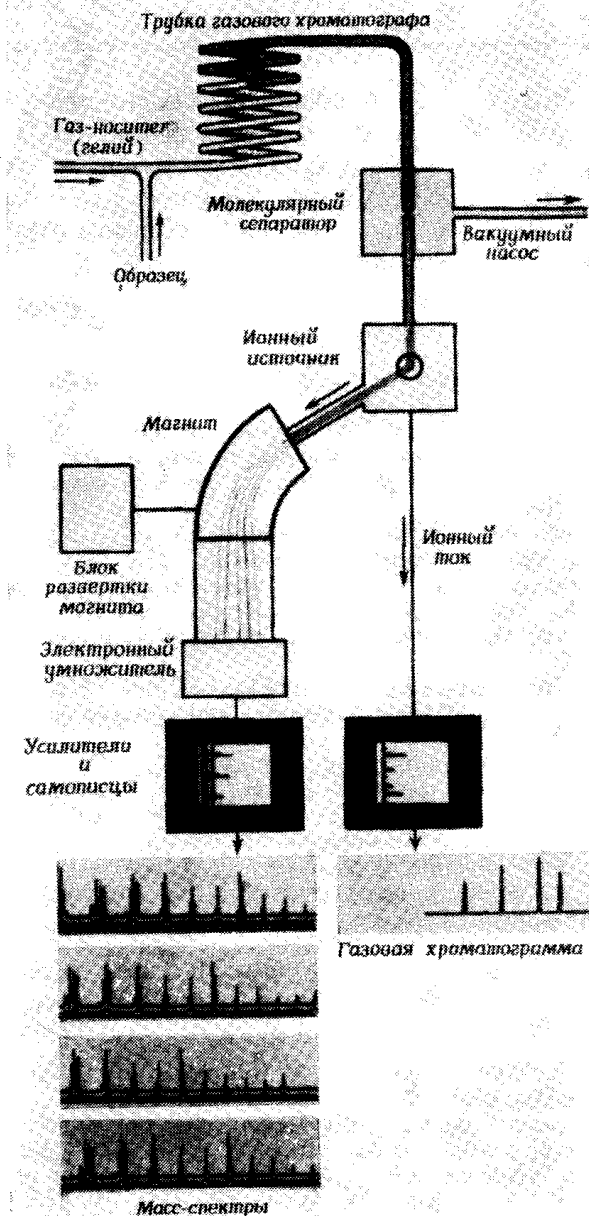
Газовая хроматография, называемая также парофазной и газо-жидкостной, отличается от жидкостной тем, что подвижная газовая фаза проходит через колонку, заполненную твердыми зернами, покрытыми пленкой нелетучей в условиях опыта жидкости. Пропускаемый газ — смесь газа-носителя и анализируемого вещества. Пленка жидкости, нанесенной на зерна, должна задерживать газообразные соединения, идущие через колонку, причем задерживает она их по-разному, в зависимости от их природы. Соединения, входящие в состав смеси, при этом разделяются, и их можно регистрировать или собирать на выходе колонки.

Газовая хроматография позволяет определять малейшие количества органических веществ — до  $10^{-12}$  г, а иногда и до  $10^{-22}$  г [40]. Она сыграла главную роль в обнаружении инсектицидов в нашей пище, о чем широкая публика узнала из книги Рэйчел Карсон «Безмолвная весна». В интересующей нас области газовая хроматография была успешно применена для обнаружения молекулярных ископаемых в очень древних докембрийских породах (см. гл. XII, разд. 10—12).

Детекторы, помещенные на выходе колонки, измеряют какое-либо физическое свойство вытекающего газа; при этом на бумажной ленте печатается цифровая информация. Таким образом, вместо пятен, получаемых при жидкостном методе, газовая хроматография дает нам диаграмму, на которой разным газам соответствуют отдельные пики (фиг. 58—60). Эти газообразные соединения, четко разделенные, можно собрать для дальнейшего анализа, например с помощью масс-спектрографа (фиг. 64 и 66).

Часто применяют пламенно-ионизационный детектор. Он основан на измерении электропроводности пламени водородной горелки, в котором сжигают часть газа, выходящего из колонки. Если выходит только газ-носитель, то электропроводность пламени равна нулю. При появлении других веществ, смешанных с носителем (как говорят химики, элюированных им), в пламени появляются ионизованные частицы и на диаграмме отмечается пик проводимости. Время, через которое появляется такой пик, — очень важный параметр, часто позволяющий идентифицировать данное соединение. Площадь пика на диаграмме соответствует количеству данного компонента.

В гл. III, разд. 10 мы уже познакомились с *масс-спектрометром* и *масс-спектрографом*. Эти приборы позволяют точно определять массу данного атома или молекулы. Теперь они приобрели большое значение для органической химии, так как с их помощью можно определять молекулярные массы отдельных субъединиц органических макромолекул. Метод основан на том, что многие крупные молекулы в ионизованном состоянии нестабильны. Они распадаются на фрагменты, которые тоже можно ионизовать. Эти заряженные частицы, как обычно, ускоряются магнитным полем



Фиг. 36. Схема комбинированной установки из газо-жидкостного хроматографа с масс-спектрометром [7].

Пробу смешивают с газом-носителем и разделяют на колонке хроматографа (вверху). Пройдя затем через сепаратор и ионный источник, исследуемое вещество делится на два потока. Один (справа) идет прямо на самописец, регистрирующий ионный ток; этот самописец по техническим соображениям используется здесь вместо пламенно-ионизационного детектора. Другой поток идет в масс-спектрометр (слева), где исходные молекулы распадаются на составные части, специфичные для каждого типа молекул. Таким образом, для молекул разного типа получают разные кривые — внизу приведены четыре примера масс-спектров. Меняя напряженность магнитного поля, можно изменять путь пучка ионизованных молекул и продуктов их распада. За это ответствен блок магнитной развертки. Пучки ионизованных молекул разной массы один за другим падают на щель электронного умножителя и дают на диаграмме отдельные пики.

прибора, разделяются и идентифицируются по отношению их массы к заряду. Самописец отмечает массы различных ионизованных фрагментов и их концентрации, соответствующие пикам различной высоты (фиг. 64, 66). В конечном счете мы можем мысленно собрать разные фрагменты, узнав таким образом строение интересующей нас исходной молекулы.

#### Список литературы

1. *Abelson Ph. H.*, Chemical events on the primitive earth, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 55, 1365—1372 (1966).
2. *Bernal J. D.*, The Origin of Life, Weidenfeld and Nicolson, London, 345, 1967 (Джон Бернал, Возникновение жизни, изд-во «Мир», М., 1969).
3. *Calvin M.*, Chemical evolution, Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A, 288, 441—466 (1965).
4. *Calvin M.*, Chemical Evolution, Clarendon, Oxford, 278 pp., 1969 (М. Кальвин, Химическая эволюция, изд-во «Мир», М., 1971).
5. *Craford B., Jr.*, Chemical analysis by infrared, Sci. Am., 189, 8 pp. (1953).
6. *Eck R. V., Lipincott E. R., Dayhoff M. O., Pratt Y. T.*, Thermodynamic equilibrium and the inorganic origin of organic compounds, Science, 153, 628—633 (1966).
7. *Eglinton G., Calvin M.*, Chemical fossils, Sci. Am., 216 (1), 32—43 (1967).
8. *Fox S. W.*, A theory of macromolecular and cellular origins, Nature, 205, 328—340 (1965).
9. *Fox S. W.*, Simulated natural experiments in spontaneous organization of morphological units from proteinoid. In: S. W. Fox (Editor), The Origins of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., pp. 361—373, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», М., 1966).
10. *Fox S. W.*, Experiments suggesting evolution to protein. In: V. Bryson and H. J. Vogel (Editors), Evolving Genes and Proteins, Academic Press, New York, N. Y., 359—370, 1965.
11. *Fox S. W.*, Self-assembly of the protocell from a self-ordered polymer, J. Sci. Ind. Res., 27, 267—274 (1968).
12. *Fox S. W.*, A new view of the «synthesis of life», Quart. J. Florida Acad. Sci., 31, 1—15 (1968).
13. *Fox S. W.*, Spontaneous generation, the origin of life and self assembly, Currents Modern Biol., 2, 235—240 (1968).
14. *Fox S. W., Krampitz G.*, Catalytic decomposition of glucose in aqueous solution by thermal proteinoids, Nature, 203, 1362—1364 (1964).
15. *Fox S. W., Waehneltd T. V.*, The thermal synthesis of neutral and basic proteinoids, Biochim. Biophys. Acta, 160, 246—249 (1968).
16. *Fox S. W., Wang C. T.*, Melanocyte-stimulating hormone: Activity in thermal polymers of alpha-amino acids, Science, 160, 547—548 (1968).
17. *Fru-ton J. S., Simmonds S.*, General Biochemistry, 2nd ed., Wiley, New York, N. Y., 1077 pp., 1958.
18. *Gray G. W.*, Electrophoresis, Sci. Am., 185, 11 (1951).
19. *Groth W., von Weyssenhoff H.*, Photochemische Bildung organischer Verbindungen aus Mischungen einfacher Gase, Ann. Phys., 4, 69—77 (1959).
20. *Haggis G. H.* (Editor), Molecular Biology, Wiley, New York, N. Y., 401, 1964.
21. *Harada K., Fox S. W.*, Thermal synthesis of natural amino-acids from a postulated primitive terrestrial atmosphere, Nature, 201, 335—336 (1964).
22. *Huntress W. T., Jr., Baldeschwieler J. D., Ponnampereuma C.*, Ion-molecule reactions in hydrogen cyanide, Nature, 223, 468—471 (1969).

23. *Keller R. A.*, Gas chromatography, Sci. Am., 205, 11 (1961).
24. *Mathews C. N., Moser R. E.*, Peptide synthesis from hydrogen-cyanide and water, Nature, 215, 1230—1234 (1968).
25. *Miller S. L.*, Formation of Organic Compounds on the Primitive Earth. In: Опарин А. И. (ред.), The Origin of Life on Earth, Pergamon, London, 123—135, 1959.
26. *Meister A.*, Biochemistry of the Amino Acids, 2nd ed., Academic Press, New York, N. Y., 1, 119, 1965 (Имеется перевод 1-го издания: А. Майстер, Биохимия аминокислот, ИЛ, М., 1961).
27. *Опарин А. И.*, Пути начального формирования обмена веществ и искусственное моделирование этого формирования в коацерватных каплях. In: S. W. Fox (Editor), Origins of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 331—341, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 335, М., 1966).
28. *Oró J.*, Investigation of organo-chemical evolution. In: G. Mamikunian and M. H. Briggs (Editors), Current Aspects of Exobiology, Pergamon, London, 13—76, 1965.
29. *Oró J.*, Prebiological organic systems. In: S. W. Fox (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 137—162, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 144, М., 1966).
30. *Pauling L.*, College Chemistry, 3rd ed., Freeman, San Francisco, Calif., 832 pp., 1964.
31. *Ponnampereuma C.*, Abiological synthesis of some nucleic acid constituents. In: S. W. Fox (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 221—236, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 224, М., 1966).
32. *Ponnampereuma C., Gabel N. W.*, Prebiological synthesis of organic compounds. In: A. Renbaum and R. F. Landell (Editors), Chemistry in Space Research, 1969.
33. *Ponnampereuma C., Mack R.*, Nucleotide synthesis under possible primitive earth conditions, Science, 148, 1221—1223 (1965).
34. *Ponnampereuma C., Peterson E.*, Peptide synthesis from amino acids in aqueous solution, Science, 147, 1572—1573 (1965).
35. *Rabinowitz J. S., Chang S., Ponnampereuma C.*, Phosphorylation of inorganic phosphate as a potential prebiotic process, Nature, 218, 442—443 (1968).
36. *Schwartz A., Ponnampereuma C.*, Phosphorylation of adenosine with linear polyphosphate salts in aqueous solution, Nature, 218, 443 (1968).
37. *Stein W. H., Moore S.*, Chromatography, Sci. Am., 184, 9 pp. (1951).
38. *Steinman G.*, Sequence generation in prebiological peptide systems, Arch. Biochem. Biophys., 121, 533—539 (1967).
39. *Steinman G., Smith A. E., Silver J. J.*, Synthesis of a sulfur-containing amino acid under simulated prebiotic conditions, Science, 159, 1108—1109 (1968).
40. *Supina W. R., Henley R. S.*, Gas chromatography-snooper par excellence, Chemistry, 37, 12—17 (1964).
41. *Waehneltd T. V., Fox S. W.*, The binding of basic proteinoids with organic or thermally synthesized polynucleotides, Biochem. Biophys. Acta, 160, 239—245 (1968).
42. *Willard H. H., Merritt L. L., Dean J. A.*, Instrumental methods of analysis, 3rd ed., Van Nostrand, Princeton, N. J., 626 pp., 1958.
43. *Wilson A. T.*, Synthesis of macromolecules, Nature, 188, 1007—1009 (1960).
44. *Young R. S., Ponnampereuma C.*, Early evolution of life, B. S. C. S. Pamphlets, Heath, Boston, 11, 29, 1964.

## СТАДИИ БИОПОЭЗА

## 1. ВВЕДЕНИЕ

*Биопоэз* — термин, предложенный Берналом [1, 2, 3] для процесса перехода от неживого к живому. Хотя другие авторы чаще используют термин *биоогенез*, я предпочитаю сохранить термин Бернала. Во всяком случае, я сохраняю его в этой главе, в которой мы рассмотрим цепь событий, приведшую к переходу от неживого к живому. В предыдущей главе речь шла о разнообразных экспериментах, касающихся возможности образования «органических» молекул в результате неорганических процессов, идущих в условиях первичной атмосферы. Главный вывод из этих экспериментов таков: существует много способов возникновения таких молекул.

Сам факт, что уже продемонстрировано несколько возможных реакций, приводящих к образованию «органического» вещества, доказывает, что такие процессы были в условиях первичной атмосферы отнюдь не единичными, редкими событиями. Мы еще не знаем, какой набор условий среды какому процессу благоприятствовал; не исключено, что эти процессы могли идти одновременно. Но, во всяком случае, такие реакции в условиях первичной атмосферы были, очевидно, обычным явлением. Возвращаясь к сравнению с дождем и кристаллами соли (гл. IV, разд. 8), мы скажем, что образование органических молекул в те времена было таким же повседневным явлением, как в наши дни образование дождевых капель, кристаллов соли или ржавление железа.

Видимо, следующим шагом биопоэза было образование из продуктов неорганических реакций, протекавших на первой стадии, различных полимеров, таких, как полипептиды и нуклеиновые кислоты. Эксперименты, описанные в предыдущей главе, показали, что такие реакции вполне возможны и без участия организмов. Вполне вероятно и дальнейшая неорганическая полимеризация в белки и другие крупные молекулы.

Следующим шагом в возникновении жизни является объединение таких «органических» молекул в дискретные группы с образованием частиц более крупного, но все еще микроскопического размера. Этот процесс, долго остававшийся загадочным, получил название *коацервации*. Мы увидим, что современная наука добилась многообещающих успехов и в изучении этого процесса.

Каждый живой организм обладает оболочкой, защищающей его от вредных воздействий внешнего мира. Следующий шаг био-

поэза — формирование оболочек, или *мембран*, вокруг образовавшихся ранее частиц.

У современных организмов такие оболочки часто очень сложны по своей структуре и функции. На заре развития жизни мембраны были, видимо, устроены гораздо проще. Далее мы увидим, что предложены возможные способы образования простых мембран посредством неорганических процессов. Не исключено, что первые мембраны возникли уже на очень ранних стадиях биопоэза.

Дальнейшей стадией биопоэза должно было стать появление *метаболизма*. Как мы увидим далее, вначале метаболизм мог быть малоэффективным процессом и лишь постепенно развился в современный сложный и эффективный процесс.

Теперь, чтобы заслужить название живого, такой предбиологический материал, организованный в структурные единицы, покрытые мембранами, должен был начать *воспроизводиться*. Это следующая стадия биопоэза. Отдельные механизмы воспроизведения могли существовать и ранее. Воспроизведение могло идти и в безмембранных химических системах. Но только в группе молекул, под защитой мембраны, смогла произойти общая координация механизмов воспроизведения в один процесс, направленный к общей цели. Конечно, это достижение надо считать одной из важнейших стадий перехода от неживого к живому.

Такое деление на несколько стадий не означает, что Бернал представлял себе переход от неживого к живому как процесс прерывистый. И все же, хотя процесс был плавным и разные его стадии могли даже проходить одновременно, в этом развитии есть некая ступенчатость. Как мы видели, для того чтобы началось образование простейших молекул, нужно, чтобы уже существовали атомы водорода, углерода, кислорода, азота и других элементов. Только тогда может начаться синтез «органических» молекул. Далее, только после конденсации и последующей полимеризации сможет начаться образование более крупных структурных единиц. Лишь после этого может идти коацервация, формирование мембран, могут появиться процессы воспроизведения и метаболизма. Более того, как уже указывалось в предыдущей главе, условия среды, приводящие к каждой стадии, различаются между собой. Об этом мы и поговорим в настоящей главе. Введение к ней можно заключить таблицей, иллюстрирующей идеи Бернала (табл. 9) [2].

## 2. НЕОРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МАЛЫХ И БОЛЕЕ КРУПНЫХ «ОРГАНИЧЕСКИХ» МОЛЕКУЛ

Первые две стадии биопоэза — образование малых «органических» молекул в неорганических реакциях и их конденсация и полимеризация в более крупные молекулы — уже обсуждались в гл. VI, и здесь мы их не будем касаться.

Структурная единица	Природа связей	Приблизительная молекулярная масса	Приблизительные размеры	Примеры
Простая молекула (номер)	Гомеополлярные связи	50—200	1 нм <sup>3</sup>	Аминокислоты, пурины, порфирины, сахара, липиды
Линейный полимер (гомо- или гетеро-)	То же	1 000—100 000	0,5×1×100 нм	Фиброин шелка, β-тип, денатурированные белки, целлюлоза, каучук
Спиральный полимер	Водородные или дисульфидные связи	То же	1×1×50 нм	Спиральный фибриллярный белок, α-тип, дезоксирибонуклеиновая кислота
Изогнутый или свернутый в спираль второго порядка полимер; Глобулярные частицы	То же	10 000—100 000	(5 нм) <sup>3</sup>	Меньшие глобулярные белки, рибонуклеаза
Гомогенные агломерированные частицы; двойные волокна	Ионные или криогидрические силы	50 000—1 000 000	(10 нм) <sup>3</sup> 2×2×100 нм <sup>3</sup>	Более крупные глобулярные белки, гемоглобин, глобулины семян, гемодинаин, фибриллярный инсулин, коллаген
Гетерогенные агломерированные частицы или агрегаты волокон	То же	10 000 000	(20 нм) <sup>3</sup> 10×10×500 нм	Нуклеопротеиды, липопротеиды, мукопротеиды и т. д., мелкие вирусы

Показано, что в искусственной бескислородной среде идет неорганический синтез «органических» соединений, но подобные опыты с кислородными средами дали только отрицательные результаты [17]. Возможно, синтез останавливается из-за того, что окисление разрушает образующиеся продукты; допустимы и другие объяснения. Во всяком случае, ясно, что для развития жизни была необходима первичная бескислородная атмосфера. Как мы видели, в такой атмосфере важным фактором становится коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца. Определенную роль сыграли и другие источники энергии, но для краткости я буду здесь подразумевать под словами «коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца» все виды энергии, доступные в то время.

Надо также запомнить, что появление более крупных «органических» молекул — важное событие в переходе от преджизни к жизни — было многоступенчатым процессом. Мы не можем считать вероятным внезапное появление «голового» гена или единичной молекулы белка. Только соединения, возникавшие в очень больших количествах, могли стать основой для дальнейшего развития.

Химические процессы преджизни могут показаться до смешного простыми в сравнении с биохимическими процессами современной жизни, имеющей за плечами около 3 млрд. лет эволюции — мутирования и естественного отбора. Химические процессы преджизни не могут обеспечить выживания в современных условиях, но более 3 млрд. лет назад, в условиях гораздо менее сложной среды, они были очень важны в этом отношении.

Можно привести пример подобной ситуации. В 1962 году Кальвин изучал разложение перекиси водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) — обычного продукта, образующегося при облучении воды ультрафиолетом, — ферментом каталазой (см. [8]). Акво-ион трехвалентного железа способен расщеплять H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> — это чисто неорганический процесс. Его активность, однако, очень невелика по сравнению с активностью гема или фермента. Ион железа способен расщеплять всего 10<sup>-5</sup> моль в 1 с. Если этот ион включен в органическую молекулу порфирина (фиг. 41), то его активность возрастает в 1000 раз. Если же молекула порфирина соединена с белковой частью молекулы фермента каталазы, то активность иона трехвалентного железа возрастает в 10 млрд. раз. В современных условиях разложение перекиси водорода акво-ионом железа не имеет никакого значения, но этот неорганический процесс мог играть важную и даже очень важную роль в эпоху преджизни, когда еще не существовало таких органических соединений, как гем и ферменты.

Прежде чем двинуться дальше, мы должны еще раз подчеркнуть, что в неорганическом синтезе «органических» веществ могут использоваться самые разные источники энергии. Если для синтеза малых «органических» молекул, по-видимому, непременно



нужны высокоэнергетические воздействия — ультрафиолетовое излучение, электрические разряды (в природе — молнии), то объединение этих молекул в более крупные может идти при участии не таких мощных источников энергии, например за счет тепла и химической энергии (вспомним о роли цианида и дицианамиды, гл. VI, разд. 7). Похоже, что если синтез малых «органических» молекул шел на поверхности Земли под действием ультрафиолета или молний, то конденсация их в более крупные «органические» молекулы происходила в совершенно иных средах, защищенных от таких жестких воздействий. Разумно было бы предположить, что именно в таких средах и состоялся переход от преджизни к жизни.

В заключение можно процитировать Раувса, который еще в 1964 году, в обзоре работ по предбиологической органической химии [26], написанном на малораспространенном голландском языке и потому не получившем широкой известности, подчеркнул, что эксперименты доказали принципиальное единство всех соединений углерода — и «органических», и органических — с другими химическими соединениями. Согласно Раувсу, дальнейшие эксперименты принесут лишь новые подробности, но новых фундаментальных положений ожидать от них нельзя. Главный результат этих опытов — доказательство возможности неорганического синтеза «органических» соединений.

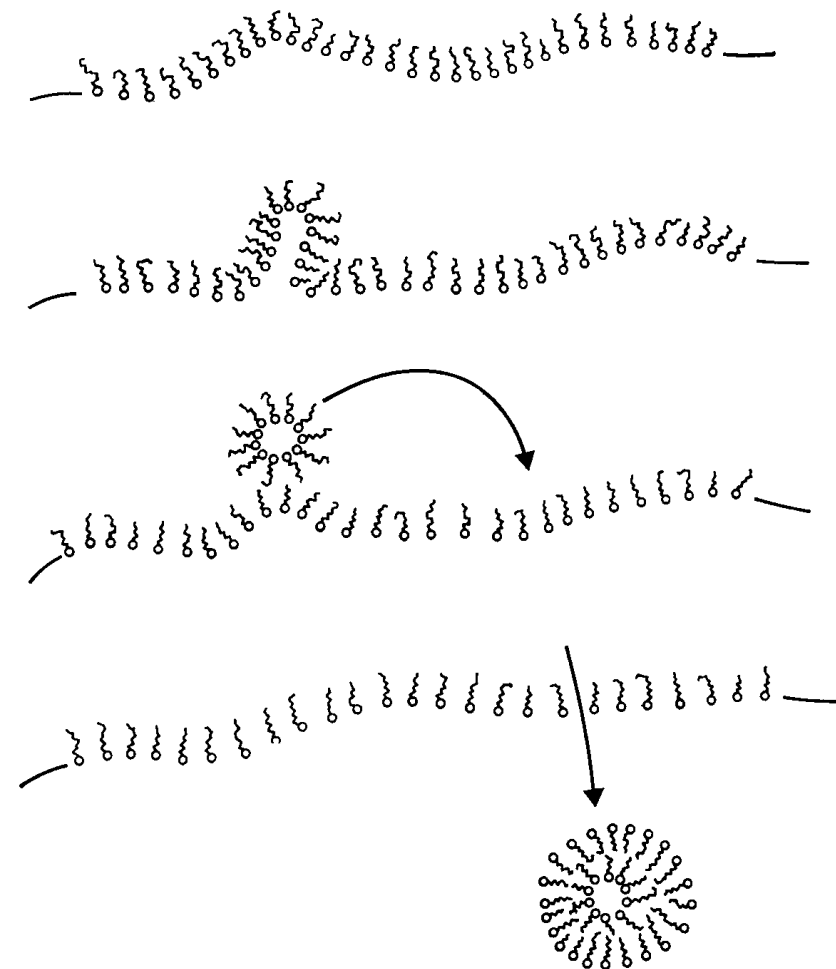
Теперь мы можем заняться рассмотрением сложных взаимодействий между этими соединениями, динамикой их структуры и метаболической (впрочем, поскольку речь идет о преджизни, — «метаболической») активностью.

### 3. КОАЦЕРВАЦИЯ

Как уже сказано во введении к этой главе, эта стадия биопоэза менее понятна, чем предыдущие. На этой стадии «органические» макромолекулы, образовавшиеся ранее в неорганических процессах, собираются в мелкие частицы. Голландский химик Бунгенберг де Йонг [6] давно уже предложил называть этот процесс *коацервацией*. Хотя термин широко использовался, его смысл до сих пор остается недостаточно четко определенным.

Возможно, это объясняется сложностью природы коацерватных частиц. Среди них трудно найти две одинаковые по размеру, массе или составу. Химику это кажется ужасным — ведь он привык путем анализа точно устанавливать свойства исследуемого вещества. К тому же коацерваты часто выглядят как синеватые или темные клейкие, резиноподобные вещества довольно отталкивающего вида. Пири [25] говорит о них как об «отходах, возникающих в тех случаях, когда мы (неискушенные химики) пытаемся получить что-нибудь согласно указаниям учебников». Статьи

Блуа [5] о беспорядочных полимерах и Опарина [23] о реакциях обмена в коацерватных каплях дают ясное представление о трудностях экспериментирования в этой области.

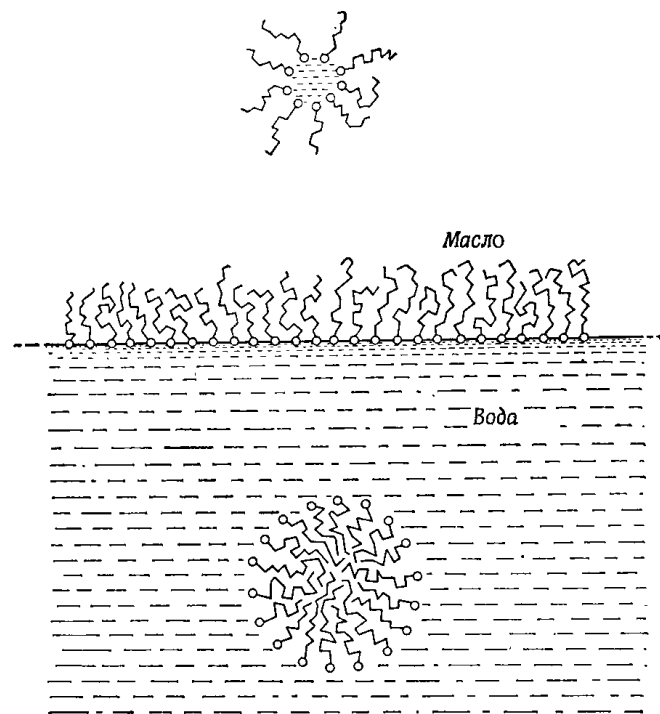


Фиг. 37. Образование коацерватных капелек из мономолекулярного слоя полярных молекул липидов на поверхности раздела воздух — вода под действием волнения воды.

Кружок — полярный конец молекулы, зигзагообразный «хвост» — неполярный конец. Молекулы липидов полярны, у них есть полярный и неполярный концы. Другие молекулы с подобными свойствами должны вести себя примерно так же [19].

Недавно на проблему коацервации был пролит новый свет с несколько неожиданной стороны. В последнее десятилетие океанологи обнаружили, что взвешенное в виде частиц органическое вещество встречается в морской воде значительно чаще, чем считалось до сих пор. Впервые такие агрегаты были обнаружены в

проливе Лонг-Айленд. Сейчас показано, что они присутствуют не только в прибрежных водах, но и в открытом море. Райли ([27], см. также [30]) сообщает, что такие агрегаты имеют вид тонких пластинок от 5 мкм до нескольких миллиметров в диаметре. Опытным путем найдено, что такие частицы можно получить, пропуская через морскую воду пузырьки воздуха. Поэтому считают, что вспенивание играет основную роль в образовании этих агрегатов и,



Фиг. 38. Расположение полярных молекул в коацерватных капельках в воде и в масле, а также расположение молекул в мономолекулярном слое на поверхности раздела масло — вода [19].

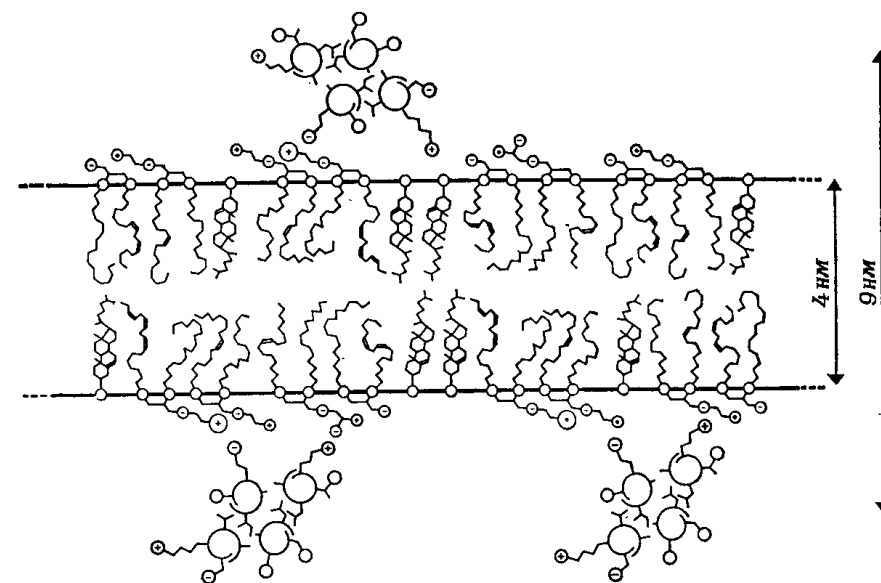
следовательно, в процессе коацервации этого типа. Пузырьки воздуха постоянно возникают во всех природных водоемах при волнении воды под действием ветра.

Считается, что в коацервации такого типа могут принимать участие поляризованные молекулы, имеющие на концах полярные и неполярные группы, например мыла, стероиды и т. п. Такие молекулы обладают поверхностно-активными свойствами, они стремятся образовать на поверхности воды пленку толщиной в одну молекулу. Выражаясь научным языком, на поверхности раздела воздух — жидкость возникают мономолекулярные пленки, кото-

рые разрушаются под действием волн. Молекулы в капельках, вырванных из пленки, стремятся перестроиться в сферическое тело, размещаясь в нем радиально, полярными концами наружу (фиг. 37, 38). Падая обратно в воду, такие капельки могут пробивать поверхностную пленку и оставаться погруженными в виде мелких коацерватных капелек.

#### 4. ОБРАЗОВАНИЕ МЕМБРАН

Другим, по-видимому, достаточно близким по времени этапом было образование мембран. Благодаря мембранам живое вещество может отличаться по составу и энергетическому уровню от окру-



Фиг. 39. Схематическое изображение двух мономолекулярных слоев полярных молекул, играющих роль мембраны, с адсорбированными на них глобулярными молекулами белка (при этом структура белковых молекул не изменяется).

Мономолекулярные слои, образующие мембрану, сложены из однотипных строительных блоков. Каждый такой блок состоит из двух молекул липида и одной молекулы холестерина. Такое строение выработалось в процессе органической эволюции; оно не является абсолютно необходимым для функционирования мембраны. Любая пленка полярных молекул может служить мембраной, если она не препятствует диффузии некоторых молекул [19].

жающей среды. Например, осмотическое давление жидкостей тела большинства позвоночных близко к осмотическому давлению морской воды независимо от того, обитает животное в море, на суше или в пресной воде. На заре развития жизни мембраны были, конечно, не такими сложными, как теперь. Все же уже на самых ранних стадиях развития метаболизма должна была в ка-

кой-то форме проявляться активность, родственная той, которая свойственна мембранам. Ведь метаболизм всегда изменяет концентрацию одного или нескольких веществ, отчего и возникает различие между составом внешней и внутренней среды.

Это различие сохраняется благодаря важному свойству мембран: они обычно устроены так, что пропускают одни молекулы и задерживают другие. Данное свойство мембран определяется в основном размерами или электрическим зарядом (или тем и другим вместе) молекул, составляющих мембрану. Такие мембраны называются *полупроницаемыми*; в результате их функционирования возникает разница осмотических давлений по обе стороны мембраны.

Полагают, что образование примитивных мембран было в принципе сходно с образованием коацерватных капель. Оно могло начаться с выстраивания полярных молекул на поверхности раздела воздух — вода или липид — вода. Современные клеточные мембраны сложены из двойных мономолекулярных слоев липидов. Липиды играют главную роль в современных мембранах, хотя известны и нелипидные мембраны. Схема строения липидной мембраны показана на фиг. 39.

## 5. МЕТАБОЛИЗМ

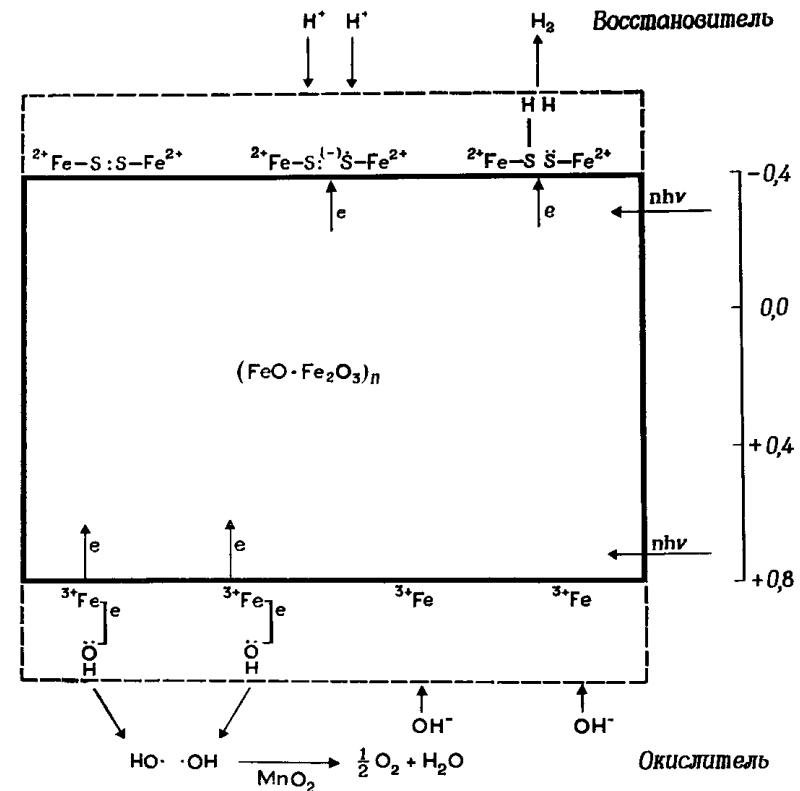
Коль скоро образовались мембраны, может уже идти метаболизм. В принципе это не что иное, как поглощение и выделение с промежуточной реакцией (или цепью реакций), превращающей поглощенную пищу в подлежащие выделению отбросы. Дыхание — это поглощение кислорода и выделение двуокиси углерода.

У современных организмов эти два акта разделены довольно сложной цепью реакций. Но сходные по своей сути очень простые реакции могли бы происходить уже с абиогенными соединениями на молекулярном уровне. На фиг. 39 схематически показано, как это могло бы выглядеть. Крупные глобулярные молекулы, адсорбированные мембраной, легко могут отдавать какую-либо свою группу ближайшей полярной молекуле, а та передает ее соседней молекуле.

Более сложную модель предложил Граник [18]; эта модель показывает, что процессы, родственные органическому фотосинтезу и дыханию, могут происходить уже на молекулярном уровне организации. В модель Граника, названную им «фотогальваническая минеральная ячейка», входят составные части «первичного бульона» и его субстрата — первобытной земной коры. Предполагается, что в этой системе могли бы протекать простые реакции, сходные или с фотосинтезом, или с дыханием, смотря по тому, какие «органические» соединения вступают с ней в контакт. Таким образом, она могла бы служить неорганическим поставщиком энер-

гии, предшественником более эффективных и более специализированных органических реакций, свойственных ранней жизни (фиг. 40).

Хотя в подобные процессы вовлекается гораздо меньше энергии, чем в современные процессы обмена, такие переносы энергии могли иметь большое значение в тот момент, когда реакции из беспорядочных превратились в упорядоченные.



Фиг. 40. «Фотогальваническая модель» Граника [18].

Она поясняет, каким образом основные реакции, характерные для фотосинтеза и дыхания, — восстановление и окисление — могли выполняться минералами, присутствующими на поверхности Земли. Здесь рассматривается довольно распространенный минерал магнетит ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) с примесями. В кристаллической решетке магнетита ионы двухвалентного и трехвалентного железа расположены особым образом, благодаря чему он может играть роль ловушки электронов. Кроме того, магнетит легко поглощает свет, т. е. энергию, и обладает свойствами полупроводника. Если на поверхности этого минерала адсорбирован тонкий слой других веществ, что вполне обычно, то, поглощая солнечный свет, магнетит будет действовать как восстановитель или как поглотитель. Первая возможность показана в верхней части схемы. Здесь магнетит покрыт монослоем  $\text{FeS}$  и  $\text{FeS}_2$ . Падающая световые кванты должны вызвать движение электронов ( $e$ ) к поверхности магнетита. Как видно на схеме, группы  $\text{S}-\text{S}$  будут восстанавливаться до  $\text{SH}$  с последующим высвобождением водорода ( $\text{H}_2$ ). Нижняя поверхность магнетита покрыта монослоем гидроксида трехвалентного железа с небольшим количеством окиси марганца ( $\text{MnO}_2$ ). При поглощении квантов света этим темноокрашенным слоем электроны должны переходить от ионов гидроксила через ионы железа вверх, т. е. внутрь кристалла магнетита. В результате гидроксил-ионы окисляются и образуется вода.

Итак, вполне возможно, что простые молекулярные реакции поглощения и выделения могли быть обычными уже на молекулярном уровне при наличии крупных полимеров и полярных молекул; однако дальнейшее развитие предполагало возникновение некой координации реакций. Можно принять, что среда создавала давление отбора на такие простые молекулярные реакции, благоприятствовавшее некоторым из них, как происходит и сейчас с признаками, подверженными отбору. Но мы пока не представляем себе, как конкретно мог действовать такой механизм.

Таким образом, хотя постепенное развитие метаболизма кажется теоретикам, например Опарину и Берналу, вполне возможным, моделирование такого развития *in vitro* все еще остается камнем преткновения для экспериментаторов.

## 6. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ (РЕДУПЛИКАЦИЯ)

Последняя стадия биопоэза — приобретение способности к воспроизведению, благодаря которому жизнь может продолжать сама себя. Как и другие свойства современной жизни, эта способность кажется слишком сложным процессом, и трудно поверить, что она постепенно, шаг за шагом развилась из простых «неживых» реакций. Но если мы хотим понять, каким образом возникла жизнь, мы должны исследовать как раз эти простые стадии.

Бернал [4] особо подчеркивает, что для многих биохимиков жизнь начинается там, где появляются рибонуклеиновая и дезоксирибонуклеиновая кислоты, в которых теперь хранится наследственная информация, нужная для воспроизведения. Ведь большая часть биохимической литературы обсуждает процессы воспроизведения, идущие именно на этом уровне, процессы, связанные с генетическим кодом, и т. п. Берналу, кристаллографу по специальности, более интересными кажутся события, происходившие на самых ранних стадиях развития жизни. Он подчеркивает, что размножение — более распространенный процесс, чем считают обычно, и что оно тем или иным способом могло идти уже на ранних стадиях.

Согласно Берналу, основной принцип размножения уже действует в процессе кристаллизации, когда молекулы кристалла последовательно и регулярно взаимодействуют с атомами и ионами маточного раствора.

Для воспроизведения некоего объекта необходимо, чтобы копируемый объект был доступен для атомов или малых молекул, которые, соединяясь, образуют его копию. Значит, этот объект должен быть линейным или плоскостным. Предположим для простоты, что копируемая молекула построена из ряда субъединиц, расположенных одна за другой. Такая молекула, как мы уже знаем, называется *линейным полимером*. Поскольку жизнь связана с такими

процессами, как рост и метаболизм, организм должен при воспроизведении передавать потомкам информацию об этих процессах. Но полимер, сложенный из одинаковых строительных блоков, не может нести такой информации. Ведь чтобы слова, например, имели смысл, они должны состоять из разных субъединиц — букв. Полимер, способный к тому типу воспроизведения, о котором мы говорим, тоже должен состоять из последовательности *разных* строительных блоков. Такая молекула называется *линейным гетерополимером* [11, 24].

Бернал подчеркивает, что по законам кристаллографии такая молекула станет более устойчивой, если она будет спирально скручена. Поэтому вероятно, что уже самые примитивные линейные гетерополимеры, участвовавшие в примитивных процессах воспроизведения, имели спиральную структуру, свойственную более совершенным нуклеиновым кислотам, носителям генетической информации у современных организмов.

Подтверждение этим идеям можно найти у Кальвина [7], который рассказывает о спирализованных пептидных цепях, составляющих белки (фиг. 16). Оказалось, что если заставить такую цепь развернуться (например, меняя температуру или pH), то при возвращении к прежним условиям она свертывается в точности по-старому. Значит, спиральная скрученность линейных полимеров не является каким-то особым свойством, присущим только жизни, — она зависит от термодинамических свойств полимеров.

Можно привести много примеров такого самовосстановления «испорченных» органических макромолекул — не только структурных белков, но и ферментов, а также небелковых соединений (пигментов). Полный обзор вопроса можно найти в последней книге Кальвина [8]. Но все это относится к трехмерной структуре этих полимеров, точнее, гетерополимеров. А какова их основная, *первичная* структура? Существует ли в последовательности их строительных блоков определенный порядок или полимерная нить представляет собой цепь беспорядочно, случайно соединенных субъединиц? В современных органических полимерах, как всем известно, всегда существует строгая упорядоченность. О двойной спирали, о генетическом коде слышали, конечно, все. Так вот, Фокс и сотр. [13—15] показали, что уже в полученных ими искусственных протеиноидах (см. гл. VI, разд. 6) отмечается хорошо выраженная упорядоченность последовательности аминокислот и их амидов.

Я не буду входить в химические подробности этого вопроса (читатель может ознакомиться с ними по цитированным работам), но здесь важно запомнить, что эта упорядоченность строения протеиноидов может быть доказана их «разборкой» и анализом полученных компонентов. Существенно то, что эти упорядоченные по-

лимеры синтезированы неорганическим путем, в отсутствие нуклеиновых кислот. Значит, уже в эпоху преджизни могли синтезироваться упорядоченные полимеры, которые можно назвать *самоупорядоченными*, и из них могли формироваться белковоподобные соединения. Для этого не требовались живые организмы или нуклеиновые кислоты. Такая упорядоченность, видимо, может быть объяснена на основе трехмерной структуры и электронной конфигурации молекул аминокислот [12].

Последнее соображение особенно важно для тех, кто не склонен считать предложенные Фоксом условия среды (дождевая вода в действующем вулкане) слишком подходящими для возникновения жизни (см. гл. VI, разд. 7). Ведь если упорядоченность зависит от объемной структуры и электронной конфигурации аминокислот, то она возникнет в любой среде — и в горячей, предлагаемой Фоксом, и в водной с присутствием цианистого водорода или дицианамидом, по Кальвину. Так что мы можем спокойно использовать результаты, полученные Фоксом в опытах со средами, более удобными в эксперименте, чем предлагаемые другими химиками, и переносить эти результаты на другие среды, которые кажутся более подходящими геологу.

Со временем могли начаться реакции между неорганически синтезированным протеиноидом, или «предбелком», и нуклеотидами такого же происхождения. Так постепенно нуклеиновые кислоты могли приобрести свою главенствующую роль, свойственную им теперь. Исследования этого вопроса уже начались, их обзор можно найти у Фокса [14] (см. также [29, 32]). Недавно получено первое экспериментальное подтверждение возможности развития такой «пред-ДНК» [22]. При взаимодействии мононуклеотидов и полиаминокислот произошло образование кодона глицина — ГГГ, входящего в современный генетический код. С уверенностью можно сказать, что будут осуществлены и другие подобные синтезы.

#### 7. МУТАНТЫ ПРИОБРЕТАЮТ НОВУЮ СПОСОБНОСТЬ; ОРГАНИЧЕСКИЙ ФОТОСИНТЕЗ

И самая ранняя жизнь, и даже преджизнь уже имели своих мутантов. Ведь мутации — изменения — свойственны и «органическим», и истинным органическим макромолекулам. Хотя процесс мутирования еще не вполне понятен, видимо, он заключается в неких микроперестройках во время роста. Эти перестройки, очевидно, происходят под действием притока извне тепловой или лучистой энергии.

В наше время мутанты, по-видимому, образуются прежде всего в результате изменения последовательности азотистых оснований в молекуле нуклеиновой кислоты (см. [10, 16, 28]). Для нуклеиновых кислот характерна строго упорядоченная последовательность

разных азотистых оснований, различная у всех организмов. На этой последовательности основан генетический код, обеспечивающий при размножении точное воспроизведение. Если по какой-то случайности копирование прошло неточно, возникает мутант. Во времена ранней жизни, когда репродуктивные процессы еще не достигли современного совершенства, мутанты могли возникать вследствие других, более простых ошибок на молекулярном уровне.

Органический фотосинтез, т. е. процесс ассимиляции, основан в наши дни на очень сложных системах биохимических реакций [9]. Но нельзя забывать, что на формирование этого процесса из менее сложных и, следовательно, менее эффективных реакций растения затратили около 3 млрд. лет. О ранней стадии фотосинтеза, «первичном акте» Вассинка [31], особенно интересном для нас, мы до сих пор ничего не знаем.

Где-то когда-то в результате мутаций ранней жизни появились соединения, способные к органическому фотосинтезу, т. е. к органической ассимиляции. Они приобрели уникальную способность разлагать двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) на углерод (C) и свободный кислород ( $\text{O}_2$ )<sup>1</sup>. Углерод мог использоваться для создания органических веществ, нужных организму, а кислород уходил в атмосферу. Как сказано уже в гл. IV, результаты этого нового процесса позже стали поистине ошеломляющими (подробнее об этом — в гл. VIII—XV). Но надо проводить четкое различие между тем, что эта новая мутация дала самим организмам, и глобальными результатами фотосинтеза.

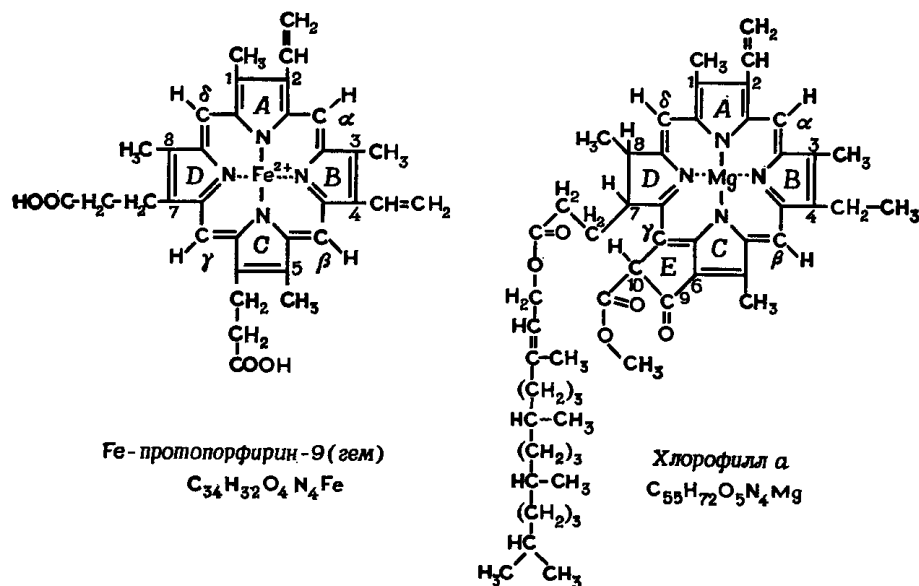
Для организмов, сумевших перейти к фотосинтезу, этот процесс стал богатым «поставщиком» энергии, превзошедшим в этом отношении все другие способы метаболизма. Ни одна реакция из тех, что идут без участия свободного кислорода, — брожение, восстановление нитратов, сульфатов и карбонатов — не может сравниться по выходу энергии с ассимиляцией двуокиси углерода. Этот новый образ жизни давал несомненные преимущества в борьбе за существование.

Глобальный результат органического фотосинтеза, — накопление в атмосфере свободного кислорода. Оно шло медленно, постепенно и заняло примерно 2 млрд. лет (гл. XVI). Тем не менее этот результат в конечном счете гораздо важнее, чем те преимущества, которые фотосинтез дал самим организмам. Благодаря фотосинтезу свободный кислород постепенно стал важным компонентом атмосферы.

<sup>1</sup> Автор несколько упрощенно изображает процесс фотосинтеза. Фактически  $\text{CO}_2$  не разлагается на C и  $\text{O}_2$ , а происходит восстановление  $\text{CO}_2$ , при котором вода служит донором водорода; выделяющийся  $\text{O}_2$  образуется из воды. — *Прим. ред.*

## 8. ДЫХАНИЕ

После того как в атмосфере накопилось достаточное количество кислорода, смог возникнуть процесс дыхания; по-видимому, это тоже произошло в результате мутации. Дыхание в некотором смысле противоположно фотосинтезу: в этом процессе двуокись углерода не разлагается, а образуется. С другой стороны, оно имеет



Фиг. 41. Структура гема и хлорофилла [18].

В центре этих сложных молекул находится атом металла, окруженный четырьмя атомами азота. В молекулу гема входит атом железа, а в молекулу хлорофилла — атом магния. Длинный «хвост» молекулы хлорофилла химически устойчив. Эта цепочка атомов способна более или менее полно сохраняться миллиарды лет. Именно она служит основой пристана и других соединений, входящих в состав молекулярных ископаемых (гл. XII, разд. 10—12).

много общего с фотосинтезом. Во-первых, дыхание тоже является высокоэнергетическим процессом обмена — оно дает гораздо больше энергии, чем, например, брожение. Во-вторых, дыхание и фотосинтез, приводящие к столь разным результатам, в наши дни осуществляются при участии очень схожих между собой сложных молекул — гема и хлорофилла (фиг. 41).

Всем современным аэробным существам — и животным, и растениям — свойственно дыхание<sup>1</sup>. Различие состоит в том, что у растений имеется и дыхание, и фотосинтез, а у животных — только

<sup>1</sup> Существует еще один тип окисления, в котором используется не молекулярный кислород, а кислород, высвобождаемый из окислов, например из окиси двухвалентного железа [21]. Значение этого типа окисления неясно.

ко дыхание. В жизни растений фотосинтез важнее, и они производят кислород в количестве, достаточном и для всего животного царства.

Из следующей главы мы узнаем, что для каждой группы животных существует некоторый критический уровень содержания кислорода, ниже которого свободное дыхание, а следовательно, сама жизнь становится для них невозможной. Бактериям достаточно гораздо меньших количеств кислорода, чем животным, — примерно 1% современного количества кислорода в атмосфере (21%). Более того, многие бактерии, так называемые *факультативные анаэробы*, способны в случае необходимости переключать свой обмен с дыхания на брожение. Это происходит при падении содержания кислорода до 1% современного атмосферного. Хотя не исключено, что дыхание появилось, когда в атмосфере было гораздо меньше свободного кислорода, — на такую возможность указывает «фотогальваническая модель» Граника [18], изображенная на фиг. 40, — все же при низком содержании кислорода, менее 1% современного, брожение и родственные процессы были, по-видимому, выгоднее дыхания. Поэтому для простоты можно принять, что дыхание возникло после того, как благодаря фотосинтезу содержание свободного кислорода в атмосфере дошло до этого критического уровня (гл. XV).

## Список литературы

1. Bernal J. D., The problem of stages in biopoiesis. In: Опарин А. И. (ред.), Origin of Life on the Earth, Pergamon, London, 38—53, 1959.
2. Bernal J. D., The scale of structural units in biopoiesis. In: Опарин А. И. (ред.), Origin of Life on the Earth, Pergamon, London, 385—399, 1959.
3. Bernal J. D., Origin of life on the shores of the ocean. In: M. Sears (Editor), Oceanography, Am. Assoc. Advan. Sci., Washington, D. C., 95—118, 1961.
4. Bernal J. D., Molecular matrices for living systems. In: S. W. Fox (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 65—88, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 76, М., 1966).
5. Blois M. S., Random polymers as a matrix for chemical evolution. In: S. W. Fox (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 19—33, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 27, М., 1966).
6. Bungenberg de Jong H. G., La coacervation, les coacervats et leur importance en biologie, Actualites Sci., Ind., 397, 398, Herman, Paris, 52—56, 1936.
7. Calvin M., Chemical evolution, Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A, 288, 441—466 (1965).
8. Calvin M., Chemical Evolution, Clarendon, Oxford, 278, 1969 (М. Кальвин, Химическая эволюция, изд-во «Мир», М., 1971).
9. Calvin M., Bassham J. A., The Photosynthesis of Carbon Compounds, Benjamin, New York, N. Y., 127, 1962.
10. Crick F. H. C., The genetic code. III, Sci. Am., 215 (4), 55—62 (1966).
11. Crick F. H. C., The origin of the genetic code, J. Mol. Biol., 38, 367—379 (1968).

12. Fox S. W. (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 482, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», М., 1966).
13. Fox S. W., Self-assembly of the proto-cell from a self-ordered polymer, J. Sci. Ind. Res., 27, 267—274 (1968).
14. Fox S. W., Self-ordered polymers and propagative cell-like systems, Naturwissenschaften, 56, 1—9 (1969).
15. Fox S. W., Nakashima T., Fractionation and characterization of an amidated thermal 1:1:1-proteinoid, Biochim. Biophys. Acta, 140, 155—167 (1967).
16. Freese E., Yoshida A., The role of mutations in evolution. In: V. Bryson and H. J. Vogel (Editors), Evolving Genes and Proteins, Academic Press, New York, N. Y., 341—355 (1965).
17. Getoff N., Über die Bildung organischer Substanzen aus Kohlensäure in wässriger Lösung mittels 60Co-Gamma-Strahlung, Z. Naturforsch., 17b, 751—757 (1962).
18. Granick S., Evolution of heme and chlorophyll. In: V. Bryson and H. J. Vogel (Editors), Evolving Genes and Proteins, Academic Press, New York, N. Y., 67—88, 1965.
19. Haggis G. H., The structure and function of membranes. In: G. H. Haggis (Editor), Molecular Biology, Wiley, New York, N. Y., 151—192, 1964.
20. Haggis G. H., The origin of life. In: G. H. Haggis (Editor), Molecular Biology, Wiley, New York, N. Y., 315—354, 1964.
21. Hayashi O., Nozaki M., Nature and mechanisms of oxygenases, Science, 164, 389—396 (1969).
22. Lacey J. M., Jr., Pruitt K. M., Origin of the genetic code, Nature, 223, 799—804 (1969).
23. Опарин А. И., Пути начального формирования обмена веществ и искусственное моделирование этого формирования в коацерватных каплях. In: S. W. Fox (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 331—341, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 335, М., 1966).
24. Orgel L. E., Evolution in the genetic apparatus, J. Mol. Biol., 38, 381—393 (1968).
25. Pirie N. W., Discussion. In: S. W. Fox (Editor), The Origin of Prebiological Systems, Academic Press, New York, N. Y., 33, 1965 (Происхождение предбиологических систем, изд-во «Мир», стр. 41, М., 1966).
26. Rauws A. G., Prebiotische organische chemie, een kritisch overzicht, Chem. Weekblad, 60, 361—369 (1964).
27. Riley G. A., Organic aggregates in seawater and the dynamics of their formation and utilization. Limnol. Oceanog., 8, 372—381 (1963).
28. Sonneborn T. M., Degeneracy of the genetic code: extent, nature and genetic implications. In: V. Bryson and H. J. Vogel (Editors), Evolving Genes and Proteins, Academic Press, New York, N. Y., 377—397, 1965.
29. Waehnelde T. W., Fox S. W., The binding of basic proteinoids with organic or thermally synthesized polynucleotides, Biochim. Biophys. Acta, 160, 239—245 (1968).
30. Wangersky P. J., The organic chemistry of seawater, Am. Scientist, 53, 358—374 (1965).
31. Wassink E. C., The nature of the primary act in photosynthesis. In: H. Tamaiya (Editor), Mechanism of photosynthesis—Proc. Intern. Biochem. Congr., 5th, Moscow, 1961, 3, 100—121 (1963).
32. Yuki A., Fox S. W., Selective formation of particles by binding of pyrimidine polyribonucleotides or purine polyribonucleotides with lysine-rich or arginine-rich proteinoids, Biochem. Biophys. Res. Commun., 36, 657—663 (1969).

## ЭТАПЫ РАННЕЙ ЭВОЛЮЦИИ ЖИЗНИ

1. ГИПОТЕТИЧЕСКИЙ ХАРАКТЕР НАШИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ  
О РАННЕЙ ЭВОЛЮЦИИ ЖИЗНИ

В этой главе мы рассмотрим некоторые процессы ранней эволюции живого, сыгравшие свою роль в тот или иной период. Мы не можем восстановить последовательность этих процессов. Из всей цепи событий, приведших к знакомой нам картине живого мира, этапы ранней эволюции жизни остаются самыми неясными. Поэтому все наши умозаключения о сущности этих этапов, пожалуй, более гипотетичны, чем выводы о предыдущих или последующих звеньях цепи.

Это объясняется тем обстоятельством, что к тому времени жизнь уже успела выйти из стадии простых молекул, но не успела еще развить определенных морфологических форм. Свойства простых молекул, которые, как мы видели, образуют основу жизни, в значительной степени определяются свойствами отдельных атомов. Поэтому удастся в какой-то степени восстановить возможные события самых ранних этапов зарождения живого, основываясь на физико-химических соображениях и зная свойства химических элементов. Более поздние этапы эволюции в той или иной мере известны нам по сохранившимся ископаемым.

Что касается ранних стадий эволюции жизни, то поведение молекул, входящих в состав организмов, уже нельзя понять, исходя только из принципов физики и химии, и в то же время эти организмы, не обладая еще дискретными морфологическими признаками, не могли оставить легко опознаваемых ископаемых остатков. И все же, основываясь на данных биологии, полученных при изучении современной жизни, можно сделать некоторые заключения о том, что же могло происходить на ранних стадиях развития жизни. Хотя эти данные не помогут нам восстановить точно ход событий, их все же необходимо принять во внимание.

Для нас важны сведения о составе примитивной атмосферы и об условиях среды в ту эпоху. Нас интересуют различия между аэробными и анаэробными условиями жизни — в данном случае лучше говорить о бескислородных и кислородных условиях. Существенно то, что уже на ранних стадиях своего развития жизнь, по-видимому, скрывалась от воздействия коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца. Для нашей проблемы интересна и способность некоторых современных бактерий при уменьшении со-

держания кислорода ниже определенного уровня переходить с дыхания на брожение или какой-либо другой способ метаболизма (так называемый эффект Пастера). Еще один важный для нас факт — установленное сравнительно недавно на основании данных электронной микроскопии разделение всех современных клеток на два типа: *прокариотические* и *эукариотические*. Первые построены проще и считаются более примитивными.

## 2. АЭРОБНЫЕ И АНАЭРОБНЫЕ, КИСЛОРОДНЫЕ И БЕСКИСЛОРОДНЫЕ ФОРМЫ ЖИЗНИ

Между средой, в которой существовала и развивалась ранняя жизнь (в условиях первичной бескислородной атмосферы), и средой современной жизни существует резко выраженное различие. Конечно, условия сменились не сразу, был какой-то переходный период (гл. XV), но резкая разница, о которой мы говорили, не становится от этого менее разительной. Она не всегда достаточно ясно подчеркивается в литературе. В частности, путаница создается недостаточно строгим употреблением терминов «аэробный» и «анаэробный». В нашу эпоху аэробные организмы живут в контакте с воздухом, а следовательно, и в контакте со свободным кислородом. Анаэробы живут в биотопах, защищенных от соприкосновения с воздухом и свободным кислородом.

Метаболизм ранних форм жизни, существовавших в условиях бескислородной атмосферы, вполне мог быть более или менее сходным по своей биохимии с метаболизмом современных анаэробных организмов. Исходя из этого многие авторы говорят об «анаэробных условиях», господствовавших в эпоху примитивной атмосферы, забывая, что термин «анаэробный» говорит, собственно, об отсутствии контакта с атмосферой.

Поэтому лучше было бы делить формы жизни на бескислородные и кислородные, а уже затем — на аэробные и анаэробные. Во времена примитивной атмосферы вся жизнь была бескислородной, но она вполне могла быть в значительной мере аэробной. В настоящее время вся аэробная жизнь по необходимости является кислородной, а современная бескислородная жизнь укрылась в весьма особой экологической нише — в биотопах с анаэробными условиями. В период перехода от бескислородной атмосферы к кислородной эти отношения, видимо, были более сложными.

## 3. ЗАЩИЩЕННОСТЬ ОТ КОРОТКОВОЛНОВОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

Кроме рассмотренных условий среды, мы должны учитывать еще и радиационные условия, различая биотопы, защищенные и не защищенные от воздействия коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца.

Как мы видели, начало развития преджизни — образование «бульона» — должно было проходить под воздействием излучения. Неорганический синтез «органических» молекул преджизни шел за счет энергии коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца. Но образовавшиеся сложные молекулы уже нуждались в защите от ультрафиолета. Возможно, и поздние стадии биопоэза уже не могли идти без такой защиты.

Это один из многих парадоксов ранней истории жизни: лучи Солнца, создававшие «строительный материал» для молекул жизни, были смертельно опасны для самой жизни. Поэтому на заре своего развития жизнь была сильно ограничена в выборе среды обитания. Она могла сохраняться только под защитой толстого слоя воды, или в капиллярах между частицами почвы, или в естественных пещерах. Но и в этих укрытиях она, очевидно, была аэробной. Ведь воздух не только свободно проникает в пещеры и в почву, но и насыщает верхние слои почти всех водоемов, которые, таким образом, принадлежат к аэробным средам.

Итак, перечислим основные возможные варианты условий обитания жизни:

- 1) аэробные или анаэробные (имеется или не имеется контакта с атмосферой);
- 2) кислородные или бескислородные (имеется или отсутствует свободный кислород);
- 3) при освещении Солнцем и без освещения (имеется в виду действие прямого солнечного света).

## 4. РОЛЬ МИКРОБОВ

Прежде чем продолжить рассмотрение условий, в которых могли проходить ранние этапы эволюции жизни, нелишне было бы поговорить о роли микроорганизмов.

Микроорганизмы важны не только сами по себе, но и как организмы-пионеры; они первыми осваивают среду и создают условия для существования других форм жизни. Что касается роли микроорганизмов как группы организмов, то они составляют три четверти биомассы всех современных живых существ, и уже это ясно говорит об их значимости. Но, более того, оказалось, что многие процессы жизненного цикла микроорганизмов составляют основу жизненных функций высших растений и животных. Возможности высших организмов были бы сильно ограничены, исчезли вдруг все микроорганизмы. И Ключевер был, пожалуй, прав, вопрошая, была ли бы такая жизнь достойна именоваться жизнью: «И это жизнь? Стоит ли жить без хлеба и вина, без сыра и пива?» [7, 8] (см. также [9]).

Другая важная черта микробных форм жизни — огромное разнообразие их процессов обмена в сравнении с паразитическим еди-



нообразием этих процессов у растений и животных. Высшие организмы, отказавшись от многих возможных путей метаболизма, используют сравнительно небольшой набор реакций, «выжимая» из него максимум пользы. Микроорганизмы же используют всевозможные пути переноса энергии. Поэтому у них гораздо труднее провести грань между аэробным и анаэробным обменом, между автотрофностью (свойственной растениям) и гетеротрофностью (присущей животным), чем у высших организмов.

Роль микроорганизмов в ранний период эволюции жизни, конечно, превосходила современную. Ее можно было бы назвать перво-степенной: ведь именно микроорганизмы составили основу для дальнейшего развития жизни, для появления высших организмов. Поэтому давайте кратко ознакомимся с миром микроорганизмов.

С таксономической точки зрения микроорганизмы составляют часть большой группы, называемой Protista (*протисты*). Эту группу обычно выделяют как особое, третье царство организмов. Трудно провести резкую грань между протистами и растениями или животными. Все же, как правило, протисты обладают более простой организацией, они не имеют дифференцированных тканей. В табл. 10 дана классификация трех царств живого мира.

Таблица 10

## Группы, входящие в состав трех царств живого мира

	Растения	Животные
Многочелюстные; имеют дифференци- рованные ткани	Семенные растения Папоротники Мхи и печеночники	Позвоночные Беспозвоночные
	Протисты	
Одноклеточные, мно- гоядерные или мно- гочелюстные; не имеют дифференци- рованных тканей	Водоросли Простейшие Грибы Бактерии	

Обычная палеонтология не может помочь нам в поисках остатков ранней жизни. Палеонтологов интересуют главным образом хорошо сохраняющиеся твердые части высших организмов, которые можно прекрасно классифицировать и затем строить на их основе эволюционные схемы. Нам же нужны остатки древнейших микроорганизмов и других форм жизни, стоящих на низкой ступени морфологической организации. Только на основании этих крайне скудных остатков можно попытаться восстановить раннюю историю

возникновения и развития жизни на Земле. Именно из-за скудости палеонтологической летописи мы и вынуждены излагать эту историю в самых общих чертах.

## 5. ПЕРЕХОД ОТ БРОЖЕНИЯ К ДЫХАНИЮ; ТОЧКА ПАСТЕРА

Но вернемся к вопросу об аэробном и анаэробном, кислородном и бескислородном образе жизни. Как мы уже знаем, микроорганизмы используют гораздо больше способов получения энергии, чем высшие организмы. Прежде всего рассмотрим фотосинтез и дыхание. Оба эти процесса являются аэробными в прямом смысле слова: они возможны лишь в контакте с атмосферой. Но фотосинтез может быть и бескислородным, и кислородным, тогда как дыхание — обязательно кислородный процесс.

Однако микроорганизмам известны и другие способы извлечения энергии из среды. Самый известный из этих способов — брожение. Разнообразие вариантов брожения поразительно, но итог всегда одинаков: электрон постепенно переносится организмом от донора к акцептору электронов. Энергия, выделяющаяся при этом переносе, используется организмом в процессах жизнедеятельности<sup>1</sup>.

Согласно Станье и сотр. [13], можно выделить следующие основные типы микробного метаболизма:

- 1) с использованием лучистой энергии (солнечного света) — органический фотосинтез;
- 2) с использованием окислительно-восстановительных реакций, дающих энергию (так называемые «темновые» реакции): а) дыхание (конечный акцептор электрона — свободный кислород); б) анаэробное дыхание (конечный акцептор электрона — другое неорганическое вещество); в) брожение (конечный акцептор электрона — органическое вещество).

Это свойственное микроорганизмам разнообразие метаболических процессов приводит к «размазанности» зоны перехода между кислородной и бескислородной жизнью. Вместо двух четко разграниченных групп организмов — неспособных жить без кислорода (так называемые облигатные аэробы) и неспособных жить в присутствии кислорода (облигатные анаэробы) — среди микрооргани-

<sup>1</sup> При этом вещество, у которого отнимается электрон, окисляется, а вещество, принимающее электрон, восстанавливается. Поэтому такие реакции называются «экзергоническими окислительно-восстановительными реакциями». Поскольку в них не используется лучистая энергия солнечного света, их еще называют «темновыми». При дыхании конечным акцептором электрона служит свободный кислород, который восстанавливается, принимая электрон, и образует с водородом воду. Но микроорганизмы могут использовать в качестве конечного акцептора электронов множество других соединений, как органических, так и неорганических.

мов мы находим множество форм, способных жить и в кислородной, и в бескислородной среде. Их называют *факультативными анаэробами*. О подобных формах ранней жизни лучше было бы сказать, что они обладали способностью к *факультативному дыханию*.

К факультативным анаэробам принадлежат дрожжи и огромное большинство бактерий. При падении содержания кислорода ниже определенного уровня они переходят на брожение, выше этого уровня существуют за счет дыхания. Точка перехода называется *точкой Пастера*.

Этот переход у факультативных анаэробов выражен достаточно четко. Точка Пастера соответствует содержанию кислорода около 0,01 его содержания в современной атмосфере (по личному сообщению Л. Беркнера и Л. Маршалла, 1966)<sup>1</sup>.

Точку Пастера не следует путать с тем уровнем свободного кислорода, ниже которого не могут дышать строго аэробные организмы. Этот уровень обозначают  $P_{50}$ . Его значения для разных позвоночных указаны в табл. 11.

Таблица 11

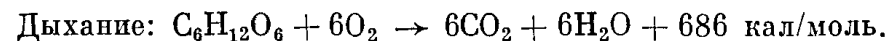
Парциальные давления свободного кислорода, ниже которых дыхание невозможно (по личному сообщению Беркнера и Маршалла, 1966)

Организмы	$P_{50}$ , мм рт. ст.	$P_{50}$ , в долях содержания $O_2$ в современной атмосфере
Человек	50	0,31
Млекопитающие	22—50	0,14—0,31
Птицы	35—50	0,22—0,31
Пресмыкающиеся	13—31	0,1—0,2
Амфибии	5—18	0,031—0,11
Рыбы	4—17	0,025—0,11

При давлении  $O_2$ , соответствующем точке Пастера, организмы, способные к факультативному дыханию, получают значительные преимущества над теми, которые неспособны жить в присутствии кислорода. Ведь процесс дыхания дает гораздо больше энергии, чем брожение. Это объясняется тем, что конечный продукт брожения — органическое вещество, принявшее электрон, тогда как при дыхании акцептором электрона служит свободный кислород. Органическое вещество, представляющее собой конечный продукт брожения, при дыхании окисляется до конца, давая дополнительно большое

<sup>1</sup> В современной атмосфере парциальное давление свободного кислорода можно принять равным 159 мм рт. ст. Тогда точка Пастера соответствует давлению 1,59 мм рт. ст.

количество энергии. Как видно из приведенных здесь уравнений, энергетический выход дыхания более чем в десять раз превышает выход энергии при брожении.



## 6. РОЛЬ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ДЫХАНИЯ В РАННИЙ ПЕРИОД ЭВОЛЮЦИИ ЖИЗНИ

Широкая распространенность в мире микробов способности переходить с дыхания на брожение и обратно — в зависимости от содержания кислорода в среде — весьма важный факт для понимания ранней эволюции жизни. Сопоставив этот факт с историей накопления кислорода в атмосфере (подробнее об этом см. в гл. XV), мы приходим к интересному выводу: предшественники современных факультативных анаэробов смогли перейти от брожения к дыханию только благодаря деятельности первобытных фотосинтезирующих организмов.

Значит, когда содержание кислорода в атмосфере дошло до 0,01 его содержания в современной атмосфере, начал действовать механизм обратной связи. Организмы с факультативным дыханием, существовавшие в то время, переключились с брожения на дыхание, т. е. начали использовать кислород. До того они не использовали или почти не использовали его. Если общая биомасса этих организмов была сравнима с биомассой тогдашних фотосинтезирующих организмов, то содержание кислорода в атмосфере должно было колебаться около 0,01 его содержания в современной атмосфере. При падении содержания кислорода ниже этого уровня организмы с факультативным дыханием возвращались к брожению, а любое повышение содержания кислорода немедленно вызывало его усиленный расход.

Правда, когда повышение содержания кислорода до 0,01 современного произошло впервые, это не вызвало немедленной реакции. Ведь механизмы дыхания, необходимые ферменты еще не существовали. Но вслед за Беркнером и Маршаллом [1, 2] мы можем принять, что, поскольку способность дышать давала огромное преимущество, она должна была развиваться довольно быстро — с геологической точки зрения, конечно. Когда дыхание возникло, почти сразу же должен был вступить в действие механизм обратной связи, удерживающий содержание кислорода в атмосфере на уровне около 1% его содержания в современной атмосфере.

О механизме переключения обмена у современных микробов нам мало что известно. По-видимому, серьезных исследований на этот счет просто не проводилось. В самых общих чертах нам ясно,

что граница, за которой дыхание становится более выгодным, определяется при низком содержании кислорода химической кинетикой дыхания и брожения. Но в чем здесь дело — только ли в скорости диффузии кислорода в воде или, что вероятнее, в кинетике разных ферментативных этапов, из которых состоит процесс дыхания, до сих пор не выяснено. А жаль: это весьма интересный вопрос. Во всяком случае, мы можем запомнить, что переключение обмена при достижении точки Пастера свойственно самым разным, филогенетически неродственным современным микроорганизмам, причем точка Пастера у всех у них соответствует примерно одинаковому содержанию кислорода. Поэтому мы можем считать, что и в раннюю эпоху развития жизни дело обстоит так же.

## 7. ТИПЫ ПИТАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

Микроорганизмы сильнее высших организмов разнятся между собой не только в том, что касается их энергетических процессов, но также по видам потребляемой пищи. Поскольку вначале жизнь была микробной, мы должны остановиться на типах питания микроорганизмов, чтобы получить представление о пищевых нуждах примитивных организмов.

У высших организмов все просто: здесь существуют две четко выраженные группы. Это *автотрофы*, питающиеся неорганическими соединениями, и *гетеротрофы*, которые потребляют в пищу только органические соединения. Растения, за немногими исключениями, автотрофы, а все животные — гетеротрофы.

Но в мире микроорганизмов возможны и иные варианты. Вслед за Станье и сотр. [13], мы можем принять следующую классификацию по типам энергии и пищи, используемых в метаболизме. Прежде всего микроорганизмы делятся на *фототрофные* (или фотосинтезирующие), которые используют лучистую энергию, и *хемотрофные*, использующие энергию темновых окислительно-восстановительных реакций (об этом делении уже говорилось в гл. VIII, разд. 5). Обе группы далее делятся в зависимости от используемых доноров электронов. Организмы, использующие неорганические доноры электронов, называются *лиготрофными*, а органические — *органотрофными*.

Всего получается четыре группы:

*Фотолитотрофные* организмы используют лучистую энергию и неорганические доноры электронов. Сюда относятся не только зеленые растения, но и сине-зеленые водоросли, а также некоторые бактерии.

*Фотоорганотрофные* организмы используют лучистую энергию и органические доноры электронов. К этой группе микроорганизмов, которых раньше называли «фотосинтезирующими гетеротрофами», принадлежат некоторые серобактерии, а также некоторые

песерные бактерии, особенно Athiorhodacea (см. гл. XIV, разд. 10, а также [6]).

*Хемолитотрофные* организмы используют для получения энергии окислительно-восстановительные реакции и неорганические доноры электронов. Все представители этой группы — бактерии.

*Хемоорганотрофные* организмы используют окислительно-восстановительные реакции и органические доноры электронов. Это гетеротрофы, по старому определению. Но в эту группу входят не только животные, но и большинство бактерий.

Эта новая классификация гораздо точнее; в частности, в старой классификации гетеротрофность вольно или невольно приписывалась только животным, а гораздо более широкий спектр микробных типов обмена как-то не учитывался.

На первобытной Земле могли существовать две другие группы: *фото«органотрофные* и *хемо«органотрофные* организмы. Кавычки означают, что такие примитивные организмы могли использоваться в качестве доноров электронов «органические» молекулы («органическими» мы уже условились называть те молекулы, которые образовывались за счет неорганического фотосинтеза).

Древнейшая жизнь, видимо, была хемо«органотрофной и хемолитотрофной. Затем появились фототрофные организмы, которые осуществляют фотосинтез. В наше время фотолитотрофные организмы полностью преобладают над фотоорганотрофами. Но на заре развития жизни фотолитотрофность могла быть не такой выгодной. Ведь в то время, в условиях первичной бескислородной атмосферы, жизнь укрывалась от прямого солнечного света. Сейчас фотоорганотрофные бактерии обладают большим разнообразием путей и способов метаболизма, чем фотолитотрофные организмы. Им не требуется прямого солнечного света, они могут расти даже в темноте. Вполне вероятно, что на первобытной Земле доминировали фото«органотрофные микроорганизмы, и лишь затем их потеснили фотолитотрофы.

В связи с этим важно еще раз напомнить, что, хотя при органическом фотосинтезе высвобождается кислород, сам процесс фотосинтеза не является кислородным. Чтобы он действовал, нужны лишь атмосферная двуокись углерода и молекулы хлорофилла или подобных ему соединений, способных разлагать двуокись углерода и высвобождать кислород<sup>1</sup>.

## 8. ПРОКАРИОТИЧЕСКИЕ И ЭУКАРИОТИЧЕСКИЕ КЛЕТКИ

Другая важная особенность мира микроорганизмов — простое устройство их клеток; такие клетки носят название *прокариотических*.

<sup>1</sup> См. примечание на стр. 139. — Прим. ред.

Еще световой микроскоп позволил выявить, что большинство клеток имеет сложное внутреннее строение. Клетки состоят обычно из более мелких отдельных структур. Но иногда никаких структур в клетке разглядеть не удавалось, и было непонятно, в чем тут дело — в их необычно малых размерах и недостаточной разрешающей способности микроскопа или в том, что их в самом деле нет в клетке. С появлением электронного микроскопа, обладающего значительно большим разрешением, мы убедились, что действительно есть клетки, в которых отсутствуют более мелкие морфологические структуры. Более того, оказалось, что эти два типа клеток никогда не встречаются вместе в одном организме или группе организмов. Всегда мы находим либо простые *прокариотические*, либо сложно устроенные *эукариотические* клетки.

Эти два типа клеток различаются и строением наружной мембраны. Мембрана<sup>1</sup> прокариотических клеток построена одной-единственной молекулой сложного полимера, не встречающегося ни в мембранах эукариотических клеток, ни у вирусов. Это соединение называется *мукопептидом* или *мукокомплексом*, и состоит оно не менее чем из 3—4 аминокислот, 2 углеводов (один из которых ацетилмурамовая кислота) и довольно большого количества липидов [12—14]. Единственная молекула этого соединения, как мешок, обволакивает всю клетку, растягиваясь при ее росте.

Лишь часть протистов, а именно бактерии и сине-зеленые водоросли, имеют прокариотические клетки (табл. 12). Их относят к низшим протистам, а большинство водорослей, все грибы и простейшие имеют эукариотические клетки и относятся к высшим протистам. Таким образом, прокариотические низшие протисты существенно отличаются от эукариотических высших протистов, а также растений и животных (о предлагаемом делении всех организмов на четыре или пять царств см. [15]). Их надо считать самыми примитивными из живущих сейчас организмов, и этот факт лишь затемняется объединением высших и низших протистов в одно царство. А ведь многие ботаники даже относят сине-зеленые к царству растений.

Эукариотические клетки наиболее привычны биологам. В популярных работах о клетке речь идет обычно лишь об эукариотической клетке. Широко известные электронные микрофотографии, показывающие разнообразное и сложное строение клетки, сделаны с эукариотических клеток. Часто о существовании в природе и других, прокариотических клеток даже не упоминается.

Структуры эукариотической клетки окружены мембранами, сходными с наружной мембраной клетки: они также обладают свойством полупроницаемости, т. е. способны поддерживать разли-

<sup>1</sup> Здесь автор смешивает два понятия: *мембрана* и *бактериальная оболочка*. — *Прим. ред.*

Таблица 12

Принципиальные различия между прокариотическими и эукариотическими клетками [13]

Признак	Прокариотическая клетка	Эукариотическая клетка
	бактерии, сине-зеленые водоросли	большинство водорослей, грибы, простейшие, высшие растения и живогные
Ядерная мембрана	—	+
Митотическое деление	—	+
Число хромосом	1(?)	Всегда больше 1
Течение протоплазмы	—	+ или —
Митохондрии	—	+
Хлоропласты	—	+ или —
Органеллы движения	Бактериальные жгутики; осевые нити	Жгутики или реснички сложного строения
Амебоидное движение		+ или —

чие химического состава между клеточными структурами и остальным веществом клетки.

Самая известная из клеточных структур — ядро; в нем в свою очередь различают меньшие субструктуры — хромосомы. В них находится нуклеиновая кислота (ДНК). Хромосомы ответственны за передачу наследственных признаков организма при размножении. В эукариотической клетке существуют и другие группы структур, например хлоропласты и митохондрии. В хлоропластах содержатся пигменты и ферменты, совместно превращающие энергию солнечного света в энергию химических связей. Кроме того, в хлоропластах имеются наборы ферментов, нужных для превращения простых продуктов фотосинтеза в более сложные соединения, требующиеся клеткам. В митохондриях содержатся ферментные системы, ответственные за потребление кислорода и образование АТФ. Митохондрии и хлоропласты весьма специализированны. Хлоропласты не могут служить для дыхания, а митохондрии неспособны осуществлять фотосинтез. То же самое относится к ферментам этих органелл клетки: они строго приурочены либо к хлоропластам, либо к митохондриям и никогда не встречаются вместе.

В цитоплазме прокариотических клеток фотосинтезирующих микроорганизмов разбросано множество мельчайших дисков, состоящих из двойных плоских пластинок, наподобие ламелл, обнаруженных в хлоропластах эукариотических клеток. Поэтому счи-

тают, что фотосинтез в прокариотической клетке не имеет особой локализации, а идет во всей протоплазме. В то же время дыхание (у микроорганизмов, которые к нему способны) приурочено к клеточной мембране.

Но вернемся к геологической истории прокариотических и эукариотических клеток. Мы не располагаем данными о том, когда эукариотические клетки впервые появились на Земле (см. гл. XIV, разд. 11).

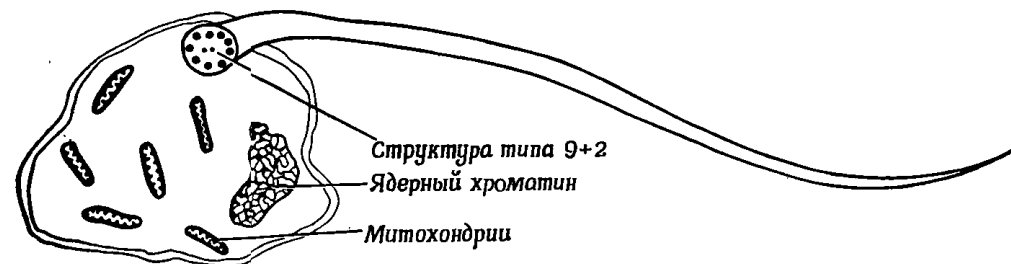
Как мы узнаем из гл. XIV, нужно очень редкое благоприятное стечение обстоятельств, чтобы в ископаемых остатках сохранились клетки. Тонкие внутренние структуры клеток почти всегда разрушаются, и обычно даже в лучших случаях мы не можем отличить прокариотические клетки от эукариотических.

Переход от простой прокариотической к сложной эукариотической клетке с ее многообразными субструктурами остается до сих пор загадкой для биологов. Наиболее остроумная гипотеза возникновения эукариотической клетки принадлежит Саган [11]. Она предположила, что эукариотическая клетка возникла в результате симбиоза двух или более различных прокариотических клеток. В основе этой идеи лежит тот факт, что внутри прокариотических клеток нет мембран, способных защитить всю клетку от токсических продуктов, образующихся в процессе метаболизма. Важнейший из таких ядов — кислород, который выделялся уже у ранних фотосинтезирующих организмов. Ведь кислород, образующийся при фотосинтезе в некоторых участках клетки, способен окислить многие вещества клетки и тем самым погубить ее. В эукариотических клетках фотосинтез происходит в хлоропластах, и благодаря мембранам кислород уходит из клетки, не причиняя ей вреда. У прокариотических фотосинтезирующих организмов защита от кислорода должна была развиваться одновременно с развитием фотосинтеза.

По теории Саган, первым шагом к образованию эукариотической клетки был симбиоз прокариотических организмов двух разных типов. Один из них должен был быть гетеротрофным анаэробом (по новой классификации — фотоорганотрофом), питавшимся органическими веществами. Однажды он съел — вернее *поглотил* (в мире микроорганизмов быть съеденным не обязательно означает погибнуть) — организм, способный к дыханию. С этого момента лишний кислород, выделявшийся фотоорганотрофом при фотосинтезе, стал использоваться проглоченным прокариотом для дыхания. Так мог возникнуть симбиоз между выделяющим кислород прокариотическим микроорганизмом и потребителем кислорода, и этот симбиоз оказался настолько удачным, что стал облигатным.

Разнообразие субъединиц эукариотической клетки Саган объясняет постепенным расширением симбиоза, включением в него новых членов. По мнению Саган, предок эукариотической клетки

состоял из большой прокариотической клетки-хозяина, заключавшей в себе несколько мелких прокариотических симбионтов, которые, оставаясь индивидуальными клетками, выполняли одновременно жизненные функции субструктур, ныне входящих в сложную клетку (фиг. 42). В таком случае эукариотическая клетка — самый древний и самый распространенный случай симбиоза.



Фиг. 42. Схема первой эукариотической клетки [11].

Предполагается, что более крупная прокариотическая клетка поглотила другие прокариотические клетки. Вместе они образовали первый на Земле симбионт — эукариотическую клетку.

Возможно, конечно, что прокариотическая и эукариотическая клетки развились отдельно и независимо друг от друга из преджизни за тот период примерно в 2 млрд. лет, пока преджизнь и ранняя жизнь сосуществовали на Земле (см. гл. XVIII, разд. 2). Можно даже гринять, что было два главных штамма прокариотических клеток — обладавшие мукокомплексом и не имевшие его — и что эукариотические клетки развились именно из последней группы, возможно так, как предполагает Саган. Быть может, исходные прокариотические клетки второго штамма постепенно вымерли, так как их эукариотические потомки оказались гораздо лучше приспособленными к существованию. В то же время первый штамм прокариотических клеток, отличавшийся иным строением клеточной оболочки и наличием мукокомплекса, возможно, имел шансы на выживание. Теперь его потомки занимают множество разнообразных экологических ниш, непригодных для привередливых эукариотов.

## 9. ЗАЩИТА ОТ КИСЛОРОДА И «КИСЛОРОДНЫЕ ОАЗИСЫ»

В предыдущем разделе мы уже писали о парадоксе: кислород, выделявшийся ранними фотосинтезирующими организмами и обеспечивший затем расцвет жизни на Земле, был вначале смертельно опасен для этой жизни. История развития живого богата парадоксами, но этот — самый поразительный. Противоречие между важной ролью кислорода и его токсичностью характеризовало разви-

тие жизни при переходе от бескислородной атмосферы к кислородной и остается в силе и теперь, в условиях кислородной атмосферы.

Выделение кислорода в процессе органического фотосинтеза привело к весьма противоречивым реакциям и результатам. С одной стороны, это, как мы только что видели, должно было привести к развитию противокислородных защитных механизмов. С другой стороны, выделение кислорода в каком-либо месте могло привести к его локальному накоплению и к раннему, локальному же, развитию кислородолюбивых организмов еще в те времена, когда большинство организмов жило в бескислородной среде. Как это случилось, неизвестно. Все же мы приведем один возможный механизм защиты от кислорода и попробуем представить себе, как в так называемых «кислородных оазисах» развились механизмы использования кислорода.

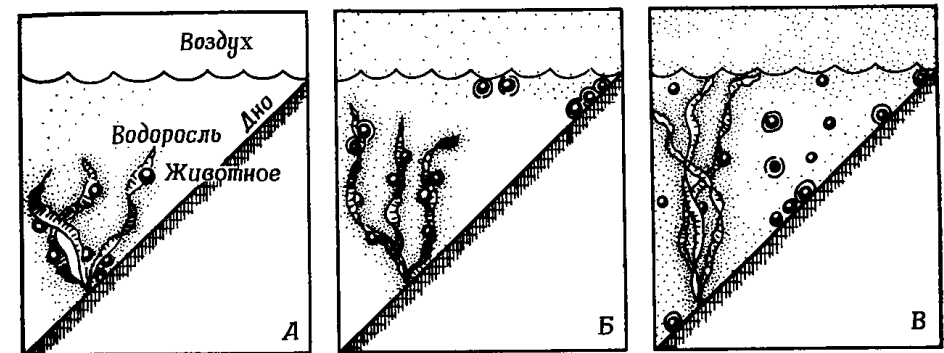
Считается, что явление *билюминесценции* — «пережиток» древних способов противокислородной защиты [10]. Сейчас билюминесценция (способность живых организмов испускать свет) довольно широко распространена в природе. Она встречается не только у насекомых (всем известных светляков), но и у рыб, ракообразных, моллюсков, червей, простейших и растений. Способность светиться свойственна самым разным организмам и никак не коррелирует с их систематическим положением. Можно думать, что это очень древний признак, оставшийся теперь лишь у отдельных, не связанных между собой групп растений и животных. Он сохранился у тех организмов, для которых способность светиться оказалась полезной сама по себе, а не как средство защиты от кислорода. Билюминесценция иногда необходима для освещения (например, глубоководным рыбам) или для привлечения полового партнера (например, у светляков).

У разных организмов процесс билюминесценции имеет общую основу: особое соединение, люциферин, окисляется под действием фермента люциферазы. Строение люциферина различно у разных организмов, но для нас важен лишь тот факт, что во всех случаях идет прямое и энергичное окисление с использованием свободного кислорода. Вот почему Мак-Элрой и Зелигер [10] сделали вывод, что билюминесценция — древний механизм защиты от кислорода, развившийся в эпоху начала органического фотосинтеза и сохранившийся в условиях кислородной атмосферы лишь у тех организмов, для которых свечение по каким-то причинам оказалось полезным само по себе.

Другое явление, связанное с появлением в атмосфере свободного кислорода, — это *кислородные оазисы*. Так Фишер [5] окрестил ограниченные насыщенные кислородом зоны, возникавшие вокруг фотосинтезирующих организмов. На фиг. 43 показаны такие оазисы вблизи морских водорослей и примитивные животные, обитающие в оазисах. Но в кислородных оазисах могли жить и дышащие

микробы, облигатно или факультативно связанные с примитивными фотосинтезирующими микроорганизмами.

Вряд ли нам когда-либо удастся что-нибудь узнать о структуре таких кислородных оазисов и их роли. Но это предположение весьма полезно, так как позволяет наглядно представить себе некоторые стороны процесса изменения атмосферы Земли.



Фиг. 43. В период возникновения кислородной атмосферы могли существовать так называемые «кислородные оазисы» [5].

На первой стадии «животные» или другие зависящие от наличия кислорода организмы, как показано на рисунке, тесно связаны с фотосинтезирующими водорослями. На следующей стадии (вопреки мнению Фишера ни природа этой стадии, ни срок ее наступления пока не ясны) «животные» могут удалиться от растений, так как морская вода постепенно насыщается кислородом. А — докембрий; Б — ранний палеозой; В — наше время.

## 10. СИНЕ-ЗЕЛЕННЫЕ ВОДОРΟΣЛИ

Эту главу, в которой собраны довольно разрозненные сведения о различных процессах, шедших на заре развития жизни, можно заключить короткой заметкой о сине-зеленых водорослях. Это довольно разнородная группа прокариотических организмов. Отдельные виды сине-зеленых водорослей сильно различаются по способам метаболизма. Но для нас важнее всего, что они обладают хлорофиллом, и, значит, способны к фотосинтезу [4, 3]. Из прокариотических фотосинтезирующих организмов наших дней сине-зеленые водоросли — самые важные. К тому же они фотолитотрофы. Хотя, как мы узнали из разд. 7 этой главы, ранняя жизнь, видимо, была фото«органотрофной», производство кислорода должно было усилиться с появлением фотолитотрофов. Сейчас общепринято мнение, что сине-зеленые водоросли или другие, более примитивные организмы, родственные или не родственные им, но имеющие сходный обмен, сыграли важную роль в создании кислорода нашей атмосферы. Следующая стадия началась лишь с появлением эукариотической клетки и наших современных эукариотических зеленых растений. Как мы увидим, в гл. XIV, разд. 12, внешнее сходст-

во некоторых микроскопических водорослеподобных ископаемых возрастом около 2 млрд. лет с сине-зелеными водорослями вовсе не доказывает их родство, как это принимают многие авторы. Найденные ископаемые настолько примитивны, что вполне могут быть остатками регрессировавшей ветви других, более сложных водорослей. Впрочем, нас интересует не родство древних и современных организмов, а сходство их метаболизма, данных же об этом пока нет.

#### Список литературы

1. Berkner L. V., Marshall L. C., On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, **22**, 225—261 (1965).
2. Berkner L. V., Marshall L. C., Limitation of oxygen concentration in a primitive planetary atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, **23**, 1133—1143 (1966).
3. Echlin P., The blue-green algae, *Sci. Am.*, **214**, 75—81 (1966).
4. Echlin P., Morris I., The relationship between blue-green algae and bacteria, *Biol. Rev.*, **40**, 143—187 (1965).
5. Fischer A., Fossils, early life and atmospheric history, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.*, **53**, 1205—1215 (1965).
6. Gast H., San Pietro A., Vernon L. (Editors), Bacterial photosynthesis, Antioch Press, Yellow Springs, Ohio, 523 pp., 1963.
7. Kluuyver A. J., 's Levens nevels. *Handel. 26e Naturw. Congr.*, pp. 82—106 (Translated as «Life's fringes» in: A. F. Kamp, J. W. M. la Rivière and W. Verhoeven, Albert Jan Kluuyver, North-Holland, Amsterdam, pp. 329—348), 1937.
8. Kluuyver A. J., Microbe en leven, *Jaarb. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap.*, 1954/55, **27** (1955).
9. Kluuyver A. J., van Niel C. B., The Microbe's Contribution to Biology, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 182 pp., 1956 (А. Клуйвер, К. Ван-Ниль, Вклад микробов в биологию, ИЛ, М., 1959).
10. McElroy W. D., Seliger H. H., Origin and evolution of bioluminescence. In: M. Kasha and B. Pullman (Editors), *Horizons in Biochemistry*, Academic Press, New York, N. Y., pp. 91—101, 1962 (Горизонты биохимии, изд-во «Мир», стр. 74, М., 1964).
11. Sagan L., On the origin of mitosing cells, *J. Theoret. Biol.*, **14**, 225—274 (1967).
12. Stanier R. Y., La place des bactéries dans le monde vivant, *Ann. Inst. Pasteur*, **101**, 297—312 (1961).
13. Stanier R., Douderoff M., Adelberg E., The Microbial World, 2nd ed., Prentice Hall, New York, N. Y., 753 pp., 1963.
14. Strominger J. L., Ghuysen J. M., Mechanisms of enzymatic bacteriolysis, *Science*, **156**, 213—221 (1967).
15. Whittaker R. H., New concepts of kingdoms of organisms, *Science*, **163**, 150—160 (1969).

## ДАЛЬНЕЙШАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЖИЗНИ

### 1. ТРИ ГЛАВНЫЕ СТАДИИ В ИСТОРИИ ЖИЗНИ

Чтобы заключить рассмотрение биологических и химических аспектов происхождения жизни, давайте кратко рассмотрим некоторые вопросы ее дальнейшей эволюции, которые особенно важны для понимания ее происхождения. В последующих же главах мы снова вернемся к интересующим нас геологическим данным, а затем ознакомимся с некоторыми имеющими отношение к нашей проблеме данными по физике атмосферы.

Любая схематизация естественных процессов грозит искажением представления о них, и все же для лучшего понимания истории жизни разделим эту историю на три этапа: 1) преджизнь, 2) раннюю жизнь — я подразумеваю под этим жизнь, существовавшую в условиях бескислородной атмосферы, и 3) позднейшую жизнь, связанную с кислородной атмосферой. Идя на риск еще большего упрощения, мы можем принять, что развитие преджизни зависело от бескислородной атмосферы и коротковолнового ультрафиолетового излучения, свободно проникавшего через эту атмосферу. Биопозз, переход от преджизни к ранней жизни, также мог произойти лишь в условиях бескислородной среды: жизнь могла постепенно развиваться, не опасаясь немедленного окисления. Более того, ультрафиолет был необходим для биопозза: хотя жесткое ультрафиолетовое излучение разрушительно для многих, если не для всех продуктов биопозза, все же преджизнь зависела от «органических» соединений, созданных при участии ультрафиолета. После перехода к ранней жизни эта последняя все еще находилась в тесной зависимости от бескислородной атмосферы, и только с развитием механизмов защиты от кислорода (см. гл. VIII, разд. 9) жизнь получила шансы сохраниться и в кислородной атмосфере. Все способные к дыханию организмы «поздней жизни», т. е. не только животные, но и растения (ведь растения тоже дышат), уже тесно связаны с кислородной атмосферой. Только анаэробы, эти остатки ранней или боковые ветви эволюционного древа поздней жизни, не зависят от современной кислородной атмосферы.

Как уже подчеркивалось, первые две стадии развития жизни в значительной степени перекрываются. Видимо, преджизнь еще существовала, когда ранняя жизнь была уже вполне развита. В последующих главах мы увидим, что такое сосуществование могло продолжаться на протяжении большей части истории бескислород-

ной атмосферы — от первого появления ранней жизни до перехода к кислородной атмосфере, т. е. около 2 млрд. лет. С другой стороны, должен был существовать переход, постепенное развитие от ранней жизни к поздней, но получить достоверные сведения об этом периоде очень трудно. Во всяком случае, кажется вполне возможным, что примитивная, но уже вполне развитая флора типа той, которая найдена в формации Ганфлинт (гл. XII, разд. 14), могла уже иметь защитные механизмы, позволяющие вынести переход от бескислородной к настоящей кислородной атмосфере.

Эволюция жизни была непрерывной, однако в палеонтологической летописи мы находим серьезный пробел: нет данных о переходе от ранней жизни к поздней. Поскольку примитивные растения прекрасно могли жить и в бескислородной, и в кислородной атмосфере, свидетельствовать о существовании современной кислородной атмосферы могут только ископаемые остатки наземных растений и животных. Первыми на суше появились животные; самые древние ископаемые их остатки найдены в позднем докембрии (гл. XII, разд. 3 и 4). Начиная с кембрия, мы встречаем довольно много ископаемых остатков. К этому времени животные начали строить защитные раковины. Появление раковин, очевидно, нельзя считать результатом некоей главной тенденции эволюционного процесса; скорее оно связано с временным понижением содержания двуокси углерода в атмосфере (гл. XVI, разд. 3 и 4). Эти два события — выход жизни на сушу и появление твердого скелета — знаменуют собой в истории жизни довольно резкую границу, заметную для палеонтологов. Как мы уже знаем, обычно палеонтологи занимаются лишь той частью истории живого, которая начинается с раннего кембрия, т. е. только фанерозоем.

## 2. ЭВОЛЮЦИЯ ПОЗДНЕЙ ЖИЗНИ

Разрыв в палеонтологической летописи между данными о ранней и поздней жизни — это не только временной разрыв; налицо также качественное изменение в характере сохранившихся данных. От ранней жизни сохранились ископаемые остатки растений и, как полагают, микроорганизмов (животных тогда еще не было). Наши представления о развитии поздней жизни основаны главным образом на остатках животных, тогда как остатки растений, напротив, играют здесь лишь весьма небольшую роль.

Это различие объясняется в основном двумя факторами. Во-первых, животные, у которых имеются твердые части (раковины, скелет, зубы), имели больше шансов оставить ископаемые остатки, чем другие организмы. Во-вторых, как раз эти твердые части наиболее важны для систематики большинства групп современных животных. Поэтому сравнительно легко соотнести систематику ископаемых окаменелостей животных с систематикой современной

фауны. В ботанике все обстоит, как правило, наоборот. В систематике растений основной упор даже у форм, обладающих твердыми частями, делается на плохо сохраняющиеся мягкие органы. Так, в систематике деревьев обычно используется не строение древесины, а строение цветков, которые редко fossilизируются. К тому же большинство высших растений живет на суше, а захоронение лучше идет в море, и это также служит причиной того, что описание эволюции поздней жизни основывается главным образом на фауне.

Это принципиальное различие в подходе к данным о ранней и поздней жизни признается не всегда, и некоторые авторы склонны без достаточных на то оснований экстраполировать в далекое прошлое выводы, сделанные при изучении эволюции поздней жизни. Как пример такого смещения данных о ранней и поздней жизни можно привести высказывание Керката [2]. Автор пишет, что теория эволюции основана на семи допущениях, образующих вместе «общую теорию эволюции». Вот эти допущения:

1) живое произошло из неживого, т. е. имело место самозарождение<sup>1</sup>;

2) самозарождение произошло лишь однажды.

Остальные допущения, согласно Керкату, вытекают из второго:

3) вирусы, бактерии, растения и животные родственны друг другу;

4) Metazoa произошли от Protozoa;

5) разные типы беспозвоночных связаны родством;

6) позвоночные произошли от беспозвоночных;

7) внутри подтипа позвоночных птицы и млекопитающие произошли от рептилий, рептилии — от амфибий, а амфибии — от рыб.

Первые два допущения относятся к происхождению жизни, а остальные пять — к дальнейшей ее эволюции, поэтому, на мой взгляд, нельзя их смешивать в одну «общую теорию эволюции». Последние пять допущений основаны на фактах, т. е. на данных о поздней жизни, а первые два, как читатель уже знает, пока остаются гипотезами.

И все же некоторые выводы об эволюции поздней жизни можно использовать для попыток теоретического восстановления истории преджизни и ранней жизни. Мы поступим так в трех случаях, а именно при обсуждении вопросов о монофилетическом или полифилетическом происхождении, о скорости занятия новых областей обитания и об опасности одностороннего увлечения сравнительной биохимией.

<sup>1</sup> Как я уже говорил в гл. IV (разд. 8), употребление термина «самозарождение» в таком контексте кажется мне не совсем удачным. Для обозначения перехода от неживого к живому лучше применять термины «биопоз» или «биогенез».



### 3. МОНО- ИЛИ ПОЛИФИЛЕТИЧЕСКОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ?

Вопрос о монофилетическом или полифилетическом происхождении широко обсуждался специалистами по эволюции поздней жизни, но, как это часто бывает, количество затрачиваемых на эти споры чернил обратно пропорционально количеству конкретных фактов.

Взяв для примера происхождение человека, мы увидим, что здесь нелегко даже дать определение терминов. Чисто монофилетическое происхождение означало бы, что человек произошел от одной-единственной пары высших приматов, а это, конечно, нонсенс. Монофилетическое происхождение в самом строгом смысле должно означать, что человек произошел от одной популяции высших приматов, члены которой скрещивались только между собой. А если люди произошли от нескольких близкородственных, но обычно не скрещивавшихся между собой популяций — можно ли в этом случае говорить о монофилетическом происхождении? Большинство читателей, я думаю, решит, что можно, но ясно, что, если бы даже мы знали во всех подробностях характер скрещивания в рассматриваемых популяциях, все же провести границу между монофилией и полифилией нелегко.

Скудные и неполные ископаемые остатки не расскажут нам об особенностях скрещивания в популяциях приматов; значит, имеющиеся данные никогда не позволят сделать выбор между моно- и полифилетическим происхождением человека. Аргументы за и против здесь носят скорее теоретический характер и сильно зависят от философских взглядов каждого автора.

Полифилетическое происхождение человека по разным конвергирующим эволюционным линиям от родственных, но различных популяций приматов теоретически вполне возможно. Подобная конвергенция эволюционных линий может порождаться факторами среды, ведущими к отбору в каждой линии одинаковых типов. Такая *конвергентная эволюция* хорошо известна у ряда групп. Но (и это довод *против* возможности полифилетического происхождения отдельных видов, скажем человека), насколько мы знаем, конвергентная эволюция никогда не приводила к такому большому сходству разных эволюционных линий, чтобы они начинали свободно скрещиваться между собой и становились одной генетически однородной популяцией.

Однако, если мы по тем или иным причинам принимаем гипотезу монофилетического происхождения человека, это еще не означает, что и высшие таксономические группы также должны иметь монофилетическое происхождение. Вернемся к седьмому допущению Керката и попытаемся сформулировать его строже: «внутри подтипа позвоночных одна определенная группа рыб дала начало амфибиям; одна группа амфибий — рептилиям; одна группа реп-

тилий дала начало птицам, а другая — млекопитающим». Ведь не вся «низшая» группа организмов, а лишь некоторые определенные формы этой «низшей» группы дают начало «высшей».

Казалось бы, седьмой постулат Керката в его более строгой формулировке говорит о монофилетическом происхождении упомянутых групп. Но это не так. Возьмем млекопитающих: известно, что в отдельной, но большой группе так называемых «звероподобных рептилий» было много более или менее параллельных линий эволюции (см. [3]). В пермском периоде все представители этих разных эволюционных линий, сильно различавшихся между собой (в частности, среди них были и хищники, и травоядные), одновременно проявили сходные тенденции к развитию от рептилий к млекопитающим. Важнейшие из этих тенденций — дифференциация ранее однородных зубов; облегчение скелета и черепа; развитие внутреннего уха. В разных эволюционных линиях это развитие шло с разной скоростью, поэтому представители какой-то группы могли иметь, например, уже дифференцированные зубы, но их скелет оставался массивным, а в другой группе уже имелся характерный для млекопитающих облегченный скелет и череп, но зубы оставались недифференцированными, коническими, как это характерно для пресмыкающихся. В противоположность эволюции человека, начавшейся с одного вида, отдельные популяции звероподобных рептилий дали в параллельных эволюционных линиях большое разнообразие по другим признакам, и их потомков приходится относить не только к разным видам, но и к разным родам и семействам.

Итак, надо полагать, что человек произошел от одной скрещивавшейся в себе популяции высших приматов. Млекопитающие произошли от большой группы разных популяций звероподобных рептилий, и эти популяции наверняка были генетически изолированными. И все же все они проявляли тенденцию к развитию тех признаков, на основании которых мы теперь выделяем класс млекопитающих. Таким образом, происхождение человека принципиально отличается от возникновения млекопитающих.

Данные палеонтологической летописи не позволяют решить, развился ли скелет, свойственный млекопитающим, только в одной или в нескольких (а то и во многих) эволюционных линиях звероподобных рептилий. Следовательно, по имеющимся данным мы не можем судить, являются ли млекопитающие монофилетической или полифилетической группой. Во всяком случае, ясно, что, даже если принять монофилетическое происхождение вида *Homo sapiens*, это еще не аргумент в пользу монофилии всего класса *Mammalia* и что большое разнообразие популяций, сгруппированных в класс *Mammalia*, — вспомним хотя бы основные группы (однопроходные, сумчатые и плацентарные) — указывает скорее на полифилетическое происхождение этого класса.

Такое «впечатление» еще более усиливается, когда мы возвращаемся немного назад. Рассмотрим развитие амфибий из особой группы рыб, *Crossopterygii* (кистеперых), от которой остался единственный живой представитель — целакант. И кистеперые, и ранние амфибии включали так много очень разных групп, что полифилетическое происхождение амфибий кажется вероятным.

Мы можем сделать следующий вывод: хотя монофилетическое происхождение отдельного генетически однородного вида представляется вполне вероятным, это не обязательно означает монофилию разных организмов, относящихся к более крупному таксону, такому, например, как млекопитающие или амфибии. Чем крупнее таксон, тем больше вероятность его полифилетического происхождения. В такие таксоны объединены отдельные эволюционные линии, сходные по морфологии, строению или биохимии, но не обладающие генетическим родством [5]. Итак, изучение более поздних стадий эволюции жизни не дает материала, который свидетельствовал бы в пользу второго постулата Керката: «Самозарождение произошло лишь однажды». Мы уже отмечали (и поговорим об этом подробнее в гл. XVI и XVIII), что долгое сосуществование преджизни и ранней жизни свидетельствует скорее в пользу полифилетического перехода от первой ко второй.

#### 4. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЖИЗНИ

Еще один аспект, важный для понимания истории ранней жизни, — это скорость распространения жизни на новых территориях. С точки зрения геолога, жизнь распространяется мгновенно.

После любой резкой смены условий (а таких смен много было в фанерозое), будь то регрессия моря, обнажающая целые материки, или его трансгрессия, поглощающая их, или любое другое резкое изменение условий среды, новая флора и фауна немедленно занимали освободившееся место. Этот процесс наблюдался и в наши дни, когда после вулканических извержений, опустошивших целые области, например извержений Кракатау или Суртсей<sup>1</sup>, новая флора и фауна установились за несколько лет. Конечно, сначала жизнь в таких местах скудна, но расцвет ее наступает так быстро, что с геологической точки зрения это происходит мгновенно.

Подобная же ситуация создается, когда группа организмов приобретает в процессе эволюции новые экологические возможности. Так случилось, например, в период расцвета рептилий или распространения млекопитающих. Рептилии развились в конце ка-

<sup>1</sup> Суртсей — вулканический остров, возникший в 1963 году в 30 км к югу от Исландии в результате подводного извержения. — *Прим. перев.*

менноугольного — начале пермского периода. Для рептилий, между прочим, характерен амниотический тип яйца. Такое яйцо крупнее яйцеклеток рыб или амфибий и позволяет эмбриону полностью сформироваться под защитой яйцевых оболочек. Это давало рептилиям явное преимущество перед амфибиями, так как молодая амфибия выходит из яйца еще несформировавшейся, с жабрами, и может жить только в водной среде. Это привязывает амфибий к болотистым местностям, где есть водоемы для откладки яиц. Напротив, рептилии могут откладывать яйца где угодно и не зависят от болот. В результате уже в пермском периоде пресмыкающиеся распространились по всем континентам, по окраинным и неглубоким морям. Аналогичная ситуация сложилась и в конце мелового периода, когда стали вымирать «господствующие рептилии» и млекопитающим наконец повезло. Они тоже за удивительно короткий срок заселили освободившиеся территории и уже в начале третичного времени вступили во владение экологическими нишами, опустевшими вследствие вымирания гигантских пресмыкающихся.

Эти данные, относящиеся к истории поздней жизни, можно распространить (в согласии с принципом актуализма) на историю ранней жизни. Очевидно, с появлением новых пространств или новых экологических возможностей первичные организмы занимали новые территории очень быстро (по геологическим масштабам). Этот вывод еще пригодится нам, чтобы проследить историю жизни в условиях смены состава атмосферы.

#### 5. ОПАСНОСТЬ УВЛЕЧЕНИЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ БИОХИМИЕЙ

Наконец, перечисляя аспекты эволюции поздней жизни, важные для понимания истории ранней жизни, надо сказать несколько слов об опасности увлечения выводами сравнительной биохимии. В сравнительной биохимии общепринято следующее утверждение: все более простые с биохимической точки зрения черты метаболизма живого являются более примитивными и, следовательно, более древними. Утверждение это остается недоказанным. Оно никогда не подвергалось проверке — видимо потому, что проверить его очень трудно. Между тем вполне возможно, что это утверждение ошибочно.

Однако этот постулат, кажется, прочно укоренился в молекулярной биологии. Это видно хотя бы из названия трудов симпозиума, состоявшегося в 1964 году: «Эволюция генов и белков» [1]. На этом симпозиуме делались попытки восстановить эволюцию генов и белков, исходя из современной биохимии. Правда, в докладах симпозиума иногда встречаются оговорки вроде: «Эксперименты... имеющие целью определить молекулярные и, возможно, эволюционные отношения» ([4], стр. 6; курсив мой). Но большин-

ство биохимиков и специалистов по молекулярной биологии склонны приравнять последовательность биохимических реакций в цепи какого-либо процесса к этапам эволюции. Обычно только систематики протестуют против такого чересчур упрощенного подхода.

Можно вспомнить, что подобный переход был не так уж давно распространен и в сравнительной анатомии современных организмов, из данных которой пытались «на скорую руку» вывести схемы эволюции поздней жизни. И здесь «простое» походя синонимизировали с «примитивным» и «древним», игнорируя данные палеонтологии. Возникло множество эволюционных деревьев, в которых представители отдельных параллельных или конвергирующих линий эволюции объединялись на основании анатомического сходства. Эти деревья строились часто без оглядки на стратиграфическое положение, т. е. на относительный возраст рассматриваемых форм. Не привлекая данных палеонтологии и стратиграфии, сравнительные анатомы считали одни формы предками других, появившихся на самом деле на десятки миллионов лет ранее. Единственным основанием было то, что предполагаемые «предки» выглядели «проще» по сравнению с потомками. Чтобы как-то совладать с тенденцией анатомов к упрощенным умозаключениям, геологам приходилось вновь и вновь напоминать, что предок всегда должен быть старше потомка.

Приведу простой пример. Первыми позвоночными были рыбы, а суша была завоевана гораздо позже более высокоорганизованными позвоночными. Но это не значит, что кита, тюленя или морскую корову мы должны считать самыми примитивными млекопитающими из-за того, что они живут в море. На самом деле они позже вернулись в «примитивную» среду, которую они теперь разделяют с рыбами. Конечно, это слишком очевидный пример, но я выбрал его нарочно: почти так рассуждают сейчас специалисты по сравнительной биохимии. «Простое» не обязательно означает «примитивное». Располагать современных микроорганизмов в ряд по принципу возрастания сложности метаболизма — это то же, что относить кита, тюленя и морскую корову к самым древним млекопитающим. Как уже отмечалось, мы не знаем даже, представляют ли собой современные анаэробные микроорганизмы остаток древней примитивной жизни или это сравнительно молодая ветвь новой жизни (вроде морских млекопитающих, не так давно отделившихся от ствола наземных *Mammalia*). Эволюционные схемы, в которых положение современных анаэробных бактерий устанавливается лишь на основании данных сравнительной биохимии, только создают впечатление, будто мы знаем о возникновении и истории жизни гораздо больше, чем на самом деле.

### Список литературы

1. *Bryson V., Vogel H. J.* (Editors), *Evolving Genes and Proteins*, Academic Press, New York, N. Y., 629 pp., 1965.
2. *Kerkut G. A.*, *Implications of Evolution*, Pergamon, London, 174 pp., 1960.
3. *Romer A. S.*, *Vertebrate Paleontology*, Univ. Chicago Press, Chicago, Ill., 468 pp., 1966.
4. *Tatum E. L.*, *Evolution and molecular biology*. In: *V. Bryson and H. J. Vogel* (Editors), *Evolving Genes and Proteins*, Academic Press, New York, N. Y., pp. 3—12, 1965.
5. *Whittaker R. H.*, *New concepts of kingdoms of organisms*, *Science*, 163, 150—160 (1969).

# МЕХАНИЗМЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ, СОХРАНЕНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ. ОРОГЕНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

## 1. КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ И СОХРАНЕНИЕ ПРОДУКТОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СТАДИЙ БИОПОЭЗА

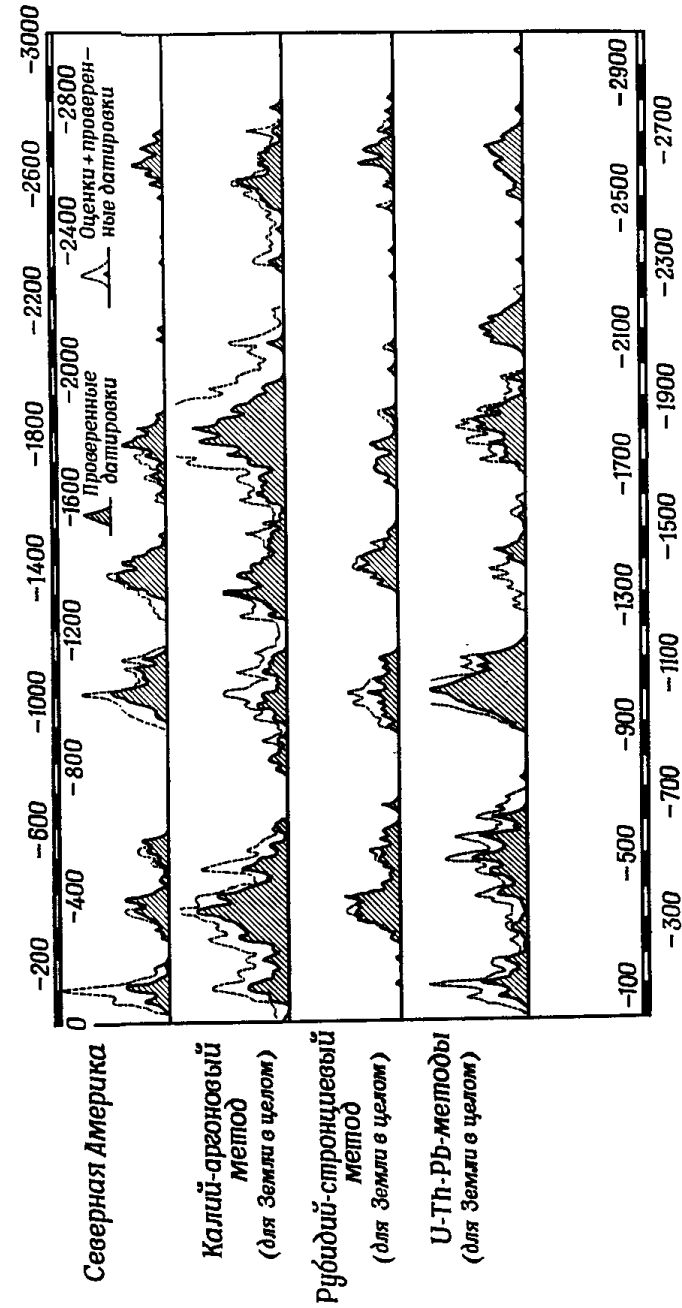
Эксперименты по проблеме возникновения жизни естественным путем до сих пор были в основном направлены на выяснение возможности неорганического синтеза «органических» молекул и на исследование типов реакций, которые могли привести от преджизни к жизни, или, иначе говоря, от предбиологических к биологическим системам. Но кроме синтеза должно было происходить также концентрирование и сохранение продуктов каждой стадии, иначе не было бы «сырья» для последующих реакций.

Хотя такие реакции, по-видимому, могли происходить в разбавленных растворах, все же для перехода к следующей стадии продукты предыдущей должны были как-то концентрироваться. Кроме того, образовавшиеся продукты должны были так или иначе сохраняться: ведь энергия, за счет которой шел синтез, могла разрушить продукты последующих реакций. Так, жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца, с помощью которого малые «органические» молекулы синтезировались, должно было разрушать все такие молекулы, по размеру приблизительно равные аминокислоте и крупнее.

С этой проблемой мы уже встречались. Итак, для того чтобы жизнь могла возникнуть, одного только синтеза «органических» молекул было недостаточно. Не менее важны процессы концентрирования, необходимые для дальнейшего развития последовательных стадий биопоэза, и процессы, обеспечивающие сохранение продуктов этих стадий. Пойдет ли развитие от простейших «органических» соединений к жизни, зависит в конечном счете от динамики всех процессов, участвующих в разных стадиях биопоэза, от равновесия между синтезом и распадом. *Время полураспада* (здесь мы заимствуем термин ядерной физики, мы встречались с ним в гл. III, разд. 7) продуктов последовательных стадий биопоэза — важнейший, до сих пор мало известный фактор.

## 2. ОРОГЕНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

Обратимся теперь к концепции *орогенического цикла*. Эта концепция оказалась плодотворной для развития наших представлений о геологической истории Земли. Я уже кратко коснулся ее



Фиг. 44. Возраст минералов, определенный разными методами [2].

Ясно видно, что величины абсолютного возраста докембрийских пород группируются вблизи некоторых значений. Конечно, частично это объясняется тем, что образцы минералов, происходящие из хорошо изученных районов, часто относятся к одной горной системе, т. е. близки по возрасту. Но на графике возраст пород Северной Америки (вверху) это учтено, и все же «сгущивание» данных хорошо выражено. Оно объясняется «омоложением» древних пород во время позднейших орогенических периодов.

в гл. II (разд. 7 и 8), приводя пример процесса, скорость которого изменяется на протяжении геологической истории. Орогенический цикл — главный элемент «пульса Земли» [9]. Его можно разделить на три основные фазы. Первая характеризуется общим спокойным состоянием земной коры и может охватывать различные, но сравнительно большие промежутки времени, не менее 100 млн. лет (но обычно более, до 500 млн. лет). За ней следует сравнительно короткий (продолжительностью порядка 50 млн. лет) период интенсивных движений коры. Цикл заканчивается фазой перехода к спокойному периоду следующего цикла; этот переход занимает несколько десятков миллионов лет.

Первый период называется *геосинклинальным*, второй — *орогенным*, а третий — *посторогенным*. Сейчас мы живем в посторогенный период последнего, так называемого альпийского орогенического цикла.

Уже в самых древних из известных пород коры мы находим следы сменявших друг друга орогенических циклов (фиг. 44, 99), и, исследуя происхождение жизни, с ними нельзя не считаться. Тут на первый план выступают две особенности орогенического цикла. Они взаимосвязаны, но лучше рассмотрим их по отдельности. Обе эти особенности обусловлены различиями в скорости движений коры в геосинклинальный, с одной стороны, и в орогенный в посторогенный периоды — с другой.

В геосинклинальный период движения коры, в том числе региональные поднятия ее, более ограничены, чем в две другие фазы цикла. Поэтому выветривание и эрозия в геосинклинальные периоды ослаблены по сравнению с двумя другими периодами. А поскольку выветривание в значительной мере основано на окислении, во время образования геосинклиналей уменьшается связывание атмосферного кислорода горными породами. Мы еще вернемся к этому в гл. XV (разд. 11 и 12).

С другой стороны, в орогенный и посторогенный периоды усиливаются не только движения коры, но и вулканическая активность. Основной компонент вулканических газов — двуокись углерода, поэтому в периоды активного орогенеза атмосферный запас  $\text{CO}_2$  увеличивается. Возрастает и содержание  $\text{CO}_2$  в морской воде (атмосферные газы растворяются в гидросфере). Повышение содержания  $\text{CO}_2$  в море следует за увеличением его концентрации в атмосфере с некоторым запаздыванием, но запаздывание это невелико (порядка  $10^3$  лет), и им можно пренебречь.

Другое важное следствие циклической активности земной коры — крайняя сглаженность рельефа материков в геосинклинальные периоды, когда движения коры замедлены. Моря, окружающие материки и временно их затопившие, в это время неглубоки (с океанами дело обстоит иначе); рельеф тех частей материков, которые не покрыты морем, равнинный.

Это объясняется тем, что в геосинклинальный период выветривание и осадконакопление протекают быстрее, чем вертикальные перемещения коры. Поднимающаяся часть материка просто не успевает вырасти в горную цепь или хотя бы возвышенность — эрозия стачивает ее быстрее, чем она растет. Таким образом, в геосинклинальный период даже поднимающаяся часть коры остается равнинной. С другой стороны, в медленно опускающихся частях идет быстрое накопление осадков; осадки заполняют впадину быстрее, чем опускается ее дно, поэтому моря остаются мелководными.

Правда, в каждый геосинклинальный период существуют пояса шириной в несколько сотен километров, которые опускаются немного быстрее. Осадки накапливаются там со скоростью до 10 км за 100 млн. лет. Но даже в этих поясах, называемых геосинклиналями, опускание обычно уравнивается осадконакоплением, так что моря все же остаются мелкими.

### 3. ДАТИРОВАНИЕ ОРОГЕННЫХ ПЕРИОДОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ОРОГЕНИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

В орогенные периоды каждого орогенического цикла перемещения коры усиливаются, на поверхность Земли выносятся большие массы горных пород, постепенно окисляющихся затем атмосферным кислородом. Нам необходимо знать, когда же имели место эти активные периоды. Важно выяснить, когда в истории Земли продуцирование кислорода ранней жизнью более всего отставало от окисления горных пород. Другими словами, в какие периоды производство кислорода было наиболее эффективным. Как мы увидим, датирование орогенных периодов методами, позволяющими определять их относительный возраст, дает лишь приблизительные, недостаточно надежные цифры. Методы определения абсолютного возраста позволяют непосредственно подойти к датированию орогенных периодов.

Определение относительного возраста оказалось в данном случае возможным благодаря тому, что во многих районах мы находим древние серии осадочных пород, подвергшихся в орогенный период пликативной деформации. В следующий, посторогенный период эти породы были подняты и частично разрушены эрозией, а затем, в геосинклинальный период очередного цикла, их покрыли горизонтальные пласты — иногда представленные эпиконтинентальными, а иногда — геосинклинальными фациями. Таким образом, между более древними складчатыми пластами и горизонтальными пластами следующего цикла образовалось так называемое *угловое несогласие* (фиг. 8).

Если пласты обоих циклов относятся к фанерозою, то их возраст можно определить по содержащимся в них окаменелостям,

а если таковых нет, то путем сопоставления с подобными пластами из других мест, в которых окаменелости обнаружены. Но при определении возраста данного горообразования мы можем лишь сказать, что оно «моложе самых молодых пород предыдущего цикла» и «древнее самых древних пород последующего цикла». Много зависит от времени, прошедшего между складкообразованием данных пород предыдущего цикла и возникновением несогласно залегающих пластов нового цикла.

При определениях абсолютного возраста выяснилось, что древние породы в основании геосинклиналей новых поясов складчатости часто так нагревались, что расплавились полностью или частично. В таких породах часть вещества приобретала подвижность, мигрировала; при этом часто мигрировали и дочерние элементы, возникающие при распаде естественных радиоактивных элементов. В результате вкрапление радиоактивного вещества в древней породе во время одного из последующих орогенических циклов могло растерять все свои дочерние элементы или хотя бы часть их, хотя данная порода, по всей видимости, оставалась твердой и не плавилась. Такая порода называется *регенерированной*; радиометрический ее возраст занижен.

Тщательный анализ различных цирконов и слюд, а также различных пород Швейцарских Альп рубидий-стронциевым методом показал, что чем мельче зерна минерала, тем полнее был регенерирован этот минерал [5, 6]. С тех пор для других складчатых поясов были получены данные, подтверждающие этот вывод. При этом использовались и другие ряды распада. Теперь мы довольно хорошо понимаем явление регенерирования древних пород в последующих орогенических циклах.

Частичным или даже полным «омоложением» древних пород геосинклинального пояса в последующих орогенических циклах можно объяснить, почему в очень многих случаях величины абсолютного возраста разных пород близки между собой ([2, 3]; фиг. 44). Конечно, здесь существует определенный разброс. Нельзя, как это иногда делают [4], утверждать, что любой возраст изверженных пород соответствует дате какого-то горообразования. Но распределение результатов радиометрического определения возраста по ряду отдельных довольно узких классов статистически достоверно.

Значит, для определения возраста докембрийских горообразований, когда в породах еще не было окаменелостей, годных для целей относительного датирования, мы можем использовать ту величину, вокруг которой группируются радиометрические данные — это и будет абсолютный возраст горообразования. Возрасты главных горообразований указаны на фиг. 99 [2]. Они определены именно этим методом. Более детализированный пример для докембрийских пород Миннесоты дается в табл. 13.

#### 4. КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ В ГЕОСИНКЛИНАЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ

Как мы уже знаем, геосинклинальные периоды во всех отношениях противоположны орогенным. Перемещения коры в это время минимальны. Материки, как правило, стачиваются эрозией до уровня моря, и даже в «подвижных» геосинклинальных поясах опускание идет так медленно, что уравнивается отложением осадков, заполняющих геосинклинали почти до уровня моря.

В результате в геосинклинальные периоды любого орогенического цикла и материка, и окружающие моря выровнены. На суше нет горных цепей или нагорий, в лучшем случае там и сям встречаются отдельные холмы; дно мелководных окраинных морей поднято до уровня материкового шельфа. Примеры типичного рельефа, характерного для геосинклинальных периодов, — современный бассейн Амазонки или некоторые низменности северо-западной Австралии. Рельеф здесь по преимуществу равнинный, и нам, существам посторогенного периода, привыкшим к неровному рельефу, созданному сравнительно сильными движениями коры, трудно представить себе Землю в такие времена.

Эта уплощенность, этот сглаженный равнинный характер были особенно сильно выражены вне геосинклинальных поясов. В этих областях, называемых *эпиконтинентальными*, отложение осадков и опускание шли со скоростью всего нескольких сот метров в 100 млн. лет. Моря были крайне мелкими, а суша едва возвышалась над уровнем моря.

Даже небольшие движения коры вызывали в таких районах огромные изменения. Имеются геологические доказательства того, что затопление и осушение огромных материковых пространств — *трансгрессии и регрессии* — многократно повторялись. Нередко береговая линия перемещалась то вперед, то назад на несколько сотен километров. Море заливало плоский материк только для того, чтобы почти сразу же отступить. Не было ущелий, нагорий или горных цепей, которые могли бы задержать воду.

Мы не находим никаких признаков столь знакомой нам эрозии побережий. Нельзя найти остатков береговой линии; с трудом удастся найти что-то вроде древних дюн. По всем признакам в геосинклинальные периоды более устойчивые части материков, эпиконтинентальные районы, выглядели как очень большие равнины, окруженные мелкими и тоже очень обширными морями.

В некоторых отложениях разного возраста, относящихся к фанерозою, на склонах долин или на морском обрыве удастся проследить отдельные пласты. Ясно, что серии таких пластов образовались в неглубоком море, затем, после поднятия, стали сушей, через некоторое время опять были залиты, после чего началось отложение следующего слоя, и так далее. Такие последовательности обычно прослеживаются на расстояние до 50 км (см., на-

пример, [8]). Типичный такой разрез недавно описал Мур [7]. На участке протяженностью в сотни и сотни километров можно проследить неоднократную смену мелководного моря и низкой суши. Значит, плоская местность, расположенная чуть выше уровня моря, имевшая в ширину не менее 50 км, заливалась морем, а вскоре вновь осушалась. К сожалению, до сих пор нет методов, позволяющих определять продолжительность каждого такого периода, оставившего пласт осадочных пород. Оценки, основанные на подсчете повторяющихся слоев в данной геологической системе, дают для каждого такого события продолжительность в 1000—10 000 лет.

На первый взгляд возможен другой, более интенсивный механизм погружения под воду и обнажения плоской суши, а именно приливно-отливные колебания уровня морей. Но я не решаюсь утверждать, что этот механизм действовал и на протяжении ранней истории Земли. Неизвестно, имела ли тогда Луна, а без Луны не было бы приливов. Я не смог найти следов приливно-отливных движений ни в одной из формаций описанного выше типа. В наше время приливы вносят в распределение морских отложений характерные особенности (система приливно-отливных пляжей и каналов), которые было бы невозможно проглядеть в древних осадочных породах. Таким образом, если Луна уже существовала в те времена, то вполне возможно, что приливная волна не проникала в мелководные моря, покрывавшие континенты, из-за того, что они были отделены грядами островов, или по другим сходным причинам.

Но нам не так уж важно знать точную продолжительность трансгрессий и регрессий. Необходимо лишь учитывать, что в любой геосинклинальный период каждого орогенического цикла такие процессы существовали. Они сильно разнообразили условия среды, влияя на протекающие в ней химические и биохимические процессы.

Представим себе, что обширный район (50 на 50 км, что уже дает площадь в 2500 км<sup>2</sup>) затоплялся морем, первичным «бульоном» той эпохи. Под действием испарения в этом мелководном бассейне могло идти концентрирование, т. е. из «жидкого бульона» получался «крепкий бульон». При последующей регрессии часть этого «крепкого бульона» могла попадать в грунтовые воды, циркулировавшие в пористых горных породах. В этой совершенно новой среде шло дальнейшее развитие веществ «первичного бульона», а затем очередная трансгрессия снова приносила исходный «бульон», и новые соединения могли реагировать с первичными.

Итак, признавая трудность образования «первичного бульона» в открытом море, в обычной океанской воде (гл. XIV, разд. 8), мы можем принять, что «первичный бульон» возникал в мелководных

бассейнах, куда океанская вода проникала затем при очередной трансгрессии.

Дальнейшее развитие этой модели приводит к предположению, что мелководные части океанов могли временами полностью или частично изолироваться от открытого океана. Возникали обширные внутренние бассейны. Состав воды в них изменялся независимо от океана и определялся главным образом климатом данной местности и характером окружающей изменности, дававшей сток в этот бассейн. Для простоты будем различать два типа климатов: влажный, в котором атмосферные осадки преобладают над испарением, и сухой, в котором преобладает испарение. Во влажном климате будут возникать пресноводные бассейны, а в сухом — содовые озера.

Мы еще вернемся к существованию обширных материковых водоемов в геосинклинальные периоды, говоря о докембрийских железорудных формациях (гл. XIII, разд. 11—14). Сейчас нам важно понять, что в геосинклинальные периоды характер рельефа Земли определяли огромные мелководные моря, внутренние бассейны и прилежащие к ним низменности и что море вновь и вновь заливало и оставляло эти плоские равнины.

Бернал [1] предложил в 1961 году теорию, согласно которой жизнь зародилась на берегах океана. Именно здесь на частицах глины могли адсорбироваться «органические» вещества из жидкого «первичного бульона». По мнению Бернала, только повышение концентрации этих веществ могло создать основу для дальнейшего развития жизни, а скопление на частицах глины — вполне вероятный способ концентрирования первичного «органического» вещества. Но в течение многочисленных геосинклинальных периодов такое концентрирование могло идти не только вдоль берегов океана. В такие периоды (а они составляют самую значительную часть геологической истории) концентрирование могло также происходить на обширных площадях, то заливавшихся морем, то вновь обнажавшихся. Вместо узких береговых линий, составляющих весьма малую часть общей поверхности Земли, концентрирование могло совершаться на огромных пространствах сглаженных эрозией материков.

Таким образом, модель Бернала вполне приложима не только к привычному нам посторогенному ландшафту, где суша встречается с морем только на узкой береговой линии, но и к обширным районам сменяющих друг друга трансгрессий и регрессий.

## 5. КРУГОВОРОТ ВОДЫ В МОРЯХ И НА СУШЕ

Итак, периоды затопления и обнажения суши многократно сменяли друг друга на протяжении большей части геологической истории. Давайте же разберемся в различиях между круговоротом воды

в море и на суше. Пренебрежем сейчас той водой, которая переходит из моря в атмосферу в форме мельчайших капелек брызг, срывааемых ветром с гребней волн, или в форме водяного пара. Тогда мы получим, что в морях, да и в озерах вода циркулирует только с течениями внутри самой водной массы. На суше же вода просачивается в землю и циркулирует в форме грунтовых вод в верхних слоях литосферы.

В морях и озерах водная масса теряет контакт с донными отложениями, как только они покрываются новым слоем осадков. На суше дождевая вода тесно контактирует с грунтовыми водами, во всяком случае с теми, которые находятся в верхних слоях литосферы.

В результате этого контакта образуются почвы. Поскольку почвы вполне могли играть важную роль и в концентрировании, и в сохранении «органических» веществ в периоды регрессии моря, упомянем здесь два основных типа почв. Различие между ними зависит от климатов, в которых они образуются, точнее от баланса между выпадением атмосферных осадков и испарением. Почвоведы, конечно, делят эти два типа на множество других: это необходимо для практической классификации почв мира. Тип почвы зависит, в частности, от того, равномерно ли распределены дожди на протяжении года или они выпадают в течение одного сезона. Но нас такие подробности не интересуют. Достаточно отметить, что в климатах с преобладанием атмосферных осадков над испарением формируются выщелоченные почвы типа *подзолов* или *латеритного типа*, а в противоположном случае образуются обогащенные почвы типа *чернозема*.

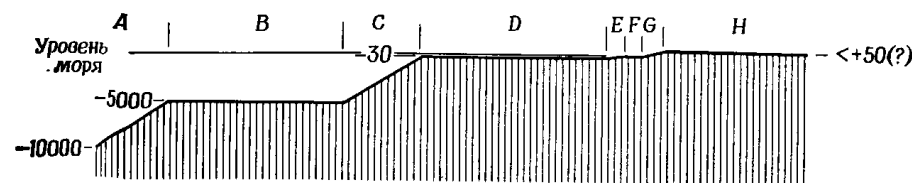
## 6. МЕХАНИЗМЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ

Все сказанное выше о процессах концентрирования и сохранения в период развития примитивной жизни из «органических» веществ первичного «бульона» схематически показано на фиг. 45—48.

Как указано на фиг. 45, мы должны различать глубоководную область мирового океана, мелководную область, литоральную зону и сушу. Глубоководную область можно в свою очередь разделить на океанические желоба, средние глубины и материковый склон. Под глубоководной областью мы здесь подразумеваем все воды, лежащие ниже материкового шельфа. Фототрофная зона, в которой еще достаточно света для интенсивного органического фотосинтеза, простирается примерно на 50 м в глубину, т. е. ниже континентального шельфа.

И в глубоких, и в мелких морях могут идти процессы концентрирования путем образования «мембран» на поверхности раздела вода — воздух и процессы образования коацерватных капель под действием прибоя (фиг. 46 и 47, а и б). Однако на поверхности

моря органические вещества не могут сохраняться: они ничем не защищены от разрушительных воздействий. В условиях бескислородной атмосферы таким разрушительно действующим фактором служит ультрафиолет, а в кислородной —  $O_2$ .



Фиг. 45. Схема ландшафтов, лежащих выше и ниже уровня моря. Все они тем или иным образом вносят вклад в сохранение и концентрирование веществ. Масштаб не соблюден.

Обозначения к фиг. 45—48:  
**A** — океанические желоба; **B** — средние глубины океанов; **C** — материковый склон; **D** — мелководные моря; **E** — прибрежный склон окраинного моря; **F** — литоральная зона; **G** — прибрежный склон суши; **H** — эродированный континент.  
**a—c** — процессы, идущие на уровне моря или вблизи уровня моря: **a** — образование мембран на поверхности раздела вода — воздух (см. фиг. 39); **b** — образование коацерватных капель под действием волн (см. фиг. 37); **c** — перенос по поверхности моря силой ветра и волн;  
**d, e** — процессы, идущие на дне неглубоких морей: **d** — перенос донного материала в сторону моря; **e** — этот материал постепенно достигает края материкового склона и участвует в медленном расширении мелководного моря;  
**f, g** — процессы, идущие в океане: **f** — погружение и постепенное осаждение веществ, более тяжелых, чем вода; **g** — океанские течения, перемещающие воду и препятствующие концентрации взвешенного в воде материала (концентрирование может происходить только на дне; с некоторых участков дна осевший материал сносится, на других он накапливается; в океанских желобах циркуляции воды практически не происходит);  
**h—i** — процессы, идущие в литоральной зоне: **h** — концентрирование тяжелых минералов в прибрежных россыпях; **i** — концентрирование растворимых веществ при испарении; **i** — перенос концентрированных легких веществ в сторону моря;  
**j—o** — процессы на суше (**j—l** — подзолистые или латеритные почвы; **m—o** — черноземы): **j** — грунтовые воды выщелачивают почву на глубину нескольких метров или даже десятков метров; **k** — часть выщелоченного материала выпадает из раствора на уровне грунтовых вод, образуя так называемую зону цементации; **i** — остаток переносится грунтовыми водами к морю; **m—o** — выщелачивание грунтовыми водами идет и выше, и ниже уровня грунтовых вод; ясно выраженная зона выщелачивания иногда отсутствует; **n** — выщелоченный материал в процессе испарения воды отлагается на поверхности или вблизи поверхности почвы.

В глубоких водах (от 30 м до 10 км) в какой-то степени действуют механизмы, способствующие сохранению веществ, концентрирование же идет лишь на морском дне, куда они осаждаются.

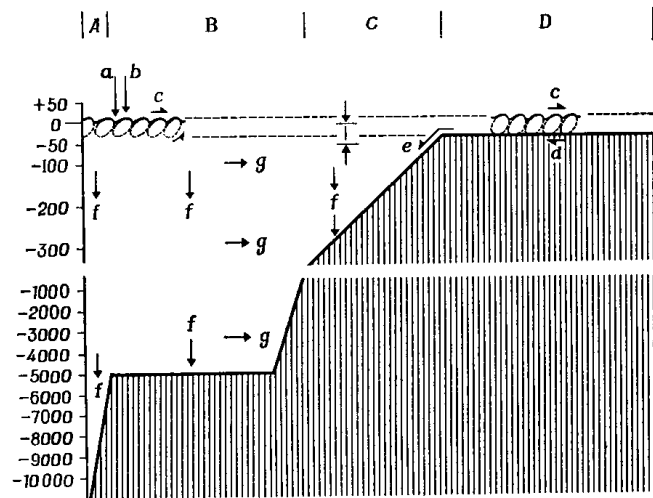
В мелководных районах концентрирование почти не идет, если не считать образования мембран и коацерватных капель на поверхности воды. В этих районах при каждой буре весь слой воды сильно перемешивается, в результате чего донные отложения перемещаются в сторону открытого моря.

В литоральной зоне, напротив, процессы концентрирования могут быть очень активными. При этом могут накапливаться более тяжелые минералы и образуются россыпи. Но в зависимости от рельефа и климата данной литоральной зоны здесь могут концентрироваться и вещества, растворимые в морской воде, и может идти образование эвапоритов. Однако, как и на поверхности моря,



при этом почти не действуют механизмы сохранения, поскольку и россыпи, и эвалориты одинаково подвержены атмосферным влияниям.

По-видимому, значительное концентрирование и сохранение «органических» веществ возможно только на суше. В начале регрессии, когда суша поднимается из моря или когда уровень моря



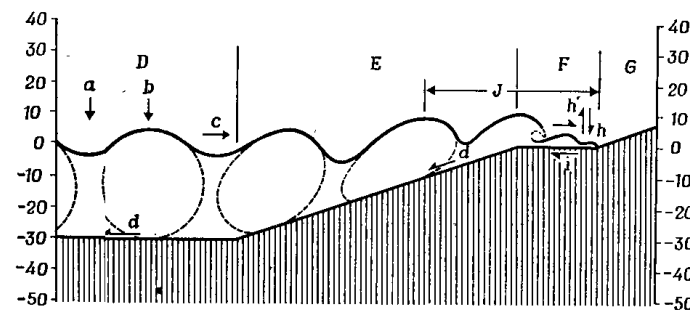
Фиг. 46. Схема циркуляции воды и возможных механизмов концентрирования и сохранения в море.

Масштаб не соблюден; расшифровка обозначений — в подписи к фиг. 45.

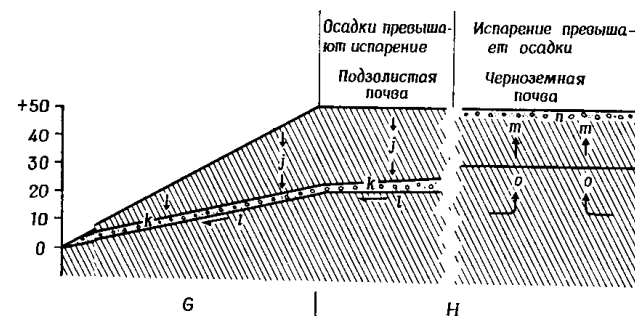
понижается и оно освобождает сушу (эффект в обоих случаях одинаков), верхние слои литосферы пропитываются первичным «бульоном». Количество «бульона», которое удерживается верхними слоями литосферы, зависит в основном от природы этих слоев. Если дно моря состоит из кристаллических подстилающих пород, то это количество минимально. Но если дно образовано рыхлыми осадками вроде песка, влага, удерживаемая таким субстратом, может составлять половину его объема и проникать в его толщу на несколько десятков метров вглубь. При дальнейшем подъеме суши начинается циркуляция грунтовых вод, поскольку на воду, лежащую выше уровня моря, всегда действует сила гравитации. Грунтовые воды стремятся стечь к морю: дождевая вода частично впитывается в землю, пополняя запас грунтовых вод и поддерживая их поток.

Таким образом, различие между отложениями, находящимися ниже уровня моря и лежащими выше него, состоит в том, что в первом случае нет или почти нет циркуляции воды. Морская вода, включенная в донные отложения, как бы «фоссилизуется»; вода

и содержащиеся в ней вещества больше не движутся, хотя возможны микроперемещения этого раствора, например в процессах адсорбции. Движение этой воды может начаться лишь с подъемом суши выше уровня моря.



Фиг. 47. Схема циркуляции морской воды вблизи берега. Масштаб не соблюден. Расшифровка обозначений — в подписи к фиг. 45.



Фиг. 48. Схема циркуляции пресной воды на суше. Даны схемы для низинностей (H) в разных климатах. Масштаб не соблюден. Расшифровка обозначений — в подписи к фиг. 45.

Под влиянием движения грунтовых вод начинается образование почв. На фиг. 48 схематически показаны наиболее различающиеся между собой типы почв, подзол и чернозем, и их роль в концентрировании. Образование почв и движение грунтовых вод способствуют не только концентрированию, но и сохранению «органических» веществ. Уже тонкий слой почвы может служить защитой от разрушительного действия ультрафиолета. В то же время в зависимости от скорости движения грунтовых вод в тех районах, где она более или менее застаивается, сравнительно быстро расходуется весь растворенный кислород и создаются бескислородные, анаэробные условия.

Однако довольно быстро достигается равновесное состояние: первичное «органическое» вещество продвинулось в своем разви-

тии на один-два шага, и ничего нового больше не происходит. Толчком к дальнейшему развитию может стать очередная трансгрессия, при которой почвы, образовавшиеся на временной суше, опять погружаются в воды первичного «бульона» и могут получить новые порции первичных «органических» веществ.

Предположим, что очередная трансгрессия оказалась незначительной и образовались очень неглубокие бассейны типа лагун, в которых интенсивно идет испарение. Тогда почвы соприкасаются с «крепким бульоном», и реакции могут значительно ускориться. Это предположение вполне согласуется с преобладанием плоского рельефа в геосинклинальные периоды. Ведь чем слабее выражены движения коры, тем больше вероятность образования лагун, в которых неизбежно идет испарение.

#### Список литературы

1. Bernal J. D., Origin of life on the shores of the ocean. In: M. Sears (Editor), Oceanography, Am. Assoc. Advan. Sci., Washington, D. C., pp. 95—118 (1961).
2. Gastil G., The distribution of mineral dates in time and space, Am. J. Sci., 258, 1—35 (1960).
3. Gastil G., Continents and mobile belts in the light of mineral dating, Intern. Geol. Congr., 21st, Copenhagen, 1960, Rept. Session, Norden, 9, 162—169 (1960).
4. Gilluly J., Orogeny and geochronology, Am. J. Sci., 264, 97—111 (1966).
5. Jäger E., Rb-Sr age determinations on micas and total rocks from the Alps, J. Geophys. Res., 67, 5293—5306 (1962).
6. Jäger E., Niggli E., Rubidium-Strontium Isotopenanalysen an Mineralien und Gesteinen des Rotondogranites und ihre geologische Interpretation, Schweiz. Mineral. Petrog. Mitt., 44, 61—81 (1964).
7. Moore R. C., Stability of the earth's crust, Geol. Soc. Am. Bull., 81, 1285—1323 (1970).
8. Pirlet H., La sédimentation rythmique et la stratigraphie du Viséen supérieur V3b, C3c inférieur dans les synclinoriums de Namur et de Dinant, Mém. Acad. Roy. Belg., 2, 17, 4, 98 pp., 1968.
9. Umbgrove J. H. F., The Pulse of the Earth, 2nd ed., Nijhoff, The Hague, 358 pp., 1947.

## ГДЕ ИСКАТЬ ОСТАТКИ РАННЕЙ ЖИЗНИ. ДРЕВНИЕ ЩИТЫ

### 1. РАЗРОЗНЕННОСТЬ ПЕРВЫХ СТРАНИЦ ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКОЙ ЛЕТОПИСИ

Данные геологии о происхождении жизни до обидного скудны. От ранней истории нашей планеты осталось очень мало ископаемых остатков. Это объясняется, во-первых, малыми размерами ранних форм жизни и отсутствием у них скелета и, во-вторых, огромным возрастом древних пород. В гл. VIII, разд. 4 мы уже говорили о том, что ранняя жизнь была представлена микроорганизмами, а в следующей главе мы подробно обсудим вопрос о микроскопических размерах первобытных организмов и об отсутствии у них твердых частей. В этой же главе мы должны кратко ознакомиться с теми областями Земли, в которых можно найти древнейшие горные породы.

Большинство пород, возникавших тогда, давно исчезло с лица Земли. Они погребены под более молодыми пластами, в основном под пластами осадочных пород разной мощности — от нескольких сот метров до нескольких десятков километров, смотря по скорости опускания коры в этом районе с начала фанерозоя.

В районах, где мощность отложений не превышает 10 км, буровые скважины все чаще и чаще достигают древних пород, называемых геологами-нефтяниками *подстилающими* породами. В связи с поисками нефти мы получили много новых сведений о структуре этих пород, скрытых толстым слоем отложений. Но эти данные мало что дают для исследования ранней жизни. Вероятность отыскать в керне породы длиной несколько сантиметров и диаметром 2—3 см какой-либо из редчайших ископаемых остатков, относящихся к докембрию, пренебрежимо мала. Поэтому нас должны интересовать те районы, где докембрийские породы обнажены, выходят на поверхность. Эти области называются *древними щитами*.

Но и здесь обнаженные породы претерпели так много изменений, что все следы ранней жизни, если они и были, оказались уничтоженными. Ведь породы, обнаженные сейчас, были в течение какого-то периода погребены под фанерозойскими отложениями. Обширные области претерпевали складкообразование; происходили интрузии огромных масс магмы — остывая, она давала изверженные породы, например граниты. Древнейшие породы, таким образом, претерпевали воздействие повышенной температуры и давления. В результате происходило перемещение некоторых минералов — ведь при повышении температуры и давления дости-

гается точка плавления отдельных минералов. Они перегруппировывались, происходила их перекристаллизация в крупные кристаллы того же состава или даже в кристаллы других, новых минералов. Во всяком случае, первичные структуры древнейших пород, в том числе и окаменелости, разрушались.

## 2. ДРЕВНИЕ ЩИТЫ

Как мы уже знаем, это те районы Земли, где на больших пространствах обнажены докембрийские горные породы. На фиг. 49 показано, что древние щиты в определенном смысле образуют ядра материков. В северном полушарии это Канадский, Балтийский и сложный Азиатский щиты; более или менее аналогичные им щиты мы находим и в южном полушарии: в Бразилии, Южной Африке и Австралии. Есть и небольшие, обособленные щиты — это Мадагаскар и Индийский субконтинент (Индостан). Не всегда древние щиты образуют ядро материка — это особенно хорошо видно на примере Южной Африки. Щиты также не всегда окружены более молодыми породами, иногда они прямо примыкают к океану.

Любой читатель, хоть немного интересующийся геологией, знает, что сравнительно недавно геологами удалось многое сделать для выяснения прежнего распределения материков на земном шаре. Сейчас почти все специалисты считают, что на Земле имеет место значительный дрейф континентов. Их движение доказано в основном для промежутка времени начиная с пермского периода и до наших дней. О положении материков в более ранний период истории Земли мы знаем очень мало; насколько известно, дрейф материков не оказывал особого влияния на раннюю историю жизни.

В большинстве учебников геологии подчеркивается значительное отличие древних щитов от более молодых участков земной поверхности. На фиг. 49, взятой из книги Умбгрове «Пульс Земли» [7], породы древних щитов обозначены равномерным пунктиром, а более молодые породы — упорядоченными рядами точек, указывающими основные направления поясов складчатости трех главных периодов орогенеза фанерозоя.

Следует подчеркнуть, что это лишь кажущееся различие. Классическая геология проводит его, основываясь на существовании резкого разрыва между докембрием и всей остальной геологической историей. Как мы знаем из гл. III, единственное отличие, заставляющее разделять историю Земли на два больших периода, состоит в том, что в породах докембрия почти нет окаменелостей, позволяющих выделить стратиграфические подразделения и провести определение относительного возраста. Напротив, деление докембрия на архей и альгонкий, или, как их называли прежде, азой и протерозой, лишено, как мы видели (гл. III, разд. 4), всякого реального основания.

Только современные методы определения абсолютного возраста дают ключ для выделения древних щитов. Раньше сравнительный возраст разных щитов и даже разных областей одного и того же щита определялся на основании скорее догадок, чем фактов.

В табл. 13 даны основные подразделения докембрия для Миннесоты как пример более современного деления докембрия. Таким образом, разная штриховка древних щитов и более молодых пород на фиг. 49 не означает их принципиального различия, а говорит лишь о том, что мы практически ничего не знаем о древних щитах.

Таблица 13

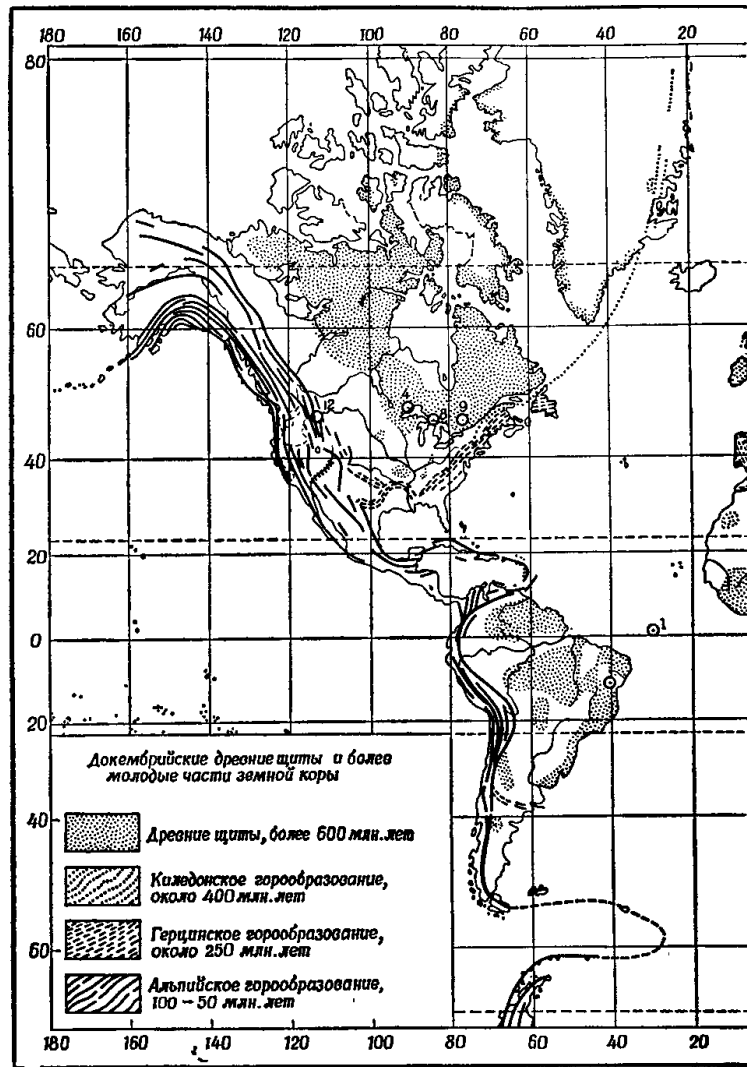
Подразделение докембрия Миннесоты<sup>1</sup>  
(из [4]; см. также табл. 19)

Названия, принятые у канадских геологов	Эра	Система	Период горообразования	Возраст (×10 <sup>9</sup> )	
Палеозой	Палеозойская	Кембрийская		—0,6—	
			Гренвилльский	—1,0—	
	Протерозой	Позднедокембрийская	Кивино		
		Среднедокембрийская	Гуронская	Пинокинский	—1,7—
Архей	Раннедокембрийская	Тимискаминг	Альгомский	—2,5—	
			Лаврентьевский	— ? —	
		Онтарио			

<sup>1</sup> В этой области Канадского щита альгомское горообразование вызвало сильный метаморфизм на больших площадях и многочисленные интрузии изверженных пород. Эти слои раньше, когда еще не существовало методов определения абсолютного возраста, принимали за границу между археем и протерозоем. Кое-где подобный эффект вызван другим горообразованием ранним или более поздним; соответственно перемещалась и граница между археем и протерозоем. В общем все сильно метаморфизованные слои пород раньше относили к архею, и в Канаде граница протерозоя означает просто возраст последнего крупного докембрийского орогенеза в данном районе. Эта граница, таким образом, не связана с каким-то определенным возрастом.

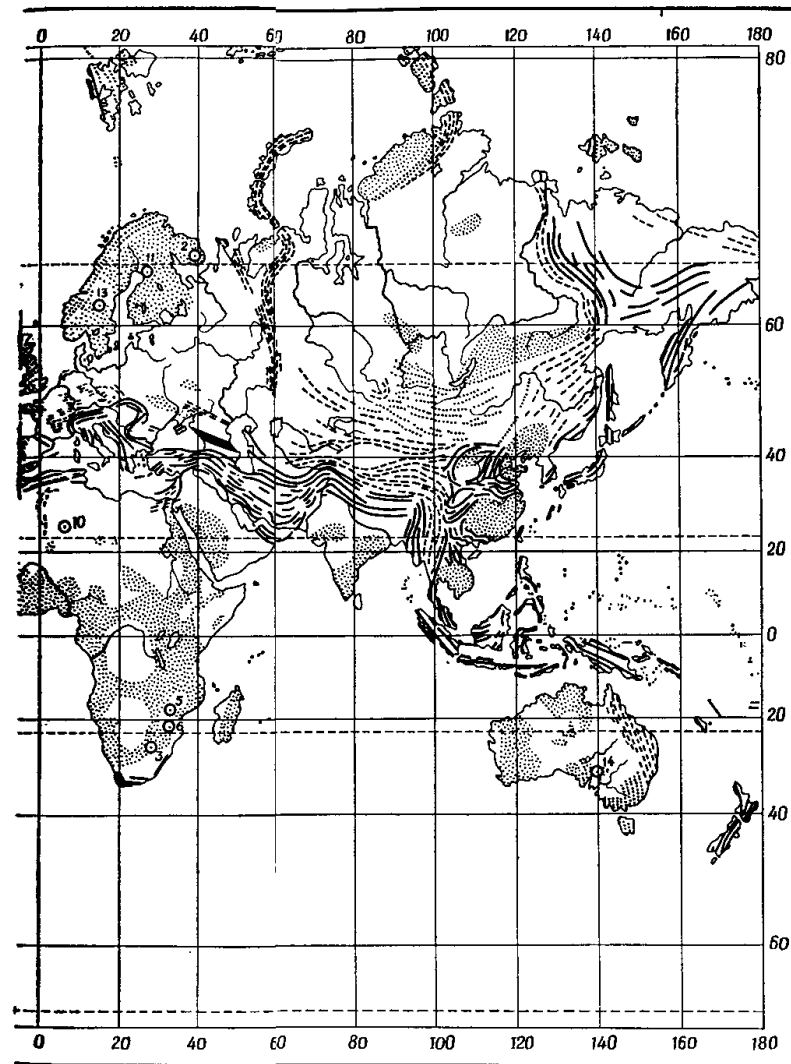
## 3. СТАБИЛЬНОСТЬ ДРЕВНИХ ЩИТОВ В ТЕЧЕНИЕ ФАНЕРОЗОЯ

И все же древние щиты на фиг. 49 не случайно выделены равномерным пунктиром: они отличаются от других районов материков по стабильности коры. За все время фанерозоя древние щиты испытывали лишь относительно небольшие вертикальные перемещения, причем поднятие и опускание часто сменяли друг друга. Вне древних щитов разыгрывались события трех главных периодов горообразования фанерозоя и нескольких менее важных периодов нестабильности. В эти периоды происходили как вертикальные перемещения, так и складкообразование.



Фиг. 49. Схематическая текто-

Показаны докембрийские древние щиты и распространение пород, относящихся в трех случаях к докембрийскому времени: 1 — граниты Кольского полуострова, древнейшие из известных пород (гл. III, разд. 14); 2 — система Свазиленд (серии Онвервайт и Фиг-Три); древнейшие из известных мало измененных осадочных пород; возраст более 2,7 млрд. лет (гл. XII, разд. 9); 3 — система Сванетия (серии Охрид и Фиг-Три); древнейшие из известных мало измененных осадочных пород; возраст более 2,7 млрд. лет (гл. XII, разд. 9); 4 — железорудная формация Соуден; осадочные породы с молекулярными ископаемыми; возраст более 2,7 млрд. лет (гл. XII, разд. 9); 5 — макроскопические биогенные отложения; водорослевые известняки, описанные Мак-Кларком; возраст свыше 3,2 млрд. лет (гл. XII, разд. 17); 6 — комплекс Витватерсранд; 7 — золото-урановые руды Сетра-де-Жакобина, сходные с комплексом Витватерсранд; возраст 1,8 млрд. лет (гл. XIII, разд. 10); 8 — серия Ганфлинт; древнейшая хорошо сохранившаяся микрофлора, возраст около 2 млрд. лет (гл. XII, разд. 5); 9 — золото-урановые руды Сетра-де-Жакобина, сходные с комплексом Витватерсранд; возраст 1,8 млрд. лет (гл. XIII, разд. 10); 10 — водорослевые рифы, образованные *Conorhynchon* (гл. XII, разд. 5); 11 — серия Белт, поздний докембрий, возраст более 1,1 млрд. лет (гл. XII, разд. 6); 12 — хорошо сохранившаяся микрофлора; возраст 1,4 млрд. лет (гл. XIII, разд. 17); 13 — песчаники Дала, древнейшие красцветные толщи (?); возраст 0,6—1 млрд. лет (гл. XII, разд. 4).



Геологическая карта Земли [7].

1 — скалы св. Петра и Павла; вещество мантии (гл. III, разд. 14); 2 — граниты Кольского полуострова, древнейшие из известных пород (гл. III, разд. 14); 3 — система Свазиленд (серии Онвервайт и Фиг-Три); древнейшие из известных мало измененных осадочных пород; возраст более 2,7 млрд. лет (гл. XII, разд. 9); 4 — железорудная формация Соуден; осадочные породы с молекулярными ископаемыми; возраст более 2,7 млрд. лет (гл. XII, разд. 9); 5 — макроскопические биогенные отложения; водорослевые известняки, описанные Мак-Кларком; возраст свыше 3,2 млрд. лет (гл. XII, разд. 17); 6 — комплекс Витватерсранд; 7 — золото-урановые руды Сетра-де-Жакобина, сходные с комплексом Витватерсранд; возраст 1,8 млрд. лет (гл. XIII, разд. 10); 8 — серия Ганфлинт; древнейшая хорошо сохранившаяся микрофлора, возраст около 2 млрд. лет (гл. XII, разд. 5); 9 — золото-урановые руды Сетра-де-Жакобина, сходные с комплексом Витватерсранд; возраст 1,8 млрд. лет (гл. XIII, разд. 10); 10 — водорослевые рифы, образованные *Conorhynchon* (гл. XII, разд. 5); 11 — серия Белт, поздний докембрий, возраст более 1,1 млрд. лет (гл. XII, разд. 6); 12 — хорошо сохранившаяся микрофлора; возраст 1,4 млрд. лет (гл. XIII, разд. 17); 13 — песчаники Дала, древнейшие красцветные толщи (?); возраст 0,6—1 млрд. лет (гл. XII, разд. 4).

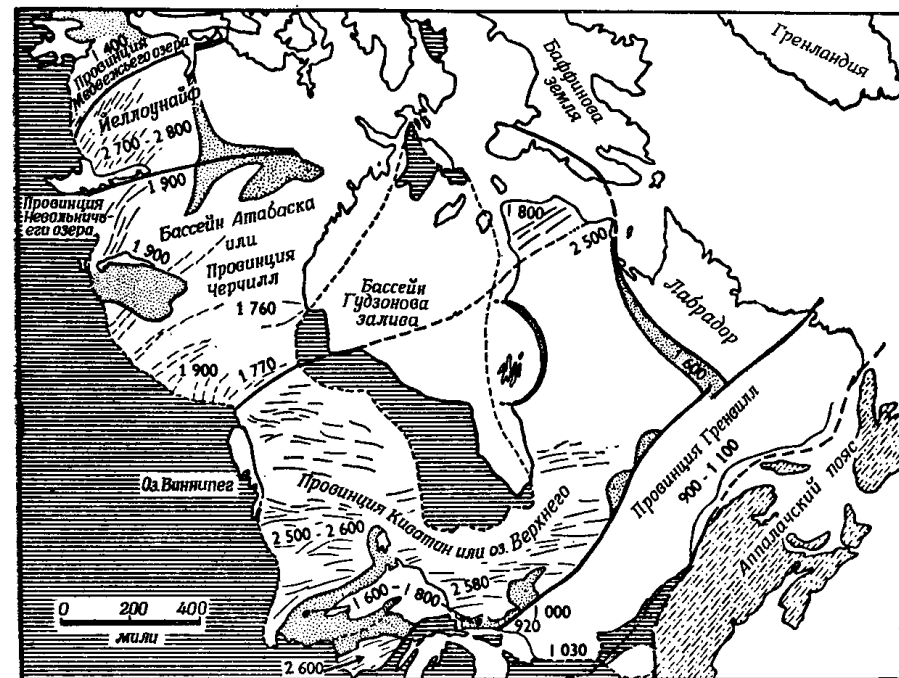
Устойчивость сохраняли не только те районы, где теперь мы находим обнажения докембрийских пород, но и более или менее широкие их края, на которых породы докембрия покрыты горизонтальными пластами палеозоя. Эти краевые области, также не подвергавшиеся в фанерозое складкообразованию, по структуре принадлежат к той же провинции, что и древние щиты. Различие состоит лишь в том, что палеозойские породы, покрывавшие ранее и области, называемые теперь древними щитами, частично снесены эрозией. Районы устойчивости на Североамериканском континенте, оставленные на фиг. 49 незаштрихованными, называют «стабильной внутренней частью». Итак, древние щиты вместе с окружающими стабильными районами оставались на протяжении новой истории Земли сравнительно неизменными. Новые орогенетические циклы создавали складчатость вне районов, где горообразование шло до того, причем даже более или менее концентрически вокруг этих районов. Из этого правила есть исключения: не раз бывало, что новый пояс складчатости пересекал старые. Но в общем на всех материках есть участки, не подвергавшиеся сильным изменениям за весь период фанерозоя. Новая складчатость на них не возникала. Причина этого остается до сих пор загадкой для геологов. Раньше проводили довольно наивное сравнение с рифленным железом, которое прочнее, чем листовое. Но эта параллель не годится для земной коры: она не объясняет, почему все же новые складки часто ложатся поперек старых, а не рядом с ними. Кроме того, земная кора по свойствам не похожа на железо, у нее другие характеристики.

Положение о сравнительной стабильности древних щитов верно лишь для фанерозоя. Только в фанерозое эти щиты оставались относительно неизменными, а новые пояса складчатости возникали в соседних районах. В ранней геологической истории такой устойчивости не было, и внутренняя структура древних щитов ничуть не проще строения тех областей коры, которые подвергались изменениям во время более поздних орогенетических циклов.

#### 4. СЛОЖНАЯ СТРУКТУРА ДРЕВНИХ ЩИТОВ

Каждый древний щит, как и области вне его, состоит из древних и более молодых поясов складчатости. Какая-то часть областей, возникших в более древние периоды складкообразования, не подвергалась в дальнейшем изменениям в более поздних орогенетических циклах, точно так же, как это было и в более близкие к нам времена геологической истории, в фанерозое. Таким образом, древний щит не представляет собой однородного ядра материка. Щит и сам состоит из древних и более древних участков, окруженных, а иногда и пересеченных более молодыми поясами складчатости. Для Североамериканского континента это ясно показано на фиг. 50 и 51.

Мы должны уяснить себе эту сложность строения древних щитов, чтобы понять, где можно было бы найти остатки ранней жизни. Ведь они могли сохраниться только в областях, остававшихся неизменными с самого момента их формирования. В таких

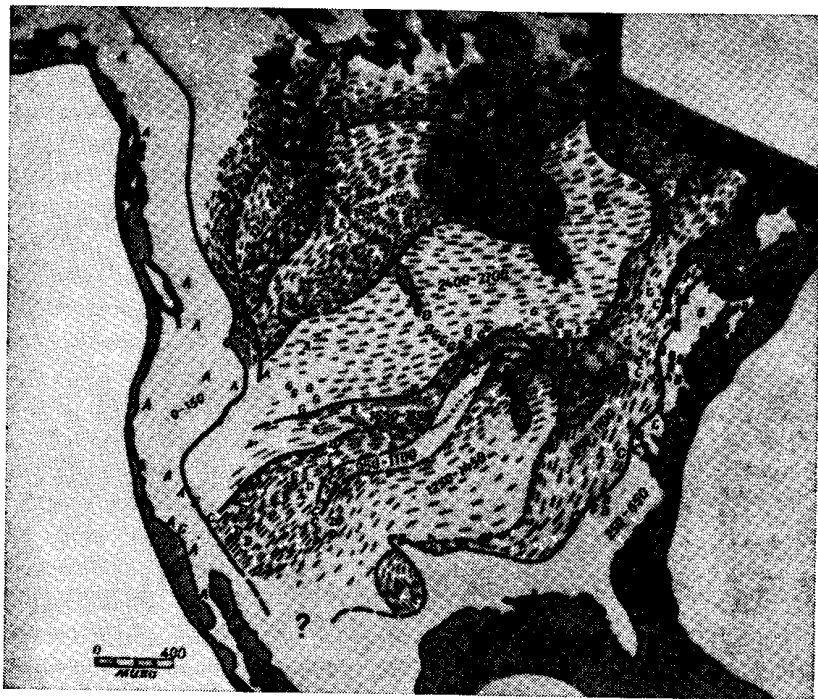


Фиг. 50. Схематическая геологическая карта Канадского щита с указанием провинций и возраста самых молодых гранитов каждой провинции [5].

Показан Аппалачский пояс складчатости, окаймляющий щит с юго-востока; изображены палеозойские породы (горизонтальная штриховка) и более молодые породы стабильного ядра, окаймляющие щит с юга и запада. Точками отмечены области, в которых докембрийские породы не претерпели в дальнейшем смятия в складки или испытали лишь небольшое смятие. Сравнивая Канадский щит с Африканским (фиг. 52), мы видим, что на Африканском щите таких кратонных областей значительно больше и они гораздо обширнее. Докембрийские пласты, характеризующиеся существованием хорошо выраженных поясов складчатости, обнаруживаются не только на поверхности щита, но и под напластованиями более молодых пород (фиг. 51).

областях могли отлагаться сравнительно маломощные толщи пород, не слишком сильно затронутые в последующие периоды горообразования. Следовательно, в этих районах не было сильного повышения температуры, связанного с накоплением новых мощных пластов, да и магматическая активность была здесь небольшой. Лишь в таких областях, называемых *кратонами*, есть надежда обнаружить неизменные первичные структуры пород, а в них и окаменелости. Но в главных поясах докембрийской складчатости первичные структуры почти наверняка разрушены в процессе метаморфизма и магматизации. Пример различия в степени мета-

морфизма разновозрастных пород в главных поясах складчатости и в сравнительно мало нарушенных эпиконтинентальных зонах можно найти в кембрийских породах Европы. В течение кембрия вокруг Фенноскандского щита, а возможно, и на нем происходило отложение осадочных пород. В Норвегии и Шотландии возник геосинклинальный бассейн, наполнившийся мощной толщей осадков,



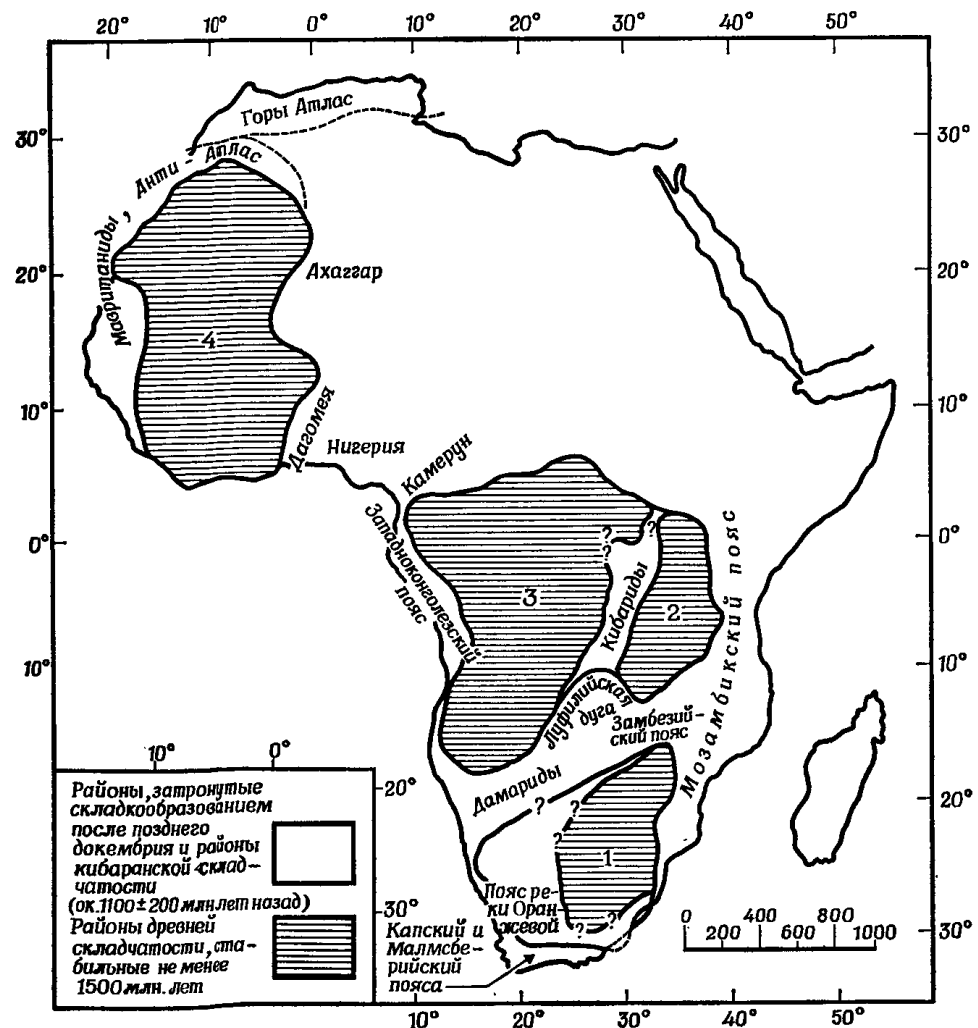
Фиг. 51. Схематическая карта, показывающая сложное строение докембрия Северной Америки [3].

Благодаря большому числу глубоких нефтеразведочных скважин, проникших в докембрийские подстилающие породы, стало возможным изучить картину залегания пластов докембрия и вне Канадского щита, где они выходят на дневную поверхность (фиг. 49, 50). Кора образована сложной системой докембрийских поясов складчатости (G—C), сходных с более молодыми, такими, как Аппалачский (B) и Кордильерский (A). Прибегая к упрощению, можно сказать, что возраст пояса складчатости — это возраст самых молодых найденных в нем минералов. Более древние датировки получены для минералов, которые не были полностью преобразованы во время последнего горообразования. На деле датировки двух последовательных горообразований могут сливаться, как это случается с каледонским и герцинским горообразованиями в Аппалачском поясе (B). Но в общем здесь ясно видны отдельные пояса складчатости разных возрастов. Более древние пояса могут пересекаться молодыми. Цифры на рисунке — возраст в млн. лет. A — 60—180 млн. лет; B — 240—550 млн. лет; C — 910—1140 млн. лет; D — 1230—1480 млн. лет; E — 1580—1855 млн. лет; F — 2030—2380 млн. лет; G — 2415—2700 млн. лет.

которая во время каледонского горообразования подверглась смятию в складки и магматизации. На востоке, вокруг Балтийского моря и до Урала, отложились менее мощные толщи пород эпиконтинентальной фации, не подвергавшиеся складкообразованию.

Сейчас все кембрийские породы каледонского пояса складчатости более или менее метаморфизованы и представляют собой сланцы и гнейсы. Но эпиконтинентальные кембрийские глины в окрестностях Москвы до сих пор так мягки, что их можно использовать как сырье для изготовления кирпичей.

Конечно, чем дальше мы углубляемся в прошлое, тем меньше находим участков, оставшихся нетронутыми. Чем древнее порода, тем меньше вероятность того, что она прошла неизменной через все последующие горообразования и сохранила какие-то остатки ранней жизни. Многочисленным ископаемым остаткам кембрия



Фиг. 52. Схематическая карта Африки, показывающая основные структурные регионы и время их последней горообразовательной деформации [1]. Четыре древнейших кратора: 1) Родезийско-Трансваальский; 2) Танзанийский; 3) Ангольско-Касайский; 4) Западноафриканский. Система Свазиленд находится в Родезийско-Трансваальском кратоне.

## ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ

исполнилось «только» полмиллиарда лет, а более поздним — и того меньше. Из следующей главы мы узнаем, что изучение остатков ранней жизни уводит нас на 3 млрд. лет назад.

Разрушительное действие последовательных орогенических процессов сильно ограничивает протяженность палеонтологической летописи в прошлое. Самым древним из известных пород земной коры 3,3 млрд. лет; это древние граниты Кольского полуострова. Можно надеяться, что в этих породах еще сохранились минералы, «помнящие» историю радиоактивного распада элементов более древних пород, в состав которых они некогда входили. Но метаморфизм уничтожил в этих гранитах все следы живого. Может быть, мы когда-нибудь найдем в других, менее изученных древних щитах, у которых ядро, сложенное древнейшими осадочными породами, менее изменено, остатки самой ранней жизни. Но пока история и строение древних щитов ставят непреодолимые препятствия изучению форм ранней жизни.

Из разд. 18 следующей главы мы узнаем, что в Южной Африке, в формациях Фиг-Три и Онвервахт системы Свазиленд (фиг. 49, точка 3) найдены древнейшие из известных осадочных пород, избежавшие значительного метаморфизма. Как полагают, в них имеются остатки древней жизни. В Африке сравнительно много очень древних кратонных областей, не затронутых последующими горообразованиями (фиг. 52). Поэтому считается, что вероятность найти древние осадочные породы там больше, чем на других щитах. Но я не согласен с тем, что отложения Свазиленд являются древнейшими из пород, в которых можно искать остатки ранней жизни [2]. Хотя в Канадском и Балтийском щитах вряд ли сохранились более древние отложения, щиты Бразилии и Азии, возможно, скрывают еще более древние ядра.

## Список литературы

1. Clifford T. N., Radiometric dating and the pre-Silurian geology of Africa. In: E. I. Hamilton and R. M. Farquhar (Editors), Radiometric Dating for Geologists, Interscience, New York, N. Y., 299—416, 1968.
2. Engel A. E. J., Nagy B., Nagy L. A., Engel C. G., Kemp G. O. W., Drew C. M., Alga-like forms in Onverwacht Series, South Africa: Oldest recognized lifelike forms on earth, Science, 161, 1005—1008 (1968).
3. Gastil G., The distribution of mineral dates in time and space, Am. J. Sci., 258, 1—35 (1960).
4. Goldich S. S., Nier A. O., Baadsgaard H., Hoffman J. H., Krueger H., The Precambrian geology and geochronology of Minnesota, Minnesota Geol. Surv. Bull., 41, 1—193 (1961).
5. Holmes A., Principles of Physical Geology, 2nd ed., Nelson, London, 1288, 1966.
6. McGregor A. M., A Precambrian algal limestone in Southern Rhodesia, Trans. Geol. Soc. S. Africa, 43, 9—16 (1940).
7. Umbgrove J. H. F., The Pulse of the Earth, 2nd ed., Nijhoff, The Hague 358, 1947.

## 1. РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ОКАМЕНЕЛОСТЕЙ

Окаменелости мы обычно представляем себе как превратившиеся в камень остатки древних организмов. На деле же органическое вещество не обязательно полностью замещается неорганическими молекулами. И все же случаи, когда в окаменелостях еще содержится какая-то часть первичного органического вещества, являются исключением. Органическое вещество обычно удается обнаружить только в некоторых более молодых ископаемых остатках. Ископаемые остатки, с которыми мы обычно имеем дело, — это морфологически (но и только) неизменные остатки древней жизни: раковины, зубы, листья и тому подобное. Но встречаются также ископаемые других типов, о которых я счел полезным поговорить в этой главе. Это, во-первых, макроскопические биогенные отложения и, во-вторых, молекулярные биогенные отложения, т. е. молекулярные, или химические, ископаемые<sup>1</sup>.

Макроскопические биогенные отложения состоят из вещества, отложенного живыми организмами в процессе метаболизма<sup>2</sup>. Наиболее изученные и распространенные из таких отложений — известняки, образованные водорослями. Обычно их находят в тех местах, где грунтовые воды сильно насыщены карбонатами. Макроскопические биогенные отложения не сохраняют признаков вида, создавшего их, и в лучшем случае могут лишь рассказать, к какой большой группе относился этот вид. Во всяком случае, они свидетельствуют о том, что во время их образования жизнь уже существовала.

Молекулярные ископаемые — это молекулы биологического происхождения. Впервые они были обнаружены совсем недавно, в

<sup>1</sup> Проф. Эглинтон использует термин «химические ископаемые». Я заимствовал его в своем выступлении в 1965 году [74] (см. также [23]). Но в специальной литературе чаще используется термин «молекулярные ископаемые» [15, 17]. По-видимому, лучше придерживаться второго термина.

<sup>2</sup> На самом деле между раковинами и биогенными отложениями нет принципиального различия: ведь и раковины тоже результат метаболизма. Но раковины моллюсков и скелет кораллов секретируются особыми органами. Поэтому они хоть в какой-то мере отражают морфологию организма, образовавшего их. Раковины, зубы, кости у разных организмов различны по морфологии и позволяют определять вид. Возможно, лучше было бы различать морфологически специфичные биогенные отложения (или ископаемые остатки в собственном смысле слова) и морфологически неспецифичные отложения.

60-х годах. Это более устойчивые фрагменты крупных органических молекул, ранее входивших в состав организма, а затем распавшихся в процессе фоссилизации. От исходных биологических веществ, составлявших некогда организмы, ничего не осталось. Поэтому по молекулярным ископаемым нельзя определить, от каких организмов они остались. Они лишь свидетельствуют о наличии жизни в те времена. Но все же некоторые из этих остатков явно входили в состав совершенно определенных молекул, например хлорофилла, и, зная это, можно сделать кое-какие выводы о метаболизме оставивших их организмов.

Итак, в этой главе мы займемся не только обычными ископаемыми остатками, но вообще всеми остатками ранней жизни. Их три группы:

- 1) макроскопические биогенные отложения;
- 2) молекулярные биогенные отложения, или молекулярные ископаемые;
- 3) собственно ископаемые остатки (окаменелости).

## 2. ЖИВОЕ И НЕЖИВОЕ В ГЕОЛОГИИ

«Возвращаясь теперь к нашим размышлениям об отличии живого от неживого в современную эпоху, надо понять, что в геологии их различие проводится легко. В геологии мы не встречаемся с трудностями, знакомыми биологу, пытающемуся строго определить различие между живым и неживым.

Чтобы мы могли отличить ископаемые остатки от окружающей породы, они должны были сохранить характерную форму или строение, различимые невооруженным глазом или с помощью оптических приборов. Редко по ископаемым остаткам можно понять, от чего погибли организмы, разве что они найдены в вулканическом пепле или асфальтовой луже. Более того, мы очень слабо представляем себе, почему, когда и как эти остатки смогли сохраниться, как проходил процесс фоссилизации, распад первичного органического вещества и его замещение минералами. Из окаменелостей не изготовить свежий препарат для изучения под электронным микроскопом или суспензию для обработки в ультрацентрифуге. Короче говоря, ископаемые остатки не только мертвы — они подверглись захоронению и фоссилизации.

Следовательно, чтобы от ранних организмов остались окаменелости, они должны были обладать некоторой организацией, структурой. Организмы, окаменелые остатки которых мы находим через миллиарды лет, вполне могли принадлежать к «низшим» организмам, к микробам или водорослеподобным формам, и все же они уже должны были довольно далеко отойти от границы, которая так интересует биологов, — границы между неживым и живым.

Вряд ли можно сомневаться в том, что организмы, которые превратились в окаменелости, были вполне живыми, и, таким образом, их нельзя отнести к области перехода от преджизни к жизни».

Таково в общих чертах мое мнение по этому вопросу, высказанное еще в 1962 году. Эти выводы приложимы и к молекулярным ископаемым. Все мы представляем себе различие между органическими и неорганическими соединениями. Но мы знаем теперь, что это различие справедливо лишь для сравнительно новой части геологической истории, для позднего докембрия и фанерозоя, когда неорганический синтез органических соединений ввиду наличия кислородной атмосферы стал невозможным. Однако цитированные выше рассуждения неприменимы к раннему и среднему докембрию, когда Земля еще обладала бескислородной атмосферой. Тогда положение было совершенно иным. Во-первых, как мы видели, мог идти неорганический синтез «органических» соединений. Во-вторых, жизнь в то время была еще настолько примитивной, что на основании одних морфологических признаков часто нельзя сказать, имеем ли мы перед собой подвергнувшиеся фоссилизации остатки живых форм или остатки неорганически синтезированных «организованных элементов».

В разд. 4—6 этой главы мы увидим, что распознать довольно разнообразные формы ископаемых остатков, относящихся к позднему докембрию, нетрудно. Хорошо представлены формы ископаемой жизни и в пластах среднего докембрия (разд. 13). Но многие из «ископаемых» среднего докембрия устроены так просто, что, как мы узнаем из разд. 14, трудно найти черты, отличающие их от «организованных элементов». Тем более это относится к раннему докембрию: там еще не найдены структуры, которые можно с уверенностью относить к окаменелостям (разд. 18).

Примерно так же обстоит дело и на молекулярном уровне. Ведь неорганический синтез «органических» соединений не только был возможен, но и наверняка происходил во время раннего и среднего докембрия, причем в разных местах он протекал разными путями. Успешные эксперименты (гл. VI) доказали, что все необходимые для жизни соединения, вплоть до нуклеотидов и белков, могли тогда создаваться без участия организмов. Поэтому соединение, найденное в этих древних пластах, должно обладать целым рядом особых свойств, чтобы мы могли с уверенностью отнести его к биогенным, органическим (без кавычек) соединениям и утверждать, что оно входило в состав живого организма. Подробнее об этом мы поговорим в разд. 9—11, когда речь пойдет о молекулярных ископаемых. То, что было сказано о морфологически сохранных ископаемых остатках раннего докембрия, относится и к молекулярным ископаемым: они также пока не дают недвусмысленного доказательства существования жизни в то время.



Еще недавно специалисты относились к ископаемым остаткам раннего докембрия с большим энтузиазмом, но в последнее время преобладает осторожное отношение к ним. Это становится понятным в свете некоторых новых результатов, полученных при изучении геохронологии докембрия в последнее десятилетие. Но и сейчас еще некоторые авторы, ничтоже сумняшеся, описывают и морфологические, и молекулярные «ископаемые» из очень древних пластов, не отвечающие более строгим критериям, принятым сегодня.

До сих пор господствует мнение, что находки из древних пластов доказывают существование жизни, если они похожи на современные организмы. Поскольку наше знание о молекулярных структурах и морфологических проявлениях преджизни может развиваться, следует попытаться отыскать критерии, позволяющие четко отделить преджизнь от жизни. В 1965—1966 годах проф. Г. Юри, рассматривая аргументы за и против биологического происхождения части вещества углистых метеоритов (гл. XVII, разд. 6), писал: «По-видимому, можно с уверенностью сказать, что, если бы подобные вещества были найдены на Земле, им без колебаний приписали бы биологическое происхождение». Он не учел, что такие углистые вещества могли создаваться и абиотическим, неорганическим путем как на Земле, так и на родительских телах метеоритов. Хотя цитированное утверждение Юри повторялось в литературе [60], я убежден, что к изучению жизнеподобных остатков раннего и среднего докембрия, как и к изучению вещества углистых метеоритов, надо подходить с осторожностью. Исследуя очень древние горные породы Земли, мы, как и в случае с метеоритами, приближаемся к границе между неживым и живым.

Заключая этот раздел, подчеркнем еще раз, что в пластах позднего докембрия и фанерозоя геологи без труда отличают остатки жизни от неорганических образований, но для ранней истории Земли, для эпохи бескислородной атмосферы, такую границу между неживым и живым провести очень трудно — для геолога это не менее сложная проблема, чем для биолога.

### 3. ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ ПОЗДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

Наши представления о бедности первых страниц палеонтологической летописи требуют уточнения. О докембрийских ископаемых остатках существует довольно большая литература, но большинство этих остатков относится к позднему докембрию. Они ненамного старше своих потомков — организмов кембрийского периода. Хотя организмы позднего докембрия не имеют прямого отношения к проблеме происхождения жизни, мы рассмотрим здесь три примера ископаемых остатков организмов, относящихся к этому пе-

риоду, с тем чтобы подчеркнуть различие между ископаемыми остатками позднего докембрия и остатками жизни более ранних периодов, которым посвящена эта глава в целом. Мы познакомимся с остатками фауны позднего докембрия из Австралии; с позднедокембрийскими рифами из водорослевых известняков; с богатой микрофлорой докембрия Северной Америки. Эти остатки свидетельствуют, что уже в конце докембрия жизнь была хорошо развита и дифференцирована на животное и растительное царства. Единственное принципиальное различие между формами жизни позднего докембрия и раннего фанерозоя состоит в том, что у некоторых групп животных в фанерозое развились раковины, скелеты и другие твердые образования, хорошо сохраняющиеся в процессе фоссилизации.

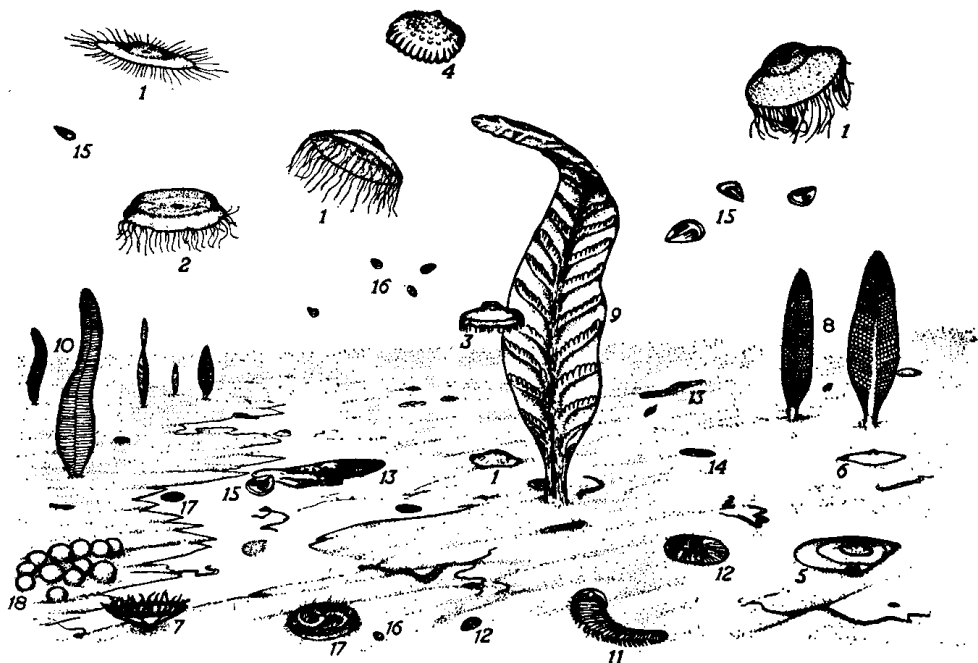
Другая причина, долго заставлявшая проводить резкую грань между формами жизни позднего докембрия и раннего фанерозоя, заключается в том, что до недавнего времени геологи, изучавшие докембрий, интересовались только изверженными и метаморфическими породами. Именно в этих породах содержится основной запас минеральных богатств докембрия, и геологи-разведчики в поисках полезных ископаемых не обращали особого внимания на осадочные породы. Только в последние десятилетия положение изменилось: исследования докембрийской жизни привлекли к себе широкое внимание, и докембрием стали заниматься геологи, работа которых не связана непосредственно с нуждами промышленности. В результате были сделаны интересные находки, обсуждаемые здесь. Конечно, в последующие годы можно ждать новых открытий.

### 4. ФАУНА ПОЗДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

От фауны позднего докембрия сохранились ископаемые остатки радиолярий, кишечнополостных, кольчатых червей и даже ракообразных, что свидетельствует о существовании в то время богатой и разнообразной фауны ([20, 28—30, 85]; фиг. 53). В этот период живой мир был представлен уже не только микроорганизмами и растениями. Жившие в позднем докембрии организмы обладали гораздо более высокой организацией, чем те, которые нас интересуют. Сегментированные животные вроде кольчатых червей и ракообразных так же далеки от истоков жизни, как реактивный самолет от одноколесной тачки.

Таким образом, эти заинтересовавшие широкую публику животные позднего докембрия имеют очень отдаленное отношение к изучению ранней жизни. Они найдены в осадках, отложившихся незадолго до начала фанерозоя; это предки организмов фанерозоя. Их абсолютный возраст не должен сильно превышать 0,6 млрд. лет (нижняя граница кембрия) и вряд ли превышает 1 млрд. лет.

Например, фауна Эдиакары, изображенная здесь в качестве примера фауны позднего докембрия, не поможет определить, как давно возникли животные, иначе говоря, «возраст животных». Проф. Клауд [20] предпочитает называть это время «возрастом самых древних многоклеточных». Разнообразие эдиакарской фауны говорит о довольно длительной предшествовавшей эволюции.



Фиг. 53. Реконструкция фауны Эдиакары (поздний докембрий, Южная Австралия), сделанная М. Глесснером и М. Уэйдом.

Место находки ископаемых показано на фиг. 84. Ископаемые остатки относятся к трем группам — кишечнополостные (Coelenterata), кольчатые черви (Annelida) и членистоногие (Arthropoda). Хотя некоторые формы вымерли еще до начала кембрия, докембрийская фауна отличается от позднейшей в основном лишь одним, отсутствием раковин [32, 36]. Здесь изображены следующие животные (1—10 — Coelenterata; 11—14 — Annelida; 15, 16 — Arthropoda; 17, 18 — другие организмы): 1 — *Ediacara flindersi*; 2 — *Beltanella gilesi*; 3 — *Medusinites asteroides*; 4 — *Mawsonites spriggi*; 5 — *Cyclomedusa davidi*; 6 — *C. plana*; 7 — *Conomedusites lobatus*; 8 — *Rangaea longa*; 9 — *Arborea arborea*; 10 — *Pteridinium simplex*; 11 — *Spriggina flouderi*; 12 — *Dickinsonia costata*; 13 — *D. elongata*; 14 — *D. tenuis*; 15 — *Parvancorina minchami*; 16 — *Praecambridium sigillum*; 17 — *Tribrachidium heraldicum*; 18 — шарообразные студенистые тела.

Но мы не имеем понятия ни о минимальном, ни о максимальном времени, потребовавшемся для того, чтобы эволюция привела к таким формам. Поэтому на фиг. 104 точка ответвления животных от общего ствола эволюционного дерева отмечена знаком вопроса.

## 5. ВОДОРΟΣЛЕВЫЕ ИЗВЕСТНЯКОВЫЕ РИФЫ

То же можно сказать и о рифах из водорослевых известняков, нередко встречающихся в определенных толщах позднего докембрия на любом древнем щите. Правда, подобные рифы обнаружены и в породах раннего и среднего докембрия. Обычно рифообразующие организмы относят к искусственной группе строматолитов (см. гл. XIV, разд. 12). Рифы часто обладают характерной микроструктурой (поскольку известняк отлагался вокруг талломов водорослей). Но они ничего не могут нам рассказать о свойствах или морфологии организмов, их создавших.

Водорослевые известняки могут залегать в виде слоистых пластов, но встречаются и «колонии» значительных размеров. Из «колоний» могут складываться рифы, или, как их называют геологи, *биогермы*. Они постепенно увеличивались в размере за счет углекислого кальция, откладываемого организмами, и выдавались над дном озера или моря, как современные коралловые рифы. Водорослевые рифы, образованные строматолитами, — древнейшие из известных биогерм.

Точнее датировать эти докембрийские рифы мы не можем. Возьмем, к примеру, обычные рифы, образованные *Conophyton*, в районе нагорья Ахагар в Центральной Сахаре [37] (фото 8 и 9). Породы, в которых найдены эти рифы, определено древнее так называемого инфра-, или эокембрия (это самый конец докембрия, оставивший пласты, залегающие согласно с перекрывающими их породами фанерозоя). С другой стороны, эти пласты, называемые по местности, где они найдены, комплексом Фарузий, явно моложе метаморфических докембрийских подстилающих пород этой части Африки. В местной стратиграфии Сахары Фарузий вместе с рифами, образованными *Conophyton*, относят к среднему докембрию. Но, хотя, основываясь на разных формах *Conophyton*, удалось создать местную стратиграфическую шкалу [9], еще не ясно, что здесь следует понимать под «средним докембрием». До сих пор нет методов, позволяющих достоверно определять абсолютный возраст этих пластов, и потому их нельзя сравнить, например, со средним докембрием Миннесоты (см. табл. 18).

Не считая некоторых древних щитов, для которых, по мнению некоторых авторов, возможно подробное подразделение позднего докембрия на основе этих водорослевых известняков как руководящих ископаемых ([31, 73] — для СССР и [33] — для Австралии), до сих пор не разработана общая стратиграфия, основанная на водорослевых известняках. Часто даже невозможно отличить водорослевые известняки позднего докембрия от известняков раннего и среднего докембрия, которые будут описаны в разд. 8 этой главы.

Казалось бы, по водорослевым известнякам легко судить о составе атмосферы в эпоху их образования. Кроме *Conophyton*, пока-

занного на фото 8 и 9, встречаются и другие роды строматолитов, из которых наиболее обычен *Collenia*. Этот род не только образовал биогермы раннего фанерозоя, но и сейчас живет на современных рифах. Раз он способен существовать в современной кислородной атмосфере, можно сделать вывод, что и атмосфера докембрийского периода, когда возникали водорослевые рифы, образованные *Collenia*, уже была кислородной. Но об этом еще можно спорить: как мы увидим в гл. XIV, разд. 12, эти водоросли — не генетическая (связанная внутренним родством), а лишь морфологическая группа. Строматолиты — это плотные массы известняка трубчатого или глобулярного строения, не обладающие микроструктурой, которая позволила бы точнее их классифицировать. Разные виды водорослей, относимые сейчас к очень широко распространенному роду *Collenia*, могли иметь не только разное происхождение, но и совершенно разный метаболизм. Хотя виды строматолитов, встречающиеся в фанерозое, должны были жить в условиях кислородной атмосферы, вполне могли существовать сходные докембрийские организмы, по морфологии относящиеся к той же искусственной таксономической группе, но с метаболизмом, приспособленным к бескислородной среде (см. разд. 8 этой главы).

## 6. МИКРОФЛОРА ПОЗДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

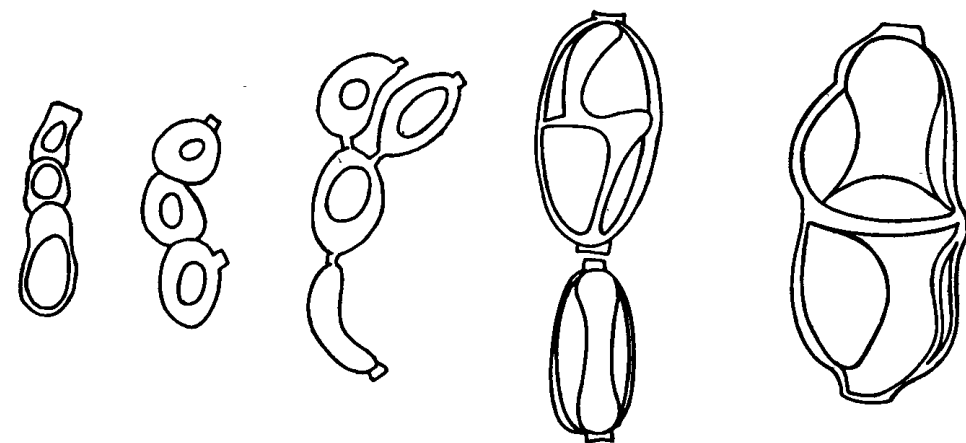
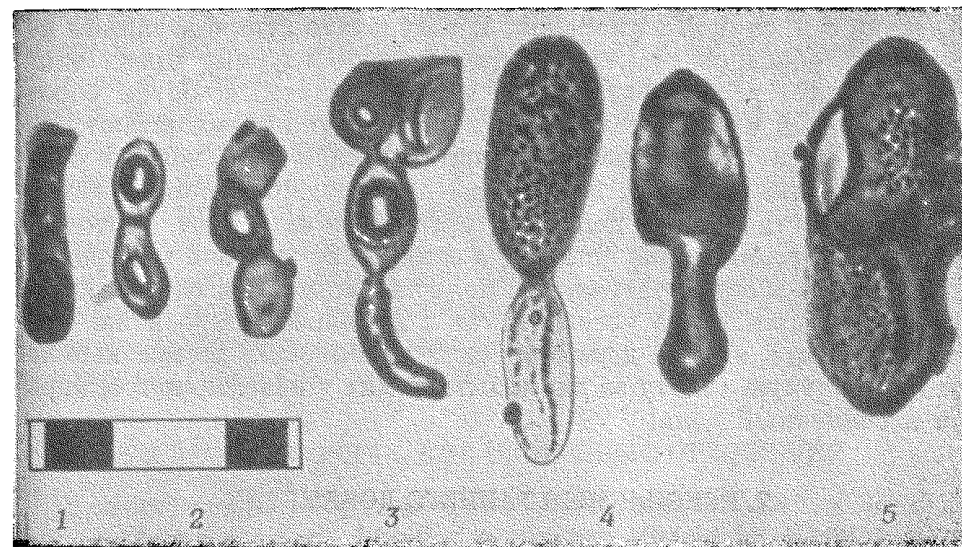
Пример ископаемых остатков из пород позднего докембрия, считавшегося ранее совершенно бесперспективным для поисков таких остатков, — микрофлора, найденная в серии Белт Скалистых гор в Северной Америке [66]. Эта мощная толща обломочных пород содержит большое число силикатных прослоев, например кремния и кремнистых известняков. Возраст ее — около 1,1 млрд. лет. Ископаемая флора представлена очень мелкими организмами, которые можно отнести к водорослям, но дальнейшее уточнение их филогенетических связей невозможно. Поэтому их классифицируют как *Algae incertae sedis*<sup>1</sup>.

Чтобы представить себе, насколько разнообразны эти формы и как хорошо они сохранились, читатель может ознакомиться с прекрасными иллюстрациями из оригинальной работы Пфлюга [66]. Один рисунок из этой статьи воспроизведен здесь (фиг. 54), с тем чтобы показать, как успешно удалось восстановить разные формы жизненного цикла наиболее часто встречающихся видов.

Достойны упоминания замечания Пфлюга о методических трудностях в обнаружении докембрийских ископаемых. Во-первых, эти микроскопические остатки очень хрупки. Все способы «мацера-

<sup>1</sup> Водоросли неясного систематического положения (лат.). — Прим. перев.

ции», применяющиеся обычно для выделения растительных остатков из более молодых пород, в этом случае оказались бесполезными. Для выделения растительных остатков на горные породы воздействуют сильными кислотами. Но ископаемые остатки докембрия не выдерживают такой обработки. Кроме того, крайне малые



Фиг. 54. Различные формы жизненного цикла ископаемого организма *Fibulatrix* из серии Белт, поздний докембрий Северной Америки [66] ( $\times \sim 2300$ ). 1, 2 — клеточные нитчатые формы с газовыми вакуолями; 3 — разветвленные клеточные нити; 4, 5 — цисты.

размеры этих остатков сильно затрудняют их распознавание. На фиг. 54 они показаны при увеличении в  $\sim 2300$  раз. Обычно при работе с микроископаемыми и даже с «наноископаемыми» фанеро-

зоя применяются увеличения до 500 раз. Искать такие докембрийские ископаемые с ручной лупой или даже с биноклем (увеличение примерно в 200 раз) бесполезно.

Пришлось разработать новую методику. Сначала образец «подзреваемой» породы долго полируют и исследуют под микроскопом при большом увеличении и сильном освещении, используя объектив с масляной иммерсией. В результате отшлифованная поверхность образцов становится на какую-то глубину прозрачной, что позволяет рассмотреть следы микроископаемых. Затем образцы, в которых что-то удалось разглядеть, тонко размалывают. Порошок помещают в сильное электростатическое поле, которое отделяет зерна минералов от зерен с высоким содержанием органического вещества или целиком органических. Этот метод не разрушает органические остатки, в отличие от методов мацерации. Собранные в электростатическом поле частицы затем помещают на предметное стекло для исследования с помощью микроскопа.

Как видите, поиски докембрийских ископаемых весьма непохожи на приятную «охоту за окаменелостями» в известняковом карьере в солнечный день!

### 7. ИСКОПАЕМЫЕ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ

Продвигаясь дальше в глубь истории Земли, мы находим лишь очень небольшое число окаменелостей. Первая находка этого рода была сделана в Южной Родезии Мак-Грегором [51] в 1940 году. Это биогенные известняки (см. следующий раздел), до сих пор остающиеся одним из самых древних свидетельств существования жизни на Земле, — их возраст составляет более 2,7 млрд. лет. Затем появилось описание первых настоящих ископаемых остатков — они были найдены на Канадском щите ([80]; см. разд. 12 этой главы). Их возраст известен лишь приблизительно: считается, что им около 2 млрд. лет. Следовательно, они почти на 1 млрд. лет моложе биогенных известняков из Южной Родезии. За этой важной находкой ископаемых совершенно немыслимой ранее древности последовало обнаружение молекулярных ископаемых ([24]; см. разд. 9 этой главы). Эти органические молекулы, по мнению специалистов, имеют биогенную природу. Они также найдены в Канаде, их возраст более 2,7 млрд. лет. Итак, древнейшие макроскопические биогенные отложения — известняки Мак-Грегора — и древнейшие из молекулярных биогенных отложений попадают в одну возрастную группу.

Все эти достижения вызвали усиление поисков еще более древних осадочных пород, в которых могли бы содержаться биогенные отложения. Но области, перспективные для таких поисков, ограничены. Как мы видели в гл. XI, эти породы можно встретить только в тех частях древних щитов, которые уже очень давно не под-

вергались интенсивному складкообразованию или метаморфизму. Ни микроскопические, ни молекулярные ископаемые не имеют шансов сохраниться при таких «переворотах».

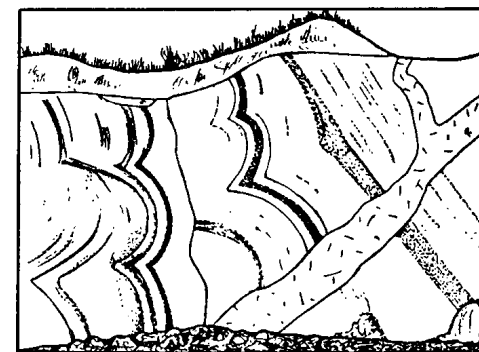
Сейчас известен только один район, каким-то чудом не затронутый сильными геологическими пертурбациями с самого раннего докембрия. Это район, занимаемый системой Свазиленд, охватывающей серии Онвервайт и Фиг-Три (Южная Африка), возраст которых превышает 3 млрд. лет. Породы этой формации, несмотря на свой солидный возраст, подверглись лишь слабому метаморфизму. В них найдены и истинные, и молекулярные ископаемые. Все же, как мы узнаем из разд. 11 и 17 этой главы, нельзя с уверенностью утверждать, что эти так называемые органические молекулы и структуры, определенные как ископаемые остатки, имеют действительно биогенное происхождение.

Сейчас мы рассмотрим ископаемые остатки ранней жизни в следующем порядке: макроскопические биогенные отложения, молекулярные биогенные отложения, или молекулярные ископаемые, и, наконец, собственно ископаемые.

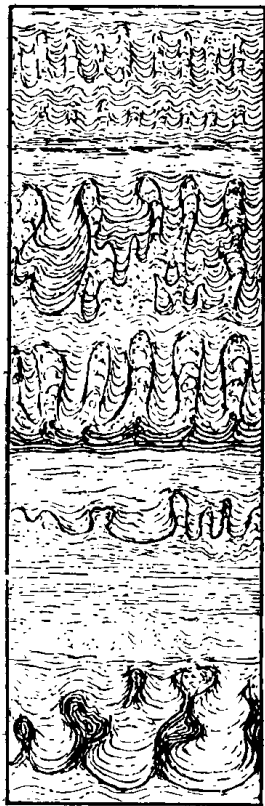
### 8. МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ БИОГЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Древнейшие макроскопические биогенные отложения найдены пока только в Южной Африке, в области Булавайо, Южная Родезия. Система Булавайо составляет значительную часть родезийских докембрийских поясов и состоит из базальтовых и андезитовых лав, сменяющихся вулканическими брекчиями и тонкими прослоями осадочных пород, такими, как полосчатые железорудные формации, граувакки, конгломераты и линзы известняка. Из последних особенно интерес представляет серия Доломит, разрабатываемая в области Булавайо с целью добычи извести.

Серия Доломит состоит из известняка и доломита (известняк, содержащий магний). В некоторых пластах известняка можно видеть странные слоистые структуры. На верхней поверхности этих пластов видны ряды сводов или тонких зубчатых структур. В разрезе видно, что они сложены из тонких слоев, более или менее повто-



Фиг. 55. Борт известнякового карьера вблизи Булавайо, Южная Родезия [51]. Длина около 5 м. Докембрийская серия Доломит с биогенными отложениями, сформировавшимися во время седиментации известняка. Известняк рассекают более молодые гранитные (пегматитовые) дайки. Их определяемый возраст (2650 млн. лет) указывает минимальный возраст биогенных отложений, которые должны быть еще древнее.



Фиг. 56. Последовательность биогенных отложений в параллельных пластах докембрийских известняков серии Доломит, Южная Родезия [86]. Одна сороковая натуральной величины.

ряющих своды или зубцы поверхности. В середине сводов эти слои достигают толщины порядка 3 мм, а к краям сильно сужаются. Но описание мало что дает; лучше всего рассмотреть рисунки и фотографии борта карьера, на которых видно общее расположение пластов, и фотографии травленных шлифов, на которых видны детали строения (фиг. 55 и 56, фото 10—12).

Эти отложения обладают следующими отличительными признаками: сводчатая или зубчатая форма; приуроченность к определенным пластам (они не разбросаны беспорядочно в известняке); тонкослоистая микроструктура. В этой микроструктуре есть определенная регулярность; она, правда, не так хорошо выражена, как правильность остатков скелетов, но известно, что подобным строением обладают и известняки, образованные водорослями в более поздние периоды геологической истории. В то же время эта микроструктура непохожа на структуру неорганических осадочных толщ с ритмичным строением: в этих последних никогда не наблюдается чередования более регулярных слоев с совершенно иначе устроенными «колонками», столь типичными для структуры отложений серии Доломит. Основываясь на всем этом, Мак-Грегор еще в 1940 году [51] сделал верный вывод, что это биогенные отложения, сформировавшиеся во время образования известняковой серии.

Биогенные известняки системы Булавайо очень важны для установления минимальной продолжительности существования жизни на Земле. Поэтому Янг [86, 87] подробно занялся проблемой их происхождения. Ведь в известняках встречаются и необычные структуры неорганического происхождения. Они тоже бывают очень разнообразны по форме: могут быть слоистыми, ленточными, волнистыми, зубчатыми. Одна структура, так называемый «конус в конусе», очень похожа на «зубчатые ленты» серии Доломит. Но по микроструктуре она совершенно несхожа с известняками водорослевого происхождения, и ее никогда нельзя спутать с ними. Таким образом, хотя не каждый аномальный известняк надо обязательно считать биогенным, структуры, созданные организмами, всегда можно отличить от неорганических. В серии Доломит Янг отграничил несомненно био-

генные структуры [86] от тех, которые нельзя с уверенностью отличить от ритмических неорганических структур и которые, таким образом, могут иметь и неорганическое происхождение [87]. Итак, образования, впервые описанные Мак-Грегором, подверглись детальному критическому анализу и только после этого были приняты как доказательство существования жизни на Земле в ту отдаленную эпоху.

Места находок этих древних известняков встречаются в разных обнажениях системы Булавайо, поэтому трудно установить подробную стратиграфию серии Доломит. Во всяком случае, все пласты Булавайо пронизаны дайками более молодых гранитных пород (а именно *пегматитов*, очень грубозернистых гранитов), абсолютный возраст которых составляет 2640—2650 млн. лет [61]. Значит, серия Булавайо должна быть еще древнее, поэтому обычно считают, что возраст серии Доломит и ее известняков составляет «свыше 2,7 млрд. лет». Впрочем, некоторые авторы соотносят систему Булавайо Южной Родезии с южноафриканской системой Свазиленд; тогда возраст наших известняков будет «свыше 3,2 млрд. лет». Пока не все согласны с этой поправкой, и я из осторожности указываю здесь нижний предел — «свыше 2,7 млрд. лет».

Биогенные отложения, описанные Мак-Грегором, и сейчас остаются древнейшими из тех, что нам известны. Но это не единственный пример подобных образований, относящихся к раннему докембрию. Например, на фото 12—15 показаны хорошо развитые структуры этого рода из докембрия Финляндии [40], а в разд. 14 этой главы мы познакомимся с подобными отложениями Канадского щита. Возраст финских находок, как полагают, составляет «более 1780 млн. лет»; они, видимо, относятся к среднему докембрию. Я упоминаю их здесь в основном из-за сходства их структур и с отложениями раннего докембрия из Южной Родезии, и с находками из Сахары (см. разд. 5 этой главы). Сравнив все эти образования, читатель поймет, почему мы, геологи, не колеблясь принимаем биогенное происхождение таких сложенных.

Возникает вопрос, могли ли водоросли откладывать известняк в условиях бескислородной первичной атмосферы? Во всяком случае, отложение известняка вполне совместимо с некоторыми формами современной анаэробной жизни (подробнее об этом см. в гл. XIV, разд. 10), так что этот пункт, по-видимому, не вызывает затруднений.

## 9. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ БИОГЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ: МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Как мы узнали из первого раздела этой главы, молекулярные ископаемые — это химически распознаваемые остатки биологических соединений. Они обычно состоят из химически стойких фраг-

ментов гораздо более крупных молекул, разрушившихся за огромное время, прошедшее с момента их отложения. Обнаруживать в древних осадках молекулярные ископаемые удается благодаря новым, усовершенствованным методам химического анализа, о которых мы уже говорили в гл. VI, разд. 9.

Углеводороды, находимые в новых и не слишком древних осадках, имеют в большинстве случаев биологическое происхождение. Из таких биогенных углеводородов состоят природный газ, нефть, уголь, асфальт и родственные ископаемые. Поэтому обнаружение сложных углеводородов в древних осадочных породах наводит на мысль, что ко времени их образования жизнь уже существовала. А поскольку такие соединения находят и в самых древних из известных сейчас осадков (возрастом более 3,2 млрд. лет), возникает предположение, что жизнь существовала уже в ту раннюю эпоху.

Однако не все здесь так просто и ясно. Во-первых, природный газ и нефть настолько подвижны, что могут просачиваться в породы, не имеющие никакого отношения к их образованию. Добыча этих горючих ископаемых в значительной мере основана на том, что благодаря своей подвижности они мигрируют через проницаемые породы и накапливаются в так называемых породах-коллекторах, откуда их удобно извлекать. Во-вторых, как показали опыты, в условиях бескислородной первичной атмосферы был возможен синтез «органических» соединений неорганическим путем (гл. VI). В-третьих, количества углеводородов в древних осадках раннего докембрия очень малы, и всегда приходится опасаться возможности загрязнения при взятии пробы и при ее дальнейшей обработке.

Первое затруднение обходят весьма просто: те породы, в которых могла в заметных количествах накапливаться нефть, не анализируют. Основное внимание сосредоточивается на тонкозернистых породах: глинистых и кремнистых сланцах. Хотя биогенных соединений в них очень мало, можно с определенной уверенностью сказать, что эти соединения не представляют собой результат позднейшего загрязнения. Сначала анализировались нефтеносные сланцы, но усовершенствование методики позволило анализировать обычные сланцы, а также кремнистые сланцы, в которых соединений углерода очень мало.

Вторую трудность также удается разрешить. Дело в том, что синтез органических соединений, будь он органическим или неорганическим, всегда идет постепенно, ступенчато. Однако при распаде сложная молекула может терять сразу крупные фрагменты, состоящие из целого набора строительных блоков, так как внутри таких фрагментов химические связи прочнее, чем в других местах исходной молекулы. Поэтому удается доказать биогенную природу некоторых соединений углерода, основываясь на их соотношении в пробе. Пример будет приведен в следующем разделе.

Что касается третьего затруднения, то, как показал Хэйр [39], современные средства анализа настолько чувствительны, что единственный отпечаток пальца может полностью исказить результат. Поэтому необходима крайняя осторожность в обращении с пробами. Нельзя, например, заворачивать пробу породы в газету, так как иначе мы получим анализ типографской краски, а не молекулярных остатков ранней жизни.

Из всех разнообразных биогенных соединений, найденных в природе, наиболее интересные результаты (частично рассматриваемые ниже) получены по углеводородам. Но в древних отложениях найдены и другие соединения, например аминокислоты [78]. Показано, что аморфное углистое вещество кероген, встречающееся в осадках, в том числе и в докембрийских, поддается анализу современными химическими методами [1, 2, 14, 41]. Выяснилось, что кероген содержит остатки жирных кислот, причем отношение стабильных изотопов углерода  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в них явно говорит об их биологическом происхождении. Но, как мы узнаем из гл. XIV, разд. 9, этот критерий не считается сейчас достоверным. Мы не можем с уверенностью сказать, что молекулы, которые мы извлекаем сейчас из керогена, действительно были составной частью исходного биогенного вещества; иными словами, мы не уверены, что кероген — в самом деле молекулярное ископаемое. Во всяком случае, дальнейшее изучение этой многообещающей проблемы, конечно, принесет вскоре много интересных результатов.

Поиски молекулярных ископаемых были начаты Дж. Эглинтоном и М. Кальвином совсем недавно — в начале 60-х годов [8, 23, 24, 46]. Находки их подтверждены с тех пор другими исследователями [7, 63]. Полный обзор вопроса можно найти в новой книге Кальвина [17] и в статье Эглинтонна [22] (см. также [54, 81]).

Вначале был изучен сланец из формации Грин-Ривер (Колорадо, США), возраст которого не более 60 млн. лет; на нем были проверены и отработаны методы анализа. Природные углеводороды были затем найдены и в гораздо более древних осадочных породах. И, что еще важнее, сейчас мы умеем не просто обнаруживать в породе углеводороды, но и точно идентифицировать отдельные соединения в многочисленных углеводородных фракциях. Природа некоторых молекулярных ископаемых будет описана в следующем разделе. Метод, испробованный на сланцах из Грин-Ривер, применили и к докембрийским кремнистым и обычным сланцам. Результаты сведены в табл. 14.

Как явствует из данных, приведенных в табл. 14, возраст самых древних пород, в которых до сих пор удалось обнаружить молекулярные ископаемые, составляет более 2,7 млрд. лет. Эти породы принадлежат к тому же возрастному классу, что и докембрийские породы Южной Родезии, в которых Мак-Грегор нашел биогенные отложения (см. предыдущий раздел.). Обе даты указаны

Таблица 14

Основные места находок молекулярных ископаемых<sup>1</sup>

Формация	Район распространения	Возраст, млрд. лет	Источник данных
Грин-Ривер	Колорадо, США	0,06	[24]
Сланцы Антрим	Мичиган, США	0,265	[8, 24]
Сланцы Нансач	То же	1	[24, 7]
Сланцы Макминн	Северная территория, Австралия	1,6	[42, 1]
Кремнистый сланец Ганфлинт	Онтарио, Канада	2	[63]
Витватерланд	Южная Африка	~ 2,5	[70, 69, 76]
Железородная формация Соуден	Миннесота, США	Более 2,7	[8, 46]
Серии Онвервахт и Фиг-Три?	Восточный Трансвааль, Южная Африка	Более 3,2	[42, 62, 48]

<sup>1</sup> В формации Ганфлинт найдена знаменитая микрофлора [80], описанная в разд. 13 этой главы. В железорудной формации Соуден обнаружены углистые микроструктуры, считающиеся (правда без достаточных оснований) биогенными [21]. Углистые микроструктуры из формации Фиг-Три [с. 67, 68, 77] выглядят менее убедительно, и их, пожалуй лучше можно называть «организованными элементами». Но же следует сказать и о структурах, найденных в нижележащей формации Онвервахт [26, 60].

приблизительно (взяты минимальные значения возраста), так как в обоих случаях возраст осадков не определялся непосредственно. Приводимые величины — это возраст более молодых гранитов, которые прорывают эти пласты. Судя по региональной геологии Канадского щита, возраст железорудной формации Соуден не должен сильно превышать 2,7 млрд. лет, поскольку эта формация относится к середине раннего докембрия (табл. 14). Возраст же биогенных отложений Южной Родезии не имеет такого ограничения. Как мы знаем из предыдущего раздела, эти отложения соотносят даже с системой Свазиленд в Трансваале, а тогда они должны быть значительно древнее. Но мы здесь из осторожности указываем минимальный возраст.

Молекулы, сходные с найденными в вышеописанных породах, обнаружены также в сериях Онвервахт и Фиг-Три из системы Свазиленд (возраст более 3,2 млрд. лет). Предварительное сообщение Херинга [42] вскоре было подтверждено Оро и Нунером [62]. Соединения, найденные в системе Свазиленд, значительно отличаются от найденных в формации Соуден и более молодых породах. Поэтому Оро и Нунер [62] оставляют нерешенным вопрос о происхождении углеводов из Фиг-Три и Онвервахт. Они не смогли решить, являются ли эти вещества продуктами биологического синтеза или примитивного неорганического фотосинтеза. О причи-

нах такой осторожности будет сказано в конце следующего раздела, а о важности недавно открытой оптической активности аминокислот из Фиг-Три [48] мы поговорим в гл. XIV, разд. 2.

Впрочем, я думаю, не так уж важно, в какой формации хранятся древнейшие из известных нам молекулярных ископаемых — в формации Соуден, возраст которой более 2,7 млрд. лет, или в сериях Онвервахт и Фиг-Три, которые старше 3,2 млрд. лет. Ведь все три формации так или иначе относятся к самой ранней эпохе истории жизни, к *раннему докембрию*. Можно с полной уверенностью сказать, что дальнейшие исследования в этой быстро развивающейся области скоро принесут нам много нового. Лично я считаю, что мы еще получим доказательства существования жизни в ту эпоху, хотя сейчас надежных свидетельств практически нет. Поэтому из осторожности мы ограничим наше обсуждение молекулярными ископаемыми из формации Соуден и более молодых пород. Как уже сказано в предыдущем разделе, возраст древнейших макроскопических биогенных отложений равен возрасту древнейших молекулярных биогенных отложений — им свыше 2,7 млрд. лет; следовательно, можно считать, что жизнь на Земле существовала уже 2 700 000 000 лет назад.

Важно еще вот что: среди молекулярных ископаемых обнаружены два изопреноидных алкана — фитан и пристан. Их наличие доказывает, что уже тогда существовали молекулы, сходные с хлорофиллом. Значит, 2,7 млрд. лет жизнь не только существовала, но и обладала уже способностью к органическому фотосинтезу. Как мы узнаем из гл. XV, это не означает, что Земля тогда уже имела кислородную атмосферу, но биологическое образование кислорода началось.

Среди молекулярных ископаемых найдены не только изопреноидные алканы, но и другие вещества. О них мы поговорим в следующем разделе. Сложное строение этих углеводов доказывает, что уже 2,7 млрд. лет назад жизнь обладала замечательным разнообразием. А если мы примем, что жизнь могла существовать и во время образования системы Свазиленд, то этот срок увеличится более чем до 3,2 млрд. лет. Поскольку возраст древнейших из известных нам пород составляет 4,5 млрд. лет, можно сделать вывод, что ранняя эволюция жизни — от «органических» веществ «первичного бульона» до ранних организмов — протекала в самом начале истории нашей планеты.

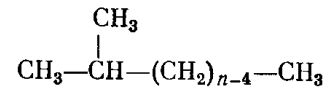
## 10. ХИМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Из молекулярных ископаемых лучше всего изучены предельные углеводороды (алканы), аминокислоты и жирные кислоты. Наиболее интенсивно изучались нормальные, разветвленные и циклические алканы с самым разным числом атомов углерода.

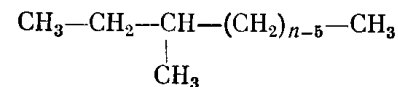
Самыми простыми надо считать алканы с прямой цепью, так называемые *нормальные алканы*. Простейший из них — метан ( $\text{CH}_4$ ), и с него начинается гомологический ряд, каждый следующий член которого имеет на один атом углерода и два атома водорода больше, чем предыдущий. Значит, общая формула для соединений этого ряда —  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ . Но, как мы уже знаем из гл. VI, разд. 9, более сложные молекулы, начиная с бутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) и далее, могут быть построены по-разному, так что возможно несколько вариантов молекулы с одной и той же общей формулой, имеющих одинаковое число атомов углерода и водорода. Все это изомеры. Изомеры алканов не различаются по молекулярной массе и могут быть неразветвленными, разветвленными или циклическими. В группу алканов ходят *изопреноиды* — биологически важные вещества, построенные из одного или нескольких изопреновых звеньев. В литературе принята следующая классификация неразветвленных и разветвленных алканов.

*Нормальные алканы* имеют линейные, неразветвленные молекулы с общей формулой  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{n-2}-\text{CH}_3$ .

*Изоалканы* имеют разветвленные молекулы с разветвлением на конце цепи с общей формулой



*Анте-изоалканы* — соединения с разветвлением у третьего от конца атома углерода в цепи. Их общая формула

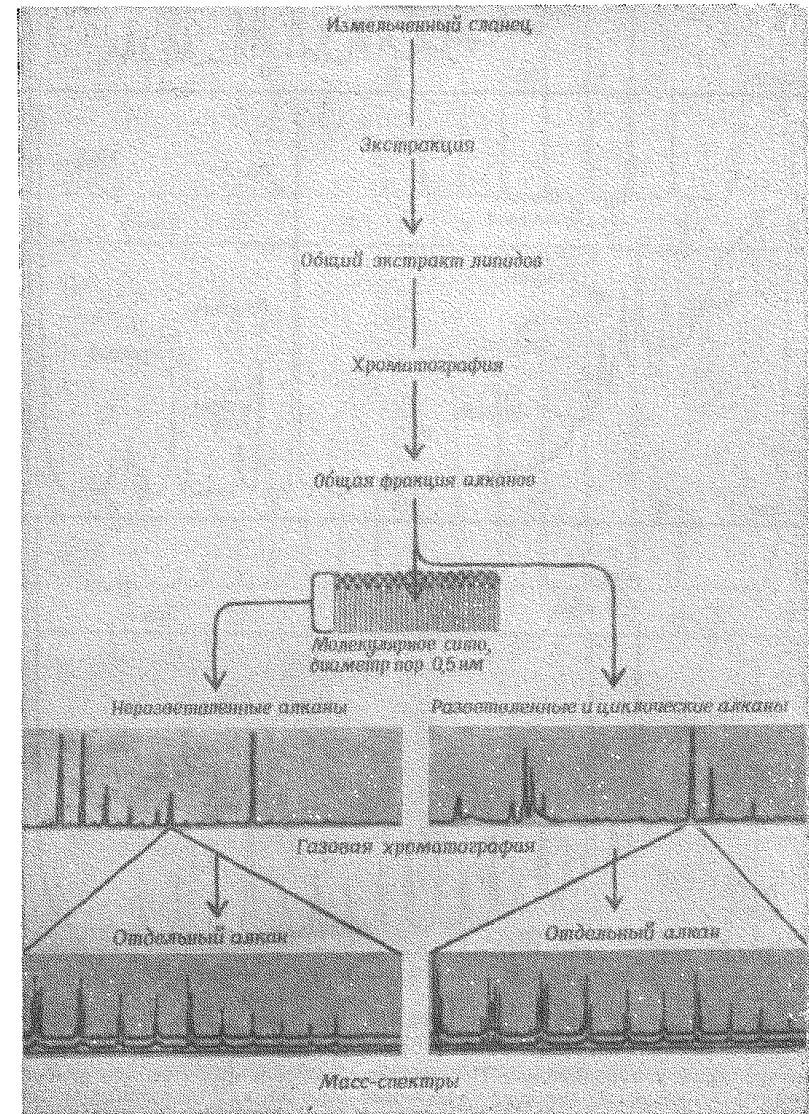


*Изопрен* — это алкан с пятью атомами углерода в цепи, причем один из них — в боковой цепи.

При анализе различных алканов, найденных в древних осадочных породах, необходимо разделить нормальные, разветвленные и циклические алканы. Прежде всего отделяют нормальные алканы, встряхивая исследуемую смесь с гранулированным веществом, служащим в качестве молекулярного сита (диаметр пор 0,5 нм). В результате происходит частичное разделение. Гранулы растворяют затем в плавиковой кислоте и собирают задержавшиеся в порах вещества. Дальнейшее разделение основано на том факте, что природные разветвленные изопреноиды содержат меньшее число атомов углерода, чем циклические молекулы. Соответственно их молекулярная масса ниже. Важнейшие соединения из группы разветвленных изопреноидов имеют около 20 атомов углерода, а циклические — около 30 и более. Газовая хроматография позволяет разделять соединения по их молекулярной массе. Такому разделе-

нию подвергаются и нормальные, и разветвленные, и циклические алканы. Затем их фракции собирают и анализируют с помощью масс-спектрометра, как описано ниже. Иногда часть пробы прямо вводится в масс-спектрометр, как показано на фиг. 57.

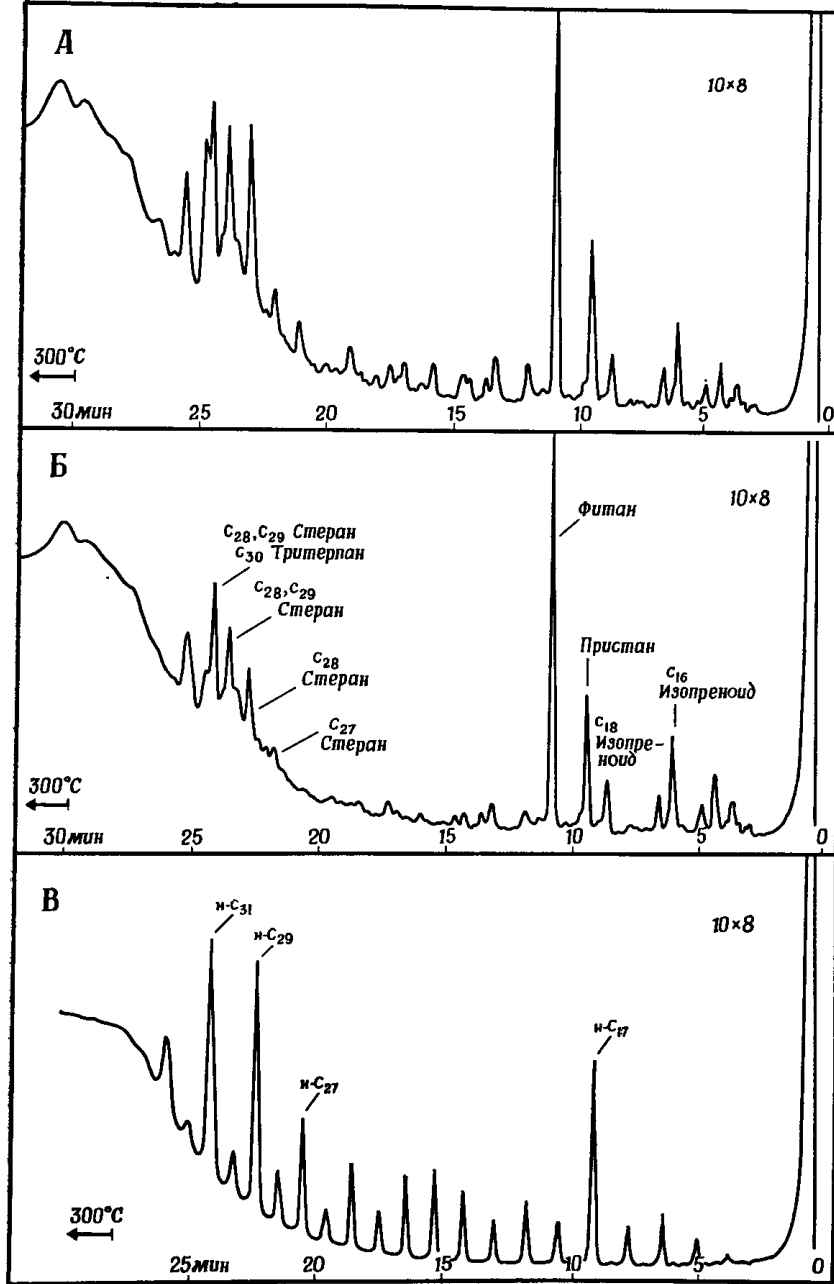
Из битуминозного вещества сравнительно молодых сланцев формации Грин-Ривер, о которых шла речь в предыдущем разделе (им всего 0,06 млрд. лет), был выделен полный спектр прямых,



Фиг. 57. Схема анализа химических ископаемых [23].

Последние две стадии анализа, газовая хроматография и масс-спектрометрия, в современных установках совмещены в одном приборе, записывающем результаты как хроматографического, так и масс-спектрометрического анализа пробы.

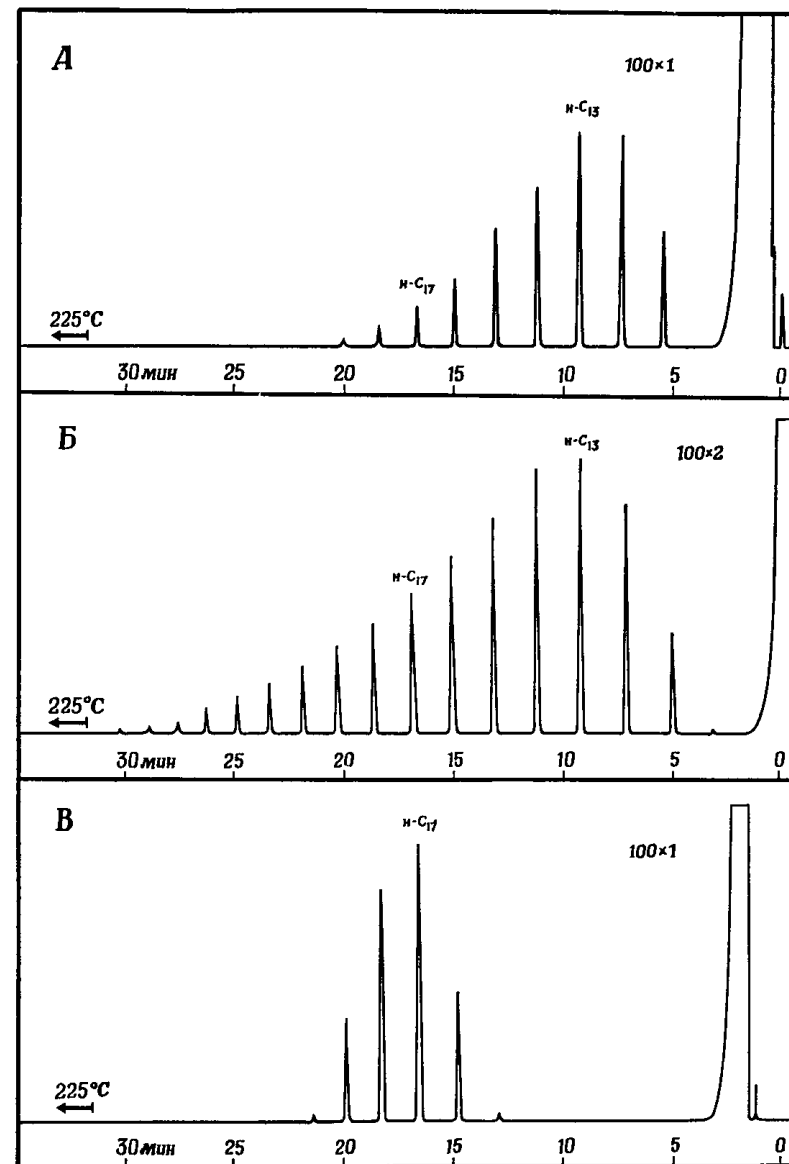




Фиг. 58. Газовая хроматограмма сланца Грин-Ривер, Колорадо ( $60 \cdot 10^6$  лет) [46].

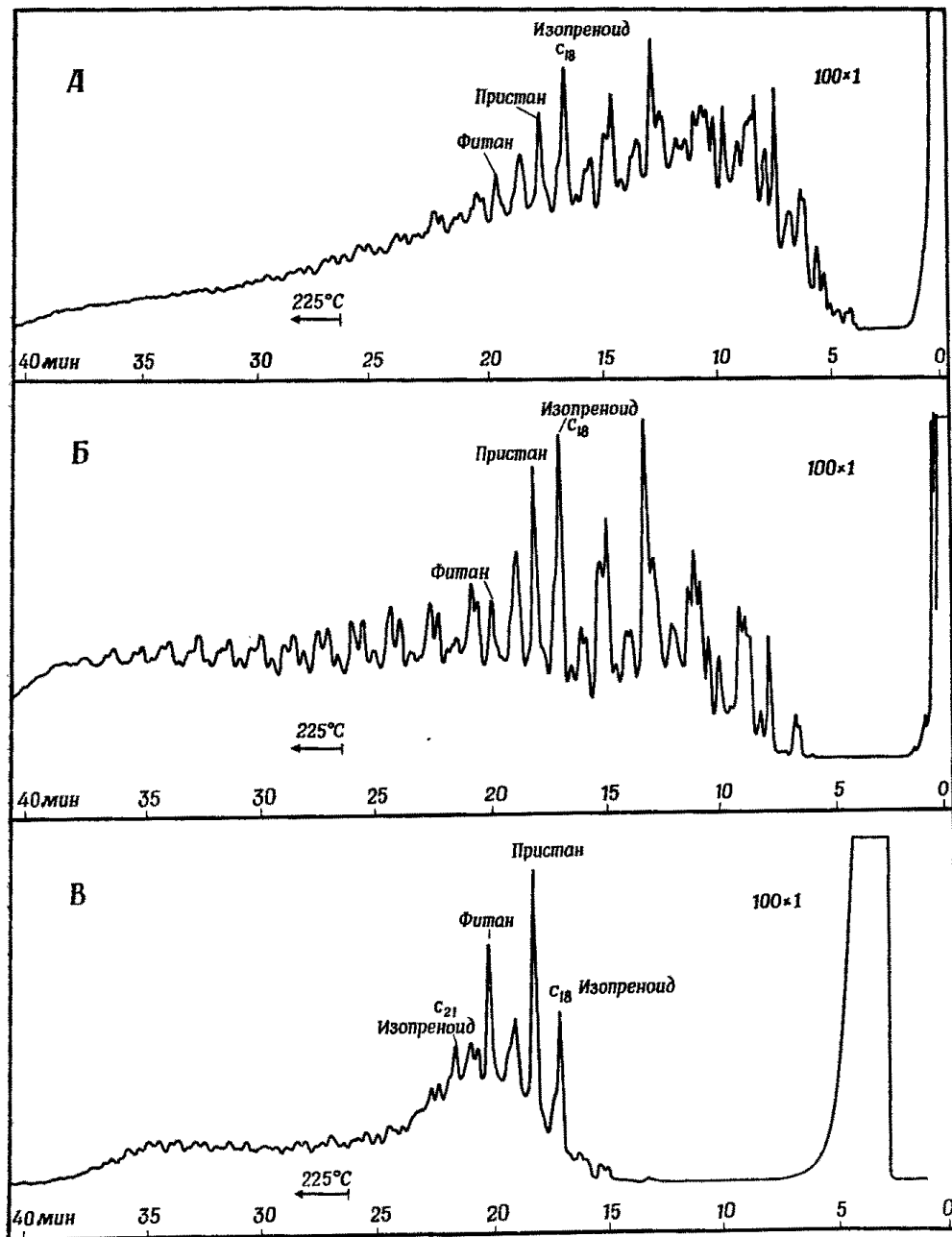
А — общая фракция углеводородов; Б — разветвленные и циклические углеводороды; В — неразветвленные углеводороды. Разделение с помощью молекулярного сита (диаметр пор 0,5 нм). По оси абсцисс отложено время. В процессе анализа алканы с неразветвленной цепью перемещаются медленнее, чем разветвленные и циклические алканы. Поэтому неразветвленный алкан  $C_{17}$  (нижний график) проходит трубку хроматографа за то же время, что и пристан, разветвленный изопреноид  $C_{19}$ . По хроматограмме нельзя судить непосредственно о строении молекул. Его можно выяснить с помощью масс-спектрометрии разделенных хроматографически веществ. Следует отметить, что разветвленный изопреноид  $C_{17}$  в числе продуктов отсутствует. Чувствительность  $10 \times 8$ .

разветвленных и циклических алканов (фиг. 58). В более древних отложениях — в сланцах Нансач и в железорудной формации Соуден меньше молекул с большой молекулярной массой (фиг. 59)



Фиг. 59. Газовые хроматограммы неразветвленных углеводородов из формаций Антрим, возраст  $\sim 265 \cdot 10^6$  лет (А), Нансач, возраст  $1 \cdot 10^9$  лет (Б) и Соуден, возраст  $\sim 2,5 \cdot 10^9$  лет (В) [15].

В сравнении с гораздо более молодым сланцем Грин-Ривер в этих более древних отложениях содержится значительно менее разнообразный набор неразветвленных алканов. Но четкая корреляция с возрастом отсутствует. Порода формации Соуден, между прочим, не простой сланец, а кремнистый сланец. Цифры вверху справа на хроматограммах — чувствительность.



Фиг. 60. Сравнение газовых хроматограмм разветвленных и циклических углеводородов из формаций Антрим (А), Нансач (Б) и Соуден (В) [46].

В этих древних отложениях гораздо беднее, чем в сланце Грин-Ривер, представлены разветвленные и циклические алканы с большой молекулярной массой. Считается, что это результат постседиментационного разрушения этих соединений. Чувствительность  $100 \times 1$ .

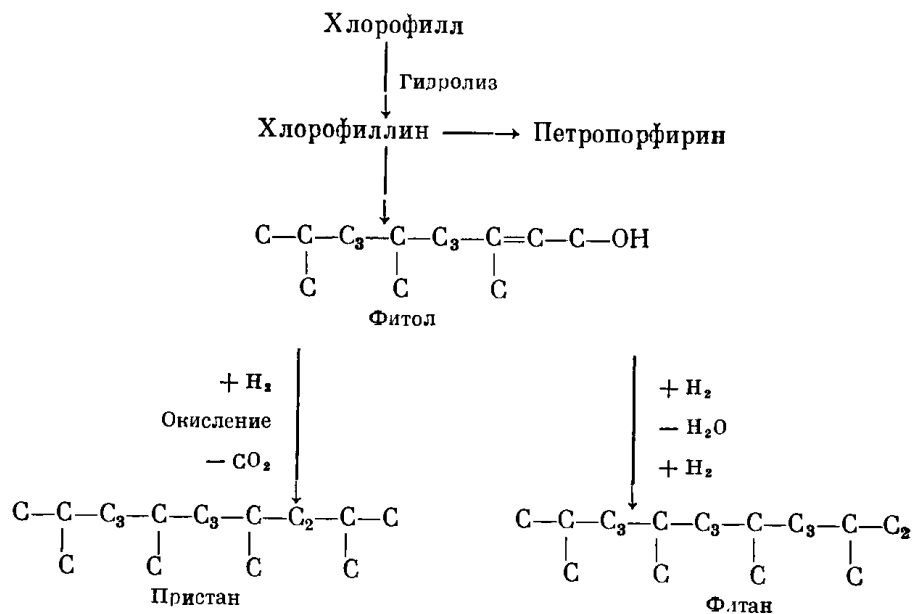
и 60). Это может объясняться двумя причинами: или в то время не было еще таких соединений, или же они были разрушены впоследствии, в процессе диагенеза и (или) метаморфизма этих пород. Второе объяснение кажется более вероятным, поскольку крупных молекул становится заметно меньше уже в сланцах Антрим, которому всего 0,265 млрд. лет, а это соответствует середине фанерозоя, когда жизнь уже была вполне развита.

Далее, надо отметить, что состав сохранившихся алканов мог зависеть и от того, в какой среде шло отложение осадков. Кальвин [15, 17] сообщает, что у современных организмов имеется разный набор алканов в зависимости от того, обитают ли они в море или в пресной воде. Не исключено, что различия в наборе нормальных алканов (для Грин-Ривер характерно наиболее высокое содержание соединений  $C_{17}$ , для сланцев Антрим и Нансач —  $C_{13}$ , для сланцев Соуден — также  $C_{17}$ ; фиг. 58, 59) объясняются точно так же. Жаль, что из-за отсутствия достоверных окаменелостей мы не можем определить, где шло образование докембрийских отложений — в океане или в пресноводных озерах (гл. XIII, разд. 14). Чтобы узнать все это, необходимы еще длительные исследования.

Но вернемся к рассмотрению алканов из древних осадочных пород. Как уже отмечалось, они, вероятно, представляют собой фрагменты молекул хлорофилла или хлорофиллоподобных веществ. Молекула современного хлорофилла имеет в центре атом металла, соединенный координационными связями с атомами азота порфиринового кольца, которое построено из атомов углерода, водорода и азота. К этой центральной группе присоединены различные боковые группы, в том числе длинная *цепь фитила* — остаток разветвленного алкана с 20 атомами углерода. Эта цепь присоединена к центральной части молекулы хлорофилла эфирной связью (фиг. 44). Центральная часть молекулы хлорофилла обладает высокой реакционной способностью, и после смерти организма, содержащего хлорофилл, она разрушается сравнительно быстро. А длинный хвост после окисления и декарбоксилирования превращается в малоактивную молекулу углеводорода — пристана ( $C_{19}$ ) или фитана ( $C_{20}$ ) (фиг. 61 и 62). Эти разветвленные изопrenoиды относятся к ряду алканов и могут долго сохраняться в осадках, если диагенез и метаморфизм пород был не слишком сильным.

Конечно, вполне возможно, что эксперименты типа тех, что описаны в гл. VI, покажут в будущем, что такие алканы легко синтезируются неорганическим путем в условиях первичной атмосферы. В самом деле, они образуются при промышленном синтезе этилена [16, 55]. Правда, этот процесс идет при строго регулируемых условиях, при высокой температуре и высоком давлении во время крекинга, т. е. в условиях, ничем не напоминающих первичную атмосферу. Если такие алканы и в самом деле могли синтезироваться неорганическим путем, то это означает, что их обнаруже-

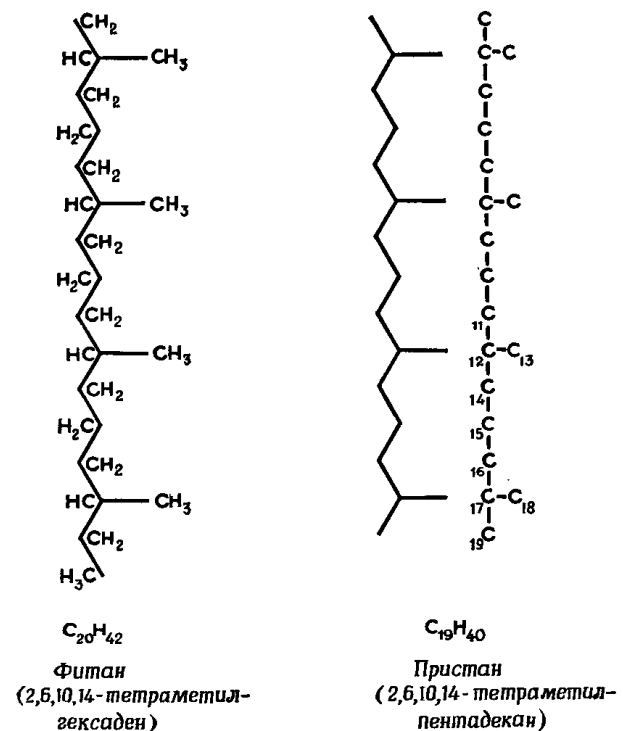
ние в вытяжках битумов из древних и очень древних пород не может служить доказательством биологического происхождения этих битуминозных веществ. Другими словами, это уже не аргумент в пользу существования молекулярных ископаемых.



Фиг. 61. Возможный способ образования пристана и фитана из хлорофилла через фитол [15].

Но есть еще одно доказательство того, что алканы битуминозного вещества древних осадков имеют биологическое происхождение. Это примечательное отсутствие во всех изученных до сих пор пробах изопреноида C<sub>17</sub>. При диагенезе, шедшем после осадкообразования, молекулы фитана и пристана могли «слопаться» в любом месте цепи атомов углерода. Если разрыв происходит до C<sub>18</sub>, то он захватит и C<sub>17</sub>, и при этом останется крупный фрагмент — молекула C<sub>16</sub> (фиг. 62). При распаде молекул фитана (C<sub>20</sub>) и пристана (C<sub>19</sub>) образование фрагмента C<sub>17</sub> маловероятно. В то же время если находимые сейчас вещества представляют собой не продукты распада биогенных соединений, а продукты неорганического синтеза, то молекула C<sub>17</sub> должна встречаться в них не реже, чем C<sub>16</sub> и C<sub>18</sub>: ведь синтез, вероятно, шел путем последовательного присоединения новых звеньев, и вероятность образования молекулы C<sub>17</sub> была такой же, как и изопреноидов C<sub>16</sub> и C<sub>18</sub>. Итак, неважно, образовались ли фитан и пристан при распаде именно хлорофиллоподобных соединений (кстати, есть предположение, что это продукты распада восков [11]). Так или иначе, соотношение изопреноидов с разным числом атомов углерода свидетельствует о

том, что речь должна идти о продуктах распада каких-то биогенных соединений, а не о веществах, синтезированных неорганически.



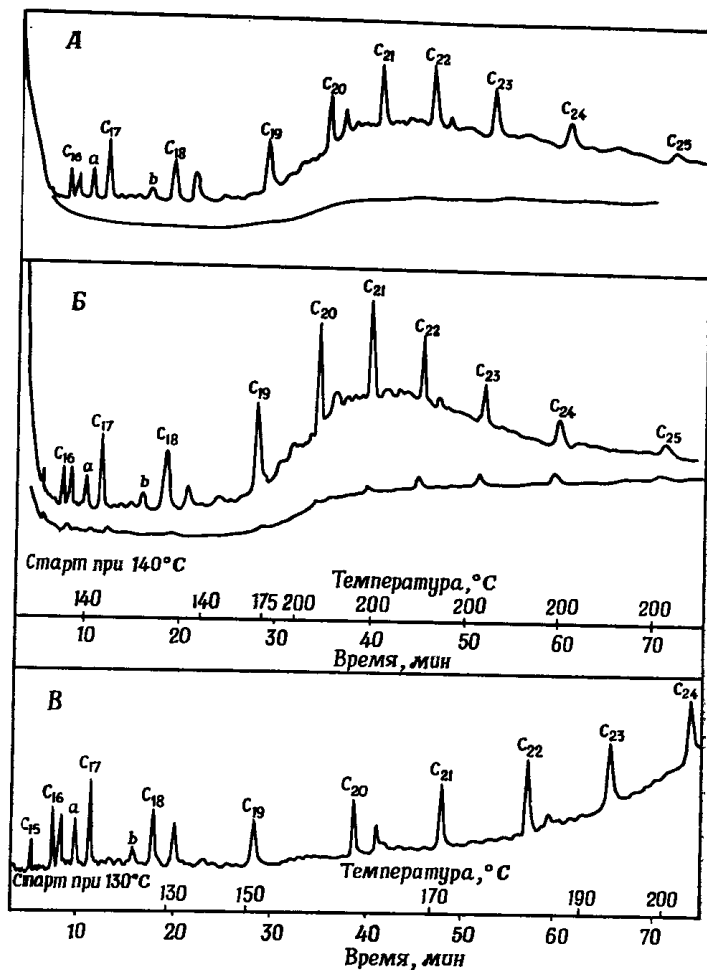
Фиг. 62. Структурные формулы разветвленных изопреноидов фитана и пристана.

Химики употребляют для записи этих формул два способа, как это показано здесь для пристана. Они или рисуют углеродный скелет молекулы, или изображают цепочку атомов углерода. Молекула пристана может разрываться по положениям 19, 18 или 16, но при этом молекулы C<sub>17</sub> никак не могут возникнуть, так как атом C<sub>17</sub> остается связанным с C<sub>17</sub>.

Вернемся теперь к алканам, найденным в формации Фиг-Три (Южная Африка), возраст которой составляет более 3,2 млрд. лет. Мы уже говорили о том, что происхождение этих алканов остается не совсем ясным. Среди них (фиг. 63) присутствуют не только молекулы C<sub>17</sub>, но и сравнительно много других, более высокомолекулярных алканов. Возможно, это продукты разложения не только хлорофилла, но и других, более сложных веществ. Однако не исключено, что это, напротив, продукты неорганического синтеза, сходного с процессом Фишера — Тропша, который используется сейчас в промышленности для производства синтетического бензина и парафинов. Оро и Нуер [62] считают, что вопрос требует

дальнейшего изучения; такого же мнения придерживается Мак-Леод [52]. С этим согласны и многие геологи, в том числе и я.

Но, с другой стороны, если подтвердится сообщение об оптической активности аминокислот из Фиг-Три [48], то для многих специалистов это будет неопровержимым доказательством биогенной

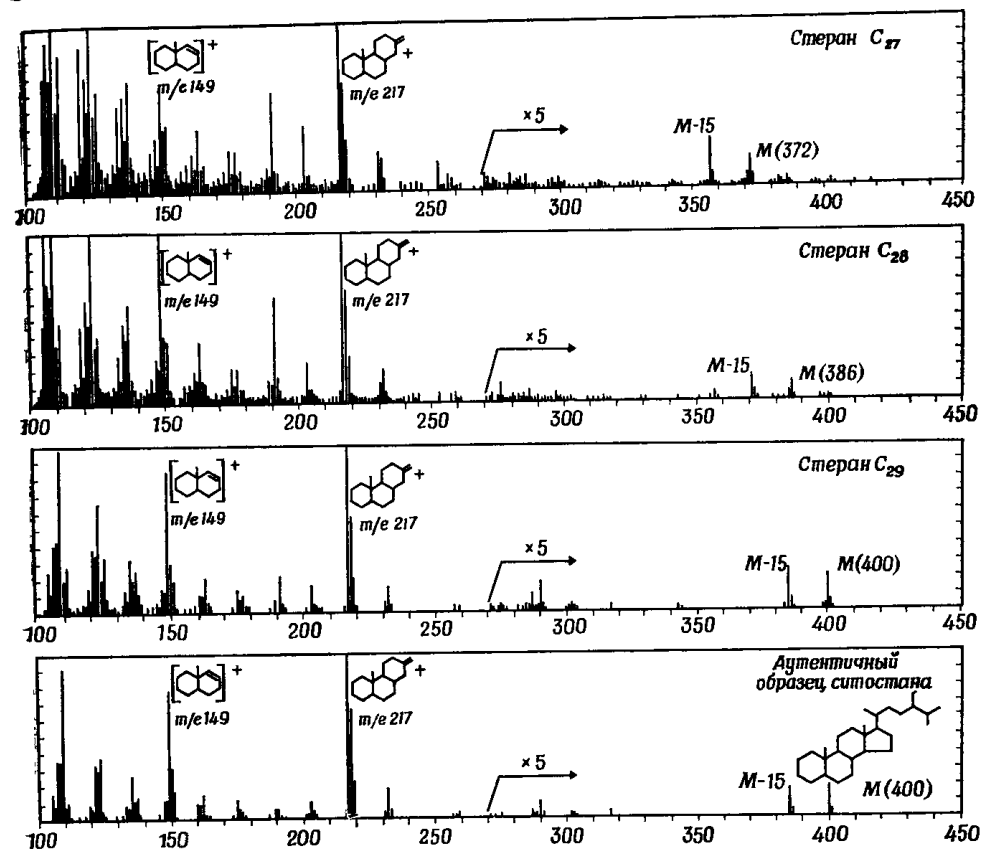


Фиг. 63. Анализ с помощью газовой хроматографии разных типов кремнистых сланцев в формации Фиг-Три, Южная Африка (А, Б, В) [62].

природы данных соединений. Впрочем, и тогда останутся кое-какие сомнения (гл. XIV, разд. 2).

Вернемся теперь к циклическим изопреноидам из древних осадочных пород. Как явствует из графиков, приведенных на фиг. 58, здесь могут встречаться молекулы C<sub>27</sub>—C<sub>30</sub>. Присутствуют разные изомеры этих соединений: вещества с одинаковой молекулярной

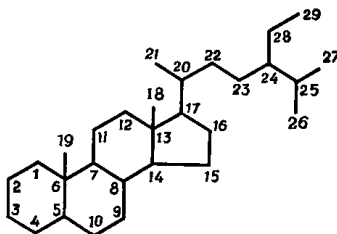
массой проходят через колонку газового хроматографа с разной скоростью. Это объясняется тем, что разные вещества одной молекулярной массы по-разному взаимодействуют с жидкостью, покрывающей стенки трубки хроматографа, и в этом проявляются различия в структуре молекул изомеров.



Фиг. 64. Сравнение масс-спектров стерановых молекулярных ископаемых C<sub>27</sub> (мол. масса 372), C<sub>28</sub> (мол. масса 386) и C<sub>29</sub> (мол. масса 400) с масс-спектром стандарта — ситостана (C<sub>29</sub>), синтезированного в лаборатории [13]. Все четыре соединения сначала теряют группу CH<sub>3</sub> (M-15) (мол. масса 15). Образуются довольно стабильные фрагменты с молекулярными массами 217 и 149. Спектры молекулярных ископаемых C<sub>29</sub> и синтетического ситостана очень сходны, что говорит об их близком родстве.

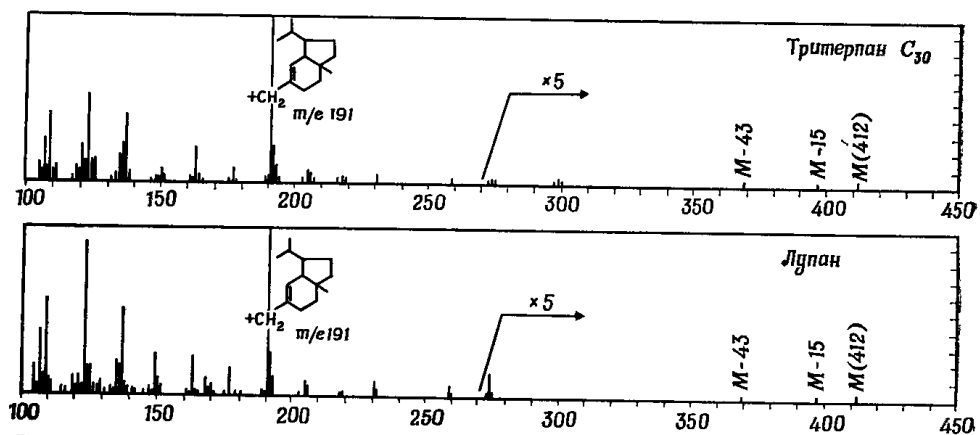
Затем циклические изопреноиды анализируют на масс-спектрометре. Примеры результатов такого анализа показаны на фиг. 64 и 66. Как уже сказано в гл. VI, разд. 9, масс-спектрометр (или масс-спектрограф, смотря по обстоятельствам) используется в таких исследованиях потому, что он позволяет определить, на какие фрагменты распадается большая молекула при ионизации, которой анализируемое соединение подвергается в приборе (гл. III,

разд. 10). Так, циклические изопреноиды с молекулярными массами 372, 386 и 400, предварительно разделенные на газовом хроматографе, дают при ионизации обломок с молекулярной массой



Фиг. 65. Углеродный скелет циклического изопреноида ситостана ( $C_{29}$ ).

15 (на фиг. 64 он обозначен M-15). Это группа  $CH_3$  (атомная масса углерода равна 12, водорода — 1), стоящая на конце цепи. Этот факт наряду с тем, что в этих соединениях не обнаружены атомы кислорода и азота, а также некоторые другие соображения, о которых мы здесь не будем говорить, убеждают нас в том, что все три соединения являются полностью насыщенными углеводородами.



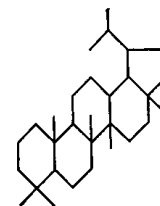
Фиг. 66. Сравнение масс-спектров тритерпанового молекулярного ископаемого  $C_{30}$  (мол. масса 412) с масс-спектром синтетического лупана ( $C_{30}$ ) [13].

Как видим, основной фрагмент этого соединения имеет мол. массу 191, значит, оно отличается по строению от насыщенных стеранов  $C_{27}$ — $C_{29}$ .

Другие сравнительно устойчивые фрагменты обладают молекулярными массами 217 и 149. Дальнейший анализ показал, что они содержат три и два кольца соответственно. Их структурные формулы даны на фиг. 64. Спектры этих соединений удовлетворительно совпадают с масс-спектром соединения  $C_{29}$ , ситостана, синтезированного в лаборатории. Значит, между этими молекулами и ситостаном (фиг. 65) существует близкое сходство. Это заставляет

предполагать, что по крайней мере данная фракция битуминозной вытяжки из сланцев Грин-Ривер представляет собой ситостан.

Изопреноид  $C_{30}$ , выделенный с помощью газовой хроматографии из сланцев Грин-Ривер, сильно отличается по своей структуре от изопреноидов  $C_{27}$ — $C_{29}$ , показанных на фиг. 64. Его масс-спектр приведен на фиг. 66. Здесь мы видим высокий пик, соответствующий фрагменту с молекулярной массой 191. Кроме того, видны пики более легких фрагментов. Это сильно напоминает спектр искусственно синтезированного углеводорода лупана, структурная формула которого дана на фиг. 67.



Фиг. 67. Скелет молекулы циклического изопреноида лупана  $C_{30}$ .

Наконец, жирные кислоты были извлечены из керогена сланцев Макминн (1,6 млрд. лет). Они представлены соединениями  $C_{11}$ — $C_{21}$  [1]. Наличие жирных кислот также свидетельствует о том, что сложные формы жизни существовали уже 1,6 млрд. лет назад, хотя это свидетельство не такое прямое, как в случае алканов. В процессе превращения в кероген исходный биологический материал подвергался сильным изменениям, а при экстрагировании из этих остатков растворимых веществ они также претерпели самые различные превращения. И все же нет сомнений в том, что дальнейшие исследования и здесь дадут много интересного. Жирные кислоты открыты уже в кремнистом сланце из формации Ганфлинт, в железорудной формации Соуден и в серии Онвервахт.

#### 11. КАКИХ ЕЩЕ ОТКРЫТИЙ МОЖНО ОЖИДАТЬ В ЭТОЙ ОБЛАСТИ

В двух предыдущих разделах мы показали, что присутствие некоторых типов молекул в древних и очень древних осадочных породах может служить доказательством существования жизни в тот период, когда происходило их отложение. Для читателей, пропустивших эти два раздела из-за слишком специального характера изложенного в них материала, даю сжатое резюме: жизнь существовала на Земле уже в самый ранний период геологической истории, и молекулярные ископаемые могут дать нам ключ к восста-

новлению некоторых черт метаболизма ранней жизни. Только что мы говорили об обнаружении в древних осадочных породах нескольких соединений, принадлежащих к изопреноидным разветвленным алканам. Возможно, они представляют собой фрагменты молекул хлорофилла или подобных соединений. Значит, не исключено, что в ту раннюю эпоху развития жизни уже существовал органический фотосинтез.

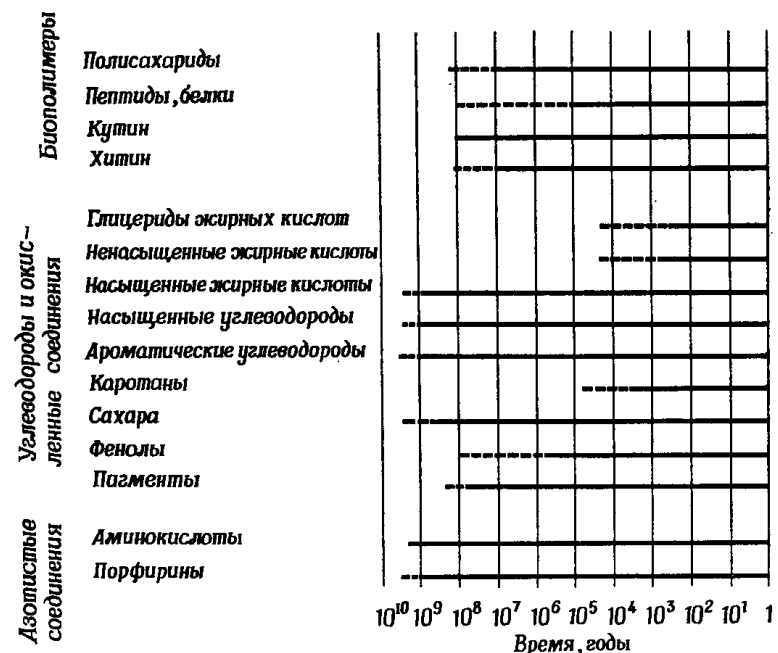
Заметим, что мы пока не можем определить точнее, какой это был фотосинтез — фотолитотрофный или фотоорганотрофный (гл. VIII, разд. 7). Дело в том, что молекулы разных хлорофиллов, присутствующих сейчас в клетках растений и различных фотосинтезирующих бактерий, очень сходны по структуре. Кроме того, хлорофиллы различаются строением центрального ядра молекулы, а оно, как мы видели, разрушается легче, чем парафиновый хвост, и не сохраняется в отложениях.

Существование молекулярных ископаемых открывает широкие перспективы для применения современных методов химического анализа. Даже если исходные крупные молекулы в процессе диagenеза разложились, то при некоторых обстоятельствах удастся по структуре сохранившихся фрагментов понять, от молекулы какого типа происходят эти фрагменты. Когда химики-органики получают достаточно фактов, они смогут, подобно детективу, по нескольким уликам восстанавливать события, или археологу, рисуя мертвый город по нескольким обломкам камней, воссоздать вероятную модель ранней жизни. Среди других соединений будут исследованы, например, пигменты. Из них наиболее многообещающими надо считать *порфирины* [10], к которым относится также хлорофилл и хлорофиллоподобные соединения (петропорфирин упоминается на фиг. 61). Другое важное направление исследований — дальнейший анализ растворимых фракций керогена; пока он выполнен лишь на сланцах Грин-Ривер, которым, как мы знаем, всего 0,06 млрд. лет [12, 14].

Можно ожидать и новых усовершенствований в технике анализа докембрийских осадочных пород. Как пример можно привести конструкцию установки, созданной Мэрфи и сотр. [58]. Они соединили ЭВМ с комбинированным газовым хроматографом — масс-спектрографом, показанным на фиг. 36. Машина автоматически выдает данные каждые четыре секунды. Это позволяет выявить вещества, содержащиеся в вытяжке из породы в самых малых количествах. Все данные накапливаются в памяти ЭВМ, что облегчает дальнейший структурный анализ. Это устройство пока также опробовано только на сланце Грин-Ривер.

На фиг. 68 перечислены органические соединения, найденные к настоящему времени в осадочных породах. Большинство из них обнаружено или в фанерозое (породы возрастом  $6 \cdot 10^6$  лет и моложе) или позднем докембрии ( $1,8 \cdot 10^9$ — $6 \cdot 10^6$  лет). Находки из ран-

него и среднего докембрия составляют пока меньшинство, но активные поиски, продолжающиеся сейчас в этом направлении, скоро принесут нам много нового. В двух предыдущих разделах этой главы мы смогли коснуться лишь немногих из найденных соединений.



Фиг. 68. Органические соединения, найденные в древних осадочных породах [23].

Время отложено по логарифмической шкале. Авторы считают, что все эти соединения были когда-то синтезированы живыми организмами. Это, конечно, упрощенный вывод. На самом деле чем древнее отложения, тем труднее понять, органические или «органические» (в кавычках) вещества содержатся в них. Во всяком случае, эта трудность велика для осадков раннего и среднего докембрия. В древних отложениях могут содержаться как вещества, синтезированные жизнью, так и продукты, созданные в результате неорганического синтеза за счет энергии жесткого ультрафиолетового излучения Солнца в условиях первичной бескислородной атмосферы, т. е. продукты преджизни.

Итак, изучение молекулярных ископаемых дополняет экспериментальный подход к проблеме происхождения жизни, о котором рассказано в гл. VI. С помощью экспериментов удалось выявить множество путей, по которым синтез «органических» молекул может происходить в условиях, имитирующих первичную атмосферу, без участия организмов. В то же время изучение молекулярных ископаемых позволяет понять, какие из этих путей осуществлялись на деле. Такое наступление на проблему происхождения жизни с двух сторон предложил еще в 1937 году голландский микробиолог Клюйвер [47]. Он с умыслом вынес эту идею в заголовке публичной речи, которая получила широкую известность в

Голландии и произвела бы, конечно, большое впечатление и за ее пределами, если бы она была произнесена не на малораспространенном голландском языке. Название этой речи — 's Levens Nevels («Туманы жизни») — палиндром, читаемый по-голландски одинаково как слева направо, так и справа налево. Эта двусторонность должна напоминать, что наше понимание жизни будет основано, с одной стороны, на экспериментах, показывающих, какие вещества могут быть синтезированы, с другой — на палеонтологических изысканиях, раскрывающих действительные события прошлого.

## 12. ДРЕВНЕЙШИЕ ИСТИННЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ

Древнейшие истинные ископаемые остатки, ископаемые остатки в собственном смысле слова, т. е. морфологически распознаваемые остатки древней жизни, известны сейчас из среднего докембрия. Им около 2 млрд. лет. Из гораздо более древних осадочных пород — самых древних отложений, которым не менее 3,2 млрд. лет, — описаны более сомнительные остатки.

Первые ископаемые остатки среднего докембрия были описаны в формации Ганфлинт группы Анимики (Канадский щит; см. табл. 14). О них рассказано в следующем разделе. С тех пор подобные ископаемые были найдены и на других древних щитах. В сериях Онвервахт и Фиг-Три из системы Свазиленд (Южная Африка) обнаружены гипотетические ископаемые, относящиеся к раннему докембрию. О них мы поговорим в разд. 17 этой главы. Как мы уже знаем из разд. 9 и 10, из этих пород удалось извлечь некоторые молекулы, которые, как полагают, по крайней мере для формации Ганфлинт, рассматриваются как молекулярные ископаемые; однако пока неясно, можно ли считать подобные соединения из формаций Онвервахт и Фиг-Три биогенными или это органические вещества, синтезированные неорганическим путем (см. табл. 14).

Все ископаемые, обнаруженные в этих древних осадочных породах, приурочены к *полосчатым железорудным формациям*. В следующей главе мы познакомимся с этими формациями поближе, но уже здесь надо сказать, что они состоят из чередующихся тонких прослоев довольно чистого, очень мелкокристаллического кремнезема и столь же тонких прослоев железной руды. Такие железорудные формации встречаются только в раннем и среднем докембрии, а в позднем докембрии и фанерозое их нет. Очень мелкокристаллическую кремнистую породу называют в Америке *chert*, а в Англии *flint*. Порода из формации Ганфлинт, получившей свое название еще во времена колонизации Америки англичанами, очевидно, особенно подходила для изготовления кремней к старин-

ным ружьям<sup>1</sup>. Истинные и проблематичные ископаемые остатки содержатся в кремнистых прослоях, которые часто бывают окрашены соединениями железа.

Кремнийсодержащие отложения образуются сейчас главным образом в океанах. Они накапливаются в виде диатомовых или радиоляриевых илов на дне глубоких океанов или — в редких случаях — во внутренних водоемах. Как мы узнаем позже (гл. XIV, разд. 3), эти более новые кремнистые породы не встречаются в эпоху образования полосчатых железорудных формаций, т. е. в раннем и среднем докембрии. Этот факт наряду с другими заставляет считать, что последние отлагались в условиях первичной бескислородной атмосферы. Но окремнение, хотя и не в таких масштабах, происходило также на континентах, в болотах. Гуминовые кислоты, образующиеся при гниении болотной растительности, растворяют известковые и фосфатные органические остатки, такие, как скелеты и раковины животных, тогда как целлюлоза и другие растительные вещества остаются сравнительно мало измененными и могут в дальнейшем fossilizироваться путем последовательного замещения органических молекул кремнеземом. У наружных стенок клеток может остаться небольшое количество исходного органического вещества. Гораздо реже органическое вещество сохраняется у внутриклеточных мембран. Иногда эти структуры, полностью, до мельчайших подробностей сохраняющие морфологию и строение древних организмов (см. фото 16—20; приведены в конце книги), бывают окрашены соединениями железа. Силицификация сохранила для нас самые полные остатки растений. Например, в нескольких местах найдены даже целые *окаменелые леса*, относящиеся к разным геологическим формациям. Нередко они выглядят настолько впечатляюще, что берутся под охрану государства.

Итак, мы должны понимать различие между процессом образования кремнистых осадочных пород (такие породы раннего и среднего докембрия явственно отличаются от пород, свойственных позднему докембрию и фанерозою) и процессом силицификации, примеры которого известны из более близких к нам эпох. Процесс силицификации связан с избытком кремнезема. Нам не обязательно знать, как возникал такой избыток, но важно запомнить, что окремнение — наилучший способ fossilизации.

## 13. ПРИМИТИВНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ СРЕДНЕГО ДОКЕМБРИЯ (ВОЗРАСТ ОКОЛО 2 МЛРД. ЛЕТ)

Как сказано в предыдущем разделе, первые древнейшие настоящие ископаемые были найдены в формации Ганфлинт Канадского щита, в юго-западной части провинции Онтарио. За предваритель-

<sup>1</sup> Gunflint — ружейный кремль (англ.). — *Прим. перев.*

ным сообщением об открытии этих ископаемых в 1954 году [80] последовало подробное их описание [6]. Сходные, но не столь убедительные остатки описаны для других древних щитов, из раннего и среднего докембрия [49]. Но по богатству форм Ганфлинт не имеет себе равных среди других формаций (фото 16—18).

Баргхоорн и Тайлер провели детальное сравнение ископаемых остатков из формации Ганфлинт с другими, более молодыми ископаемыми остатками и даже с ныне живущими организмами. В некоторых случаях они отождествляют окаменелости из сланцев Ганфлинт с более молодыми организмами, основываясь лишь на морфологических признаках. Это, конечно, до некоторой степени допустимо, так как палеоботаническая систематика основана только на морфологии, а не на филогенетических связях. Но такие определения могут ввести в заблуждение биолога, привыкшего, что за латинскими названиями скрываются группы родственных, а не просто морфологически сходных организмов. Подробнее об этом будет сказано в гл. XIV, разд. 12, но уже здесь я хочу предупредить, что лучше избегать такого отождествления.

Из работы Баргхоорна и Тайлера [6] можно сделать два важных вывода. Во-первых, мы действительно имеем дело с настоящими ископаемыми остатками, т. е. с фоссилизированными остатками живших некогда в воде или на дне организмов, попавших после смерти в толщу отложений. Разнообразие строения этих остатков — здесь встречаются нитчатые и округлые формы, формы с внутренними перегородками и без них, странные, причудливые формы вроде *Kakabekia* — говорит о сложной и многообразной морфологии, свойственной лишь живому. Во-вторых, организмы из формации Ганфлинт, сохраняя явные черты примитивности, уже проявляют разнообразие строения и морфологии. Конечно, развитие этого разнообразия потребовало какого-то времени. Это древнейшие из известных нам ископаемых организмов, но они уже очень далеки от форм ранней жизни, которым, по-видимому, было свойственно внешнее однообразие.

Интерпретация структур, найденных в кремнистых сланцах формации Ганфлинт, как истинных ископаемых остатков, т. е. морфологически сохранных остатков древней жизни, подтверждается еще и тем, что некоторые из обнаруженных клеток могут рассматриваться как органы размножения. Предполагается [50], что некоторые клетки, выделяющиеся размером и окраской, являются репродуктивными элементами организма, состоящего в целом из более мелких клеток. Эта интерпретация основана на сравнении с современными сине-зелеными водорослями (фото 21 и 22). Если это предположение верно, значит, по крайней мере некоторые структуры из формации Ганфлинт обладали способностью к размножению и, следовательно, должны считаться остатками живого.

Остатки, найденные Лабержем [49] в кремнистых сланцах по-

досчатых железорудных формаций других древних щитов и других возрастов, гораздо менее сложны и разнообразны. За исключением *Eosphaera tyleri* (фото 20) — формы, идентифицированной с достоверностью совсем в других районах Канадского щита, относящихся к среднему докембрию, и потому не особенно важной в данном случае, все «сфероидные структуры», описываемые Лабержем, не обладают дифференцированным внутренним строением. Нет у них и причудливой внешней формы, как это отмечается, например, у *Kakabekia* (фото 19). Нельзя утверждать с уверенностью, что эти образования имеют биогенную природу: вспомним микросферы, синтезированные Фоксом, — они всего на один порядок величины мельче «сфероидных структур» Лабержа (гл. VI, разд. 6).

В связи с этим я хочу еще раз напомнить: при решении вопроса о том, следует ли считать те или иные структуры настоящими ископаемыми, необходима сугубая осторожность. Дело в том, что преджизнь и ранняя жизнь могли в раннем и среднем докембрии существовать бок о бок (гл. XVI, разд. 2). Если это так, то простейшие структуры, которые могли создаваться и преджизнью, и ранней жизнью, могут встречаться в породах одного возраста и даже в пластах одной и той же формации. Поскольку преджизнь и ранняя жизнь существовали в разных условиях среды, сомнительно, что их остатки можно найти в одной и той же породе, хотя даже и такой *танатоценоз* нельзя считать полностью невозможным. Однако, поскольку при образовании слоистых формаций условия среды ритмично менялись, в последовательных слоях полосчатой железорудной формации одни формы могут чередоваться с другими. Подробнее об этом см. в разд. 18 этой главы, а сейчас еще раз напомним, что к отграничению структур, возможно образованных преджизнью или ранней жизнью, от образований, которые по сложности своего строения и причудливости наружных форм могут быть приписаны только настоящей жизни, следует подходить с большой осторожностью. Пока мы не располагаем более вескими доказательствами, лучше, как это делают при изучении углистых метеоритов (гл. XVII), называть первую группу ископаемых структур «организованными элементами».

#### 14. ДРУГИЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ СРЕДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

Как в формации Ганфлинт, так и в других формациях среднего докембрия описаны также макроскопические биогенные отложения в форме строматолитовых «водорослевых рифов» [57]. Этого можно было ожидать, так как организмы, создававшие известняковые отложения, жили, начиная с раннего докембрия (о водорослевых известняках из Южной Родезии, найденных Мак-Греггором, см. в разд. 8 этой главы), весь докембрий и фанерозой, вплоть до



нашего времени. В богатой кремнеземом формации Ганфлинт известняковые и доломитовые биогенные отложения часто подвергались силицификации. Впрочем, описан известняковый риф длиной 30 м и мощностью 6 м, найденный в Порт-Артуре (Канада, провинция Онтарио), который избежал силицификации, очевидно, благодаря своим размерам [57].

Те же авторы сообщают об обнаружении остатков животных в формации Анимики. Они нашли на тонких шлифах структуры, похожие на спикулы губок, а на ацетатных репликах шлифованных поверхностей породы обнаружено нечто напоминающее срезы целых губок. Я считаю, впрочем, что препараты, на анализе которых основано это утверждение, выглядят весьма неубедительно. Вполне возможно, что это органические остатки, но не исключено, что это и что-нибудь иное. Они не обладают строением, доказывающим их биогенное происхождение. Кроме того, из следующей главы мы узнаем, что полосчатые железорудные формации, к которым относится и формация Анимики, образовывались в условиях первичной бескислородной атмосферы. Содержание кислорода составляло тогда не более 1% его содержания в современной атмосфере, а этого недостаточно для животных (табл. 14). Итак, поскольку нет надежных палеонтологических доказательств существования остатков животных в формации Анимики, на основании геологических данных, рассмотренных в следующей главе, приходится заключить, что в формации Анимики и вообще в среднем докембрии животной жизни почти наверняка не было.

#### 15. ВОЗРАСТ ИСКОПАЕМЫХ ОСТАТКОВ СРЕДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

Определить возраст ископаемых остатков среднего докембрия нелегко. Ведь все они, естественно, содержатся в осадочных породах, а, как мы знаем из гл. III, определение абсолютного возраста проводится обычно на изверженных породах, в которых кристаллизация минерала из расплавленной магмы дает точку отсчета, «год рождения» данной породы. К осадочным породам в целом, как мы видели, подобные методы неприменимы; абсолютный возраст удается определить лишь на отдельных минералах, образовавшихся во время отложения данной породы, так называемых *аутигенных минералов*. Получаемые результаты обычно менее достоверны, чем в случае изверженных пород. Давайте посмотрим, как определялся возраст формации Ганфлинт. Этот пример познакомит нас с трудностями датирования докембрийских отложений.

В 1954 году, когда в формации Ганфлинт только что была обнаружена флора, возраст формации давался лишь в широких пределах. По чисто геологическим соображениям ее соотнесли с железорудной формацией Негони, развитой на севере штата Мичиган, на другом берегу озера Верхнего. На кристаллах магнетита из по-

следней формации были выполнены определения возраста урангелиевым методом. В результате были получены величины от 800 млн. до 1650 млн. лет, в среднем около 1300 млн. лет. Этот метод неизбежно дает неверные результаты, причем ошибка всегда делается в сторону уменьшения, так как дочерний элемент гелий легко мигрирует из породы. Поэтому, недолго думая, возраст отложений приняли равным 2 млрд. лет. И хотя это не такая уж незначительная (почти на 50%!), да и довольно спорная поправка, эта цифра стала общепринятой. Зато как хорошо она звучит в заголовках типа «Древнейшие ископаемые мира — 2 млрд. лет!» Благодаря счастливой случайности эта цифра впоследствии подтвердилась, но нам важно подчеркнуть, насколько шаткими были основания для такой оценки в 1954—1961 годах.

Затем детальные исследования [34] возраста пород докембрия Миннесоты, проведенные Голдичем и сотр. [35] (см. также [34]), подвели более прочную базу под датировку формации Ганфлинт. Эта формация и группа Анимики, к которой она принадлежит, пересекает границу между провинцией Онтарио и Миннесотой. Оказалось, что вся группа Анимики древнее эпохи пинокинской складчатости. Последняя достоверно датирована по изверженным породам, ее возраст 1,7 млрд. лет. Это и есть нижний предел для возраста группы Анимики и формации Ганфлинт. Возраст предыдущего, альгомского горообразования не более 2,5 млрд. лет. Его породы несогласно перекрыты отложениями Ганфлинт. Итак, возраст флоры формации Ганфлинт должен составлять более 1,7 млрд. и менее 2,5 млрд. лет [65].

Еще одно подтверждение принесла работа Харлея и сотр. [45]. Они определили возраст глинистых минералов из прослая тонкого вулканического пепла, включенного в кремнистые сланцы. Предполагается, что эти минералы образовались во время извержения и, следовательно, могут считаться аутигенными. Калий-аргоновый метод дает возраст около 1,6 млрд. лет; это скорее заниженная величина. Авторы предварительно проверили метод на сходных глинистых минералах из пород, возраст которых достоверно определен другими методами. Оказалось, что обычно из таких минералов уходит около 20% радиогенного аргона. С этой эмпирической поправкой возраст формации Ганфлинт был определен в  $1900 \pm \pm 200$  млн. лет.

Но недавно Фор и Ковач [27] пришли к выводу, что этой формации всего  $1635 \pm 24$  млн. лет. Они применяли рубидий-стронциевый метод определения абсолютного возраста (гл. III, разд. 9) по монолиту, с построением изохрон, подобно тому как это делали Холмс и Хоутерманс при анализе изотопного состава свинца (гл. III, разд. 16). По общему мнению, их метод является косвенным. К тому же определенный с его помощью абсолютный возраст формации Ганфлинт оказался меньше возраста пинокинского го-

рообразования, которое, как мы видели, должно быть моложе. Поскольку датировка главных горообразований гораздо более достоверна, чем датировка осадочных пород, мнение Фора и Ковача, пока оно не подтверждено другими исследователями, следует признать ошибочным — формация Ганфлинт должна быть древнее.

Итак, общепринятая датировка флоры Ганфлинт (2 млрд. лет) представляет собой более или менее обоснованную оценку.

Наконец, надо отметить, что для нашей проблемы не так уж важен абсолютный возраст этой флоры. Такое утверждение может показаться несколько неожиданным после долгого обсуждения попыток установить ее абсолютный возраст. Однако нас больше интересует относительный возраст. Судя по ее положению в стратиграфической колонке (табл. 18), она относится к среднему докембрию. Флора формации Ганфлинт — современница одной из полосчатых железорудных формаций типа формации Верхнего озера, и она присутствует в одной из таких формаций. Это в свою очередь свидетельствует о существовании в то время бескислородной атмосферы (см. следующую главу). Таким образом, независимо от абсолютного возраста относительный возраст формации Ганфлинт говорит о том, что флора Ганфлинт состояла из растительных форм ранней жизни, процветавшей в условиях первичной бескислородной атмосферы. Мне кажется, именно с этой точки зрения флора Ганфлинт особенно интересна.

#### 16. МЕТАБОЛИЗМ ОРГАНИЗМОВ СРЕДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

В следующих главах будет подробнее рассказано о том, что нахождение ископаемых остатков среднего докембрия в слоях кремнистого сланца полосчатых железорудных формаций свидетельствует о наличии в то время первичной бескислородной атмосферы. Вероятно, содержание кислорода не превышало тогда 1% его содержания в современной атмосфере. Однако эти организмы были аэробами, они жили в болотах или озерах под более или менее толстым слоем воды, но все же на поверхности Земли, в контакте с газами атмосферы. Тем не менее из-за низкого содержания кислорода в атмосфере их метаболизм должен был напоминать метаболизм теперешних анаэробов.

Это, конечно, не значит, что современные виды анаэробных организмов жили уже в среднем докембрии. Просто у тех и у других есть сходство в жизненных функциях. Вероятно, уже тогда выделились те же группы по типу питания, которые известны и в настоящее время (гл. VIII, разд. 7), уже существовали хемотрофы и фототрофы. Но, как уже указано, тогда жили и организмы с типом питания, невозможным сейчас: ведь в раннем и среднем докембрии преджизнь сосуществовала с ранней жизнью (гл. XVI) и первые организмы могли использовать в пищу готовые «органи-

ческие» молекулы. Видимо, в этом «водяном Эдеме» (гл. IV, разд. 7) фото«органотрофные» организмы занимали важное место (фиг. 106).

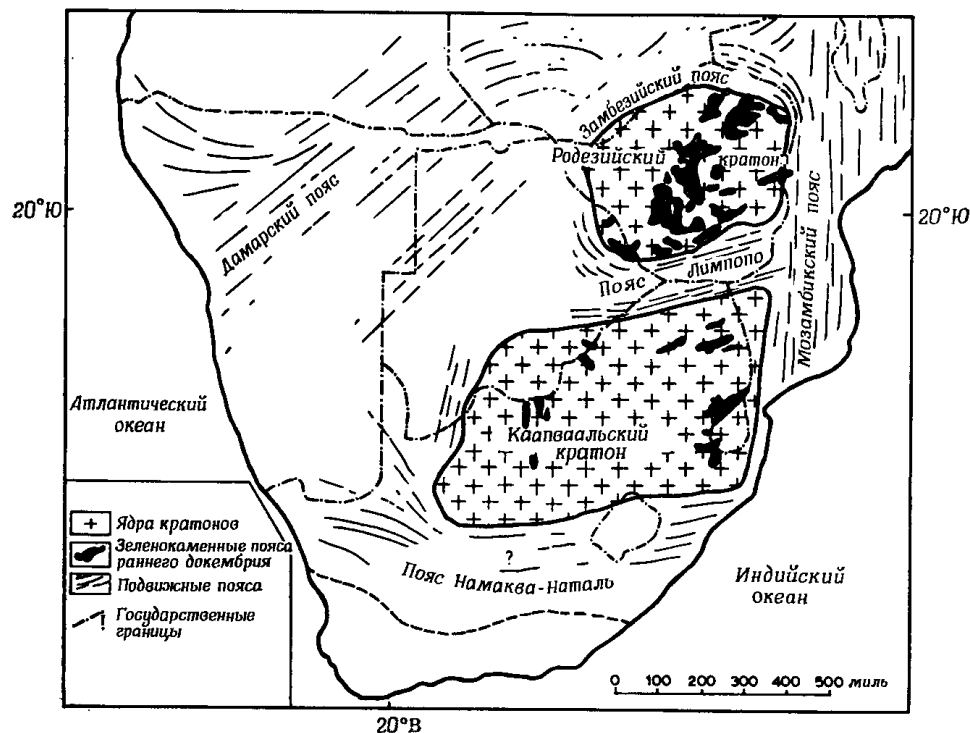
Впрочем, это уже детали. В целом организмы из формации Ганфлинт были, очевидно, аэробными и в то же время «бескислородными». Они не были анаэробами, так как жили в контакте с атмосферой, но их метаболизм был сходен с метаболизмом современных нам организмов, которых мы называем анаэробами.

#### 17. ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ?

После обнаружения флоры формации Ганфлинт начались активные поиски еще более древних ископаемых остатков. Чем глубже мы уходим в даль времен, тем такой поиск становится труднее. Как указано в предыдущей главе, предпринимать такие поиски можно лишь в тех районах древних щитов, где серии осадочных пород со времени своего образования не претерпели сильных подвижек, таких, как захоронение в геосинклиналях или тектоническое дробление в поясах складчатости. Пласт осадочных пород останется сравнительно тонким и избежит значительного метаморфизма лишь в тех местах, где опускание и седиментация были не слишком сильными. Поэтому нам надо искать области, бывшие во время отложения осадков уже относительно стабильными. Геологи называют их *форландами* или *эпиконтинентальными осадочными бассейнами*. Более того, нужно, чтобы такая область не была заметно затронута позднейшими горообразованиями, иначе древние осадки подвергаются метаморфизму и содержащиеся в них окаменелости разрушаются. Такие «неповрежденные» районы называются *кратонными*.

Как мы узнали из предыдущей главы, на обширном Африканском щите есть несколько таких сравнительно устойчивых областей. Древнейшая из них, насколько мы знаем, — Трансваальский или Каапваальский, кратон, к которому относится система Свазиленд. Эта система делится на две серии: древняя, Онвервахт, и более молодая, Фиг-Три [61]. Первая в основном представлена мощной толщей вулканических пород — ультраосновных, основных и средних лав, на которых залегают риолитовые туфы. Однако в вулканическую серию включены прослойки тонкозернистых осадочных пород, главным образом кремнистых сланцев [84]. Формация Фиг-Три состоит главным образом из осадочных пород, хотя вблизи ее подошвы и кровли обнаружены в большом количестве изверженные породы. Для нижней части формации Фиг-Три характерны полосчатые кремнистые сланцы, железняки, тонкослоистые сланцы, а верхние пласты состоят из более грубозернистых осадков. Именно в тонких осадках, в сланцах и кремнистых сланцах, найдены остатки, которые считают окаменелостями ([5, 67, 68, 77] —

для Фиг-Три, [26, 60, 59] — для Онвервахт). Поскольку это наиболее изученный из всех районов, в которых найдены ископаемые остатки, относимые к раннему докембрию, я приведу здесь его описание (фиг. 69).



Фиг. 69. Южноафриканский кристаллический щит, обнаженный от более молодых пород, образует гранитно-зеленокаменные кратоны, не подвергавшиеся подвижкам со времени своего образования, и окружающие их более молодые, подвижные пояса метаморфизма.

Каапваальский кратон, называемый некоторыми авторами Трансваальским, включает в себя пояса зеленокаменной породы и других сходных отложений Трансваальской системы. Родезийский кратон включает сходную вулканокластическую серию Булавайо, в которой Мак-Грегор обнаружил водорослевые известняки (см. разд. 8 этой главы). Разбросанные обнажения обеих осадочных серий разделены не только окружающими гранитами, но и породами более молодых поясов складчатости. Поэтому до сих пор возраст обеих серий не определен и не разработана их корреляция. На фиг. 52 Каапваальский и Родезийский кратоны для простоты объединены.

Система Свазиленд — древнейшая серия Южной Африки; более того, это древнейшая из всех известных осадочных серий. Пока можно лишь сказать, что ее возраст свыше 3,2 млрд. лет (фиг. 70 и табл. 15). Но не исключено, что датирование изверженных пород Онвервахт принесет нам более точные сведения об абсолютном возрасте проблематичных ископаемых остатков, столь обильных в породах системы Свазиленд.

Вулкано-кластическая серия системы Свазиленд отличается большой мощностью (общая мощность достигает более 10 000 м)

Фиг. 70. Стратиграфическая колонка докембрия Трансвааля.

Сбоку пунктирными линиями указаны основные сомнительные по датированию и корреляции места. В частности, многие полагают, что золото-урановые руды систем Витватерсранд и Доминион-Риф, о которых пойдет речь в следующей главе, вероятно, имеют возраст около 3 млрд., а не 2 млрд. лет (возраст отложен в млн. лет).

[3, 4, 84]. Впрочем, эта оценка получена путем суммирования мощности отдельных местных разрезов и не обязательно означает, что есть район, где она достигает этой величины. Во время осадконакопления такие осадочные бассейны не просто опускались, но и смещались, часто к так называемому форланду, и новые осадки отлагались не прямо над предыдущим, а рядом с ними. Такая картина хорошо известна, например, для третичных отложений, окаймляющих Мексиканский залив, и для отложений верхнего карбона в Рурском бассейне [64].

Во всяком случае, система Свазиленд действительно является очень мощной. Поэтому некоторые авторы предполагают, что структуры, найденные в самых нижних толщах серии Онвервахт, должны быть гораздо древнее структур из Фиг-Три. Но это не обязательно так. В верхнем карбоне серии почти такой же мощности отлагались всего за 0,05 млрд. лет, а между тем возраст системы Свазиленд пока известен с гораздо большей ошибкой — «более 3,1—3,2 млрд. лет». И хотя некоторые исследователи и считают, что нельзя сравнивать осадочные серии раннего докембрия с позднейшими геосинклиналями, мы можем рассматривать формации Онвервахт и Фиг-Три вместе.

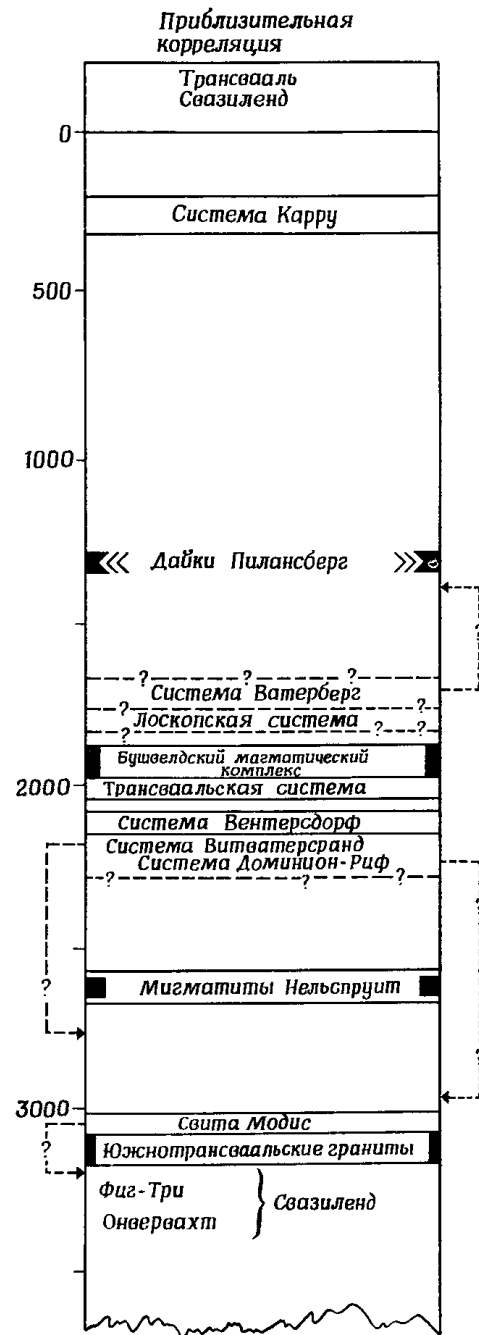


Таблица 15

Абсолютный возраст (определен рубидий-стронциевым методом<sup>1</sup> по монолиту и отдельным минералам) различных серий свазилендских гранитов<sup>2</sup> [19]

Гранит	Определение по	Возраст, млн. лет
G1	монолиту	3240 ± 300
	микроклину	2595 ± 90
	плаггиоклазу	5660 ± 1000
G4	монолиту	2900 ± 60
	биотиту	2330 ± 50
	мусковиту	3800 ± 100
	микроклину	2670 ± 30
G5	монолиту	2070 ± 50
	»	2400 ± 50
	»	2720 ± 340
	полевому шпату	2375 ± 70

<sup>1</sup> См. гл. III, разд. 9.

<sup>2</sup> Видно, что датировки по отдельным минералам расходятся с датировкой по монолиту. Считается, что причина этого — диффузия <sup>87</sup>Sr от одного минерала к другому после образования по юды. Если это так, то правильной должна считаться датировка по монолиту. Именно на основании этих данных формациям Фиг-Три и Онвервахт приписывается возраст более 3,2 млрд. лет.

Как явствует из обзора Клиффорда по радиометрической датировке горных пород Африки [19], возраст системы Свазиленд еще не вполне известен. Сейчас удалось определить возраст многих гранитов, окружающих сланцевые пояса системы Свазиленд, но полученные величины очень разноречивы. Разброс данных наводит на мысль, что эти граниты образовались уже после свазилендского горообразования. Значит, можно предположить, что свазилендская вулcano-кластическая серия древнее самого древнего из этих гранитов, т. е. ее возраст превышает 3240 ± 300 млн. лет (табл. 15). Пока существует только одно прямое доказательство этого: гранит G4 (табл. 15), для которого возраст по монолиту определен в 2,9 млрд. лет, дает интрузии в свиту Модис, самое верхнее подразделение системы Свазиленд, а значит, он моложе, чем Фиг-Три и Онвервахт.

В системе Свазиленд описаны мелкие сферические и нитчатые формы размером около 20 мкм. Их можно обнаружить и на тонких шлифах, и в материале, полученном путем мацерации. В этих структурах (во всяком случае, в их наружных частях) присутствует углистое вещество. На репликах со шлифов были выявлены с помощью электронного микроскопа еще более мелкие (менее 1 мкм в диаметре) структуры. Их реальность не вызывает сомнений. Они включены в хорошо изученные породы. При обработке пород бы-

ла предотвращена всякая возможность загрязнения извне. Основные формы сферических структур из Фиг-Три показаны на фото 23. Их можно разделить на несколько типов, обозначаемых А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub>, А<sub>3</sub> и В [68]. Нитчатые формы из формации Фиг-Три показаны на фото 24, а более мелкие, палочковидные структуры — на фото 25. Организованные элементы из серии Онвервахт показаны на фото 26.

Итак, в сериях Фиг-Три и Онвервахт системы Свазиленд встречаются разнообразные организованные элементы. Пока не доказано, что они имеют биогенную природу, т. е. являются настоящими ископаемыми остатками жизни раннего докембрия. Вещество этих структур, во всяком случае вещество их наружных оболочек, анализировалось различными тонкими методами и единогласно признано органическим. Иначе говоря, оно содержит соединения углерода, но является ли оно истинно органическим, т. е. созданным организмами, пока неизвестно. Возможно, это «органическое» вещество, имеющее абиогенную природу; об этом уже говорилось в разд. 10 данной главы. Ни одна черта морфологии обнаруженных структур не свидетельствует ясно об их биологическом происхождении. У них не удается выявить какое-либо тонкое внутреннее строение, не обладают они и причудливой внешней формой, которая свойственна некоторым ископаемым из сланцев Ганфлинт.

Пока дальнейшие исследования не принесли более надежных доказательств биогенной природы этих структур, нам придется называть их строго нейтральным термином «организованные элементы».

Если морфология вновь найденных структур с несомненностью будет признана «живой», то это послужит доказательством того, что найденные соединения углерода действительно можно назвать органическими. И наоборот, если будут найдены несомненные молекулярные ископаемые, доказывающие наличие жизни в период образования серий Онвервахт и Фиг-Три, то сильно возрастет вероятность того, что «организованные элементы» действительно представляют собой фоссилезированные остатки ранней жизни. Но пока вопрос остается открытым.

#### 18. СОВПАДЕНИЕ «ОРГАНИЗОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ» И ИСКОПАЕМЫХ ОСТАТКОВ ВО ВРЕМЕНИ; ОЗНАЧАЕТ ЛИ ЭТО СОСУЩЕСТВОВАНИЕ ПРЕДЖИЗНИ И РАННЕЙ ЖИЗНИ?

К сожалению, вопрос разграничения «организованных элементов», синтезированных неорганическим путем, и «органических элементов», являющихся окаменелыми остатками ранней жизни, сильно затрудняется в связи с тем обстоятельством, что, как уже говорилось ранее, преджизнь и ранняя жизнь могли на протяже-

нии примерно 2 млрд. лет существовать бок о бок. Аргументы в пользу такой возможности приведены в гл. XVI и XVIII; здесь мы рассмотрим только один пример такого сосуществования.

Как уже говорилось ранее, даже если преджизнь и ранняя жизнь сосуществовали в течение длительного времени, это вовсе не означает, что «органические» молекулы преджизни возникали в тех же местах, где обитали формы ранней жизни. Как мы уже не раз подчеркивали, синтез «органических» молекул преджизни и существование жизни в одной среде невозможны. Но вполне реально, что ранняя жизнь уже процветала в озерах, под слоем воды, оставляя в донных отложениях ископаемые остатки, а на поверхности материков еще царили условия, благоприятные для неорганического синтеза «органических» веществ. Тогда, сравнивая две осадочные породы одного возраста, но из разных мест, можно найти в одной из них настоящие ископаемые остатки, а в другой — «организованные элементы», остатки преджизни.

Сравним, например, ископаемые остатки из формации Ганфлинт, Онтарио, и «организованные элементы», описанные в породе системы Витватерсранд, Южная Африка [74, 75]. В первом сообщении об этих структурах они были названы «вероятными остатками жизни», но в следующей статье автор употребил более осторожное наименование — «клеточные структурные элементы». Судя по морфологии этих мелких округлых образований их нельзя считать настоящими ископаемыми остатками (фото 27). Но их возраст составляет 2,15 млрд. лет, т. е. они ненамного старше ископаемых остатков из сланцев Ганфлинт; следовательно, вполне можно ожидать, что во время образования системы Витватерсранд могли существовать достаточно сложные формы жизни, способные сохраняться в виде ископаемых остатков.

Это различие между двумя формациями можно было бы объяснить (хотя это не более чем предположение) разным способом их образования (подробнее об этом будет рассказано в следующей главе). Возможно, кремнистые сланцы Ганфлинт создавались на дне озер, где жизнь была укрыта под водой от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Напротив, пески и гравий системы Витватерсранд отлагались на берегах и в дельтах рек, по берегам озер и, возможно, океанов. Здесь ультрафиолет мог воздействовать на поверхность Земли, вызывая синтез «организованных элементов». Хотя преджизнь существовала в иной среде, чем ранняя жизнь, ее продукты могли сноситься реками в озера и океаны и попадать в «первичный бульон» (фиг. 96). Таким образом, хотя преджизнь была отделена от жизни, созданные преджизнью «организованные элементы», если они выдерживали перенос с речной водой, могли смешиваться с формами ранней жизни и даже могли подвергаться захоронению рядом с ними, в одной породе. Из фанерозоя известно немало случаев, когда организмы, жившие в раз-

ных местообитаниях, или *биоценозах*, подвергались фоссилизации в одном месте захоронения, в одном *танатоценозе*. Почему бы такому смешению не происходить и в докембрии?

#### 19. ПСЕВДОИСКОПАЕМЫЕ?

Заканчивая эту главу, я хочу еще добавить, что в докембрийских отложениях содержатся образования, напоминающие ископаемые остатки организмов, но, возможно, не являющихся таковыми. Их называют *псевдоископаемыми*. Я не собираюсь давать здесь полный обзор обширной литературы, так как перечисление неопределенных находок и скучно, и бесполезно. Приведу лишь два примера. Это находка так называемого *Corycium enigmaticum* Sederholm (1911) — первой из структур такого рода, и одного из новейших членов этой группы — рода *Rhysonetron* Hofmann [44], описанного в 1967 году.

Несмотря на свое видовое название<sup>1</sup>, *Corycium enigmaticum* обычно рассматривался как образование, имеющее биогенную природу. Существует подробный обзор литературы по этому вопросу [53]. Но основные доказательства биологического происхождения *Corycium* основаны на присутствии в нем некоторых следовых элементов и на соотношении стабильных изотопов углерода. Как мы увидим в гл. XIV, разд. 9, эти данные уже не могут считаться аргументом за или против биогенного происхождения.

По внешнему виду *Corycium* не слишком похож на ископаемое (фото 28). Это мешковидные структуры шириной от одного до нескольких сантиметров и длиной от одного до нескольких дециметров. Их оболочка образована тонким слоем графита или богатого графитом вещества. Неудивительно, что некоторые геологи предлагали считать *Corycium* неорганической структурой, образовавшейся в результате процесса оползания глинистых осадков во время их седиментации [83].

Осадочная серия, содержащая *Corycium*, древнее свекофенской складчатости, которой, по современным данным, 1,8—1,9 млрд. лет. Поэтому сейчас считается, что *Corycium* более 2 млрд. лет (А. Матисто, в печати, 1968). Следовательно, это образование относится к тому же возрастному классу, что и флора Ганфлинт, описанная Баргхоорном и рассмотренная нами выше. С геологической точки зрения отличие состоит в том, что кремнистый сланец из формации Ганфлинт Канадского щита гораздо менее метаморфизован, чем филлиты Балтийского щита, в которых найден *Corycium*. Поэтому в сланце Ганфлинт органическое вещество сохранилось гораздо лучше. Поскольку нас интересует глобальная проблема происхождения жизни, а не региональная геология Балтийского щита

<sup>1</sup> Enigmaticum — загадочный (лат.). — Прим. перев.

та, мы лучше обратим основное внимание на североамериканские находки, вопрос же о *Corycium* оставим открытым до тех пор, пока не обнаружатся более ясные факты.

Другие проблематичные ископаемые из докембрия — новый морфологический род *Rhysonetron* Hofmann. На самом деле они не относятся к настоящим ископаемым остаткам. Это просто структуры песчаника, интерпретируемые как окаменелые отпечатки древних организмов. Они описываются как «отдельные длинные, изогнутые, цилиндрические, суженные на конце палочки или веретена» (фото 29). Самое любопытное в них — продольные медианные насечки (скульптурированность) и косые, латеральные, серповидные морщины. В длину эти образования достигают 1 дм и более.

Гофманн [44] убежден, что такие сложные структуры не только обязательно должны иметь биогенную природу, но и непременно представляют собой отпечатки животных (скажем чуть осторожнее — многоклеточных). Но он считает, что пока было бы преждевременным приписывать им более определенное систематическое положение. Возможно, это отпечатки губок, кишечнорастворимых или кольчатых червей, а может быть, животных, до сих пор не известных науке, которые полностью вымерли, оставив лишь отпечатки в песчанике. Последняя возможность не исключена, так как возраст этих загадочных структур очень велик. *Rhysonetron* найден около озера Эллиот в Онтарио, в песчаниках верхнего гурона местной стратиграфической шкалы, т. е. в пластах среднего докембрия. Считается, что им более  $2155 \pm 80$  млн. лет и менее 2500 млн. лет (эта последняя цифра — возраст подстилающих догуронских гранитов).

Итак, отпечатки, называемые *Rhysonetron*, образовались в эпоху первичной бескислородной атмосферы. Это означает, что если они и в самом деле представляют собой окаменелые отпечатки животных (или многоклеточных), то это были представители примитивной группы животных, способных дышать при очень низком содержании кислорода в атмосфере, всего 1% его содержания в современной атмосфере. В таком случае предположение Гофманна о том, что речь должна идти о не известной науке, вымершей группе, выглядит правдоподобным. Возможно, это были какие-то примитивные животные, дыхательная система которых функционировала при очень низком содержании кислорода. В дальнейшем им на смену пришли другие, новые группы, с более совершенной дыхательной системой, развившейся после того, как в атмосфере накопился кислород.

Однако некоторые обстоятельства мешают признать эти веретенообразные структуры окаменелыми отпечатками животных. Неизвестно даже, имеют ли они биологическое происхождение. Дело в том, что все структуры приурочены к подошве пластов

песчаника. По ископаемым остаткам фанерозоя мы знаем, что подошва пласта песчаника — не самое лучшее место для фоссилизации. Ископаемые бывают рассеяны в толще песчаника, а не «приклеены» к подошве пласта, как веретена *Rhysonetron*. Зато нам известны мощные серии чередующихся слоев глин и песков, так называемые флишевые фации, в которых в подошве каждого песчаникового пласта видны разнообразные отпечатки, часть которых (если не все) имеет неорганическое происхождение. Быстрый поток воды, неся тяжелый песок по глинистому дну, вырывал в дне углубления, и при отложении песка создавались отпечатки довольно правильной формы. Конечно, песок мог сохранить и следы животных, живших в толще глины и на его поверхности, но эти следы, за исключением отпечатков, лежащих перпендикулярно пласту, совсем не так правильны, как веретена *Rhysonetron*, похожие больше на отпечатки неорганического происхождения. Следовательно, пока не будут получены новые данные, я предпочитаю рассматривать эти структуры как псевдоископаемые неорганической природы.

## 20. ОПТИМИСТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

Менее десяти лет назад я заключил обзор скудных остатков жизни, известных в то время из докембрия, оптимистическими словами о том, что значительное усиление интереса к докембрию, наметившееся в последние годы, несомненно, в скором времени принесет много нового. Эти ожидания вполне оправдались. Мы не только гораздо лучше познакомились с ископаемыми остатками среднего докембрия, но и узнали о существовании целой новой группы ископаемых остатков раннего докембрия (речь идет о спорных пока находках из системы Свазиленд). Более того, кроме этих истинных или псевдоископаемых, за истекшее время был открыт совершенно новый вид ископаемых остатков — молекулярные ископаемые.

Теперь уже нет сомнений в том, что жизнь существовала еще во времена первичной бескислородной атмосферы.

Конечно, обнаружение остатков ранней жизни и в дальнейшем не станет обыденным делом. На то есть две причины. Во-первых, формы ранней жизни были микроскопическими, а мы знаем, что микроорганизмы и другие мелкие организмы без твердых частей сохраняются лишь в редчайших случаях. Во-вторых, большинство пород, относящихся к ранней геологической истории, претерпело метаморфизм во время последующих периодов горообразования, и все свидетельства ранней жизни погибли.

И все же я думаю, что эту главу можно закончить столь же оптимистично. Я считаю, что в следующем десятилетии нас ожидают не менее обильные и интересные находки. Однако мне ка-

жется, что должно произойти качественное изменение. До недавнего времени в значительной мере преобладали настроения «рекордсменства»: кому удастся найти еще более древние остатки жизни? Любое найденное необычное образование, любое соединение углерода объявлялось новым свидетельством древности жизни. Но с развитием экспериментального подхода к проблеме, доказавшего, что возможен неорганический синтез «органических» молекул, на первый план выдвинулась другая проблема: являются ли обнаруженные остатки действительно органическими или их следует считать органическими в кавычках? Образованы ли они жизнью или преджизнью? Поэтому можно ожидать, что в следующем десятилетии главное внимание будет уделено поискам ключевых критериев, на основе которых мы сумеем отличать продукты преджизни от остатков жизни.

#### Список литературы

1. *Abelson P. H., Hoering T. C.*, Fatty acids from the oxydation of kerogen, Carnegie Inst. Wash., Yearbook, 64, 218—223 (1965).
2. *Abelson P. H., Parker P. L.*, Fatty acids in sedimentary rocks, Carnegie Inst. Wash., Yearbook, 61, 181—184 (1962).
3. *Anhaeusser C. R., Roering C., Viljoen M. J., Viljoen R. P.*, The Barberton Mountain Land: A model of the elements and the evolution of an Archean fold belt, Econ. Geol. Res. Unit. Univ. Witwatersrand, Johannesburg, Inform. Circ., 38, 31 pp. (1967).
4. *Anhaeusser C. R., Mason R., Viljoen M. J., Viljoen R. P.*, A reappraisal of some aspects of Precambrian shield geology, Econ. Geol. Res. Unit. Univ. Witwatersrand, Johannesburg. Inform. Circ., 49, 30 pp. (1968).
5. *Barghoorn E. S., Schopf J. W.*, Microorganisms three billion years old from the Precambrian of South Africa, Science, 152, 758—763 (1966).
6. *Barghoorn E. S., Tyler S. A.*, Microorganisms from the Gunflint Chert, Science, 147, 563—577 (1965).
7. *Barghoorn E. S., Meinschein W. G., Schopf J. W.*, Paleobiology of a Precambrian shale, Science, 148, 461—472 (1965).
8. *Belsky T., Johns R. B., McCarthy A. L., Burlingame A. L., Richter W., Calvin M.*, Evidence of life processes in a sediment two and a half billion years old, Nature, 206, 446—447 (1965).
9. *Bertrand J.*, Les édifices stromatolitiques précambriens de la «série à stromatolithes» du Nord-Ouest de l'Ahaggar (Sahara), Bull. Soc. Géol. France, 7 (10), 168—178 (1969).
10. *Boylan D. B., Alturki Y. I., Eglinton G.*, Application of gas chromatography and mass spectrometry to porphyrin microanalysis. In: P. A. Schenk and I. Havenaar (Editors), Advances in Organic Geochemistry 1968, Pergamon, London, pp. 227—240 (1969).
11. *Brooks J. D., Gould K., Smith J. W.*, Isoprenoid hydrocarbons in coal and petroleum, Nature, 222, 257—259 (1969).
12. *Burlingame A. L., Simonet B. R.*, High resolution mass spectrometry of Green River kerogen, Nature, 222, 741—747 (1969).
13. *Burlingame A. L., Haug P., Belsky T., Calvin M.*, Occurrence of biogenic steranes and pentacyclic triterpanes in an Eocenes shale (52 million years) and in an Early Precambrian shale (2, 7 billion years): A preliminary report, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 54, 1406—1412 (1965).
14. *Burlingame A. L., Haug P. A., Schnoes H. K., Simonet B. R.*, Fatty acids

- derived from the Green River Formation oil shale by extractions and oxidations. A review. In: P. A. Schenk and I. Havenaar (Editors), Advances in Organic Geochemistry 1968, Pergamon, London, pp. 85—130, 1969.
15. *Calvin M.*, Chemical evolution, Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A, 288, 441—466 (1965).
  16. *Calvin M.*, Molecular paleontology, Bennet Lecture — Trans. Leicester Lit. Phil. Soc., 62, 45—69 (1968).
  17. *Calvin M.*, Chemical Evolution, Clarendon, Oxford, 278 pp., 1969. (М. Кальвин, Химическая эволюция, изд-во Мир, М., 1971.)
  18. *Calvin M., Bassham J. A.*, The Photosynthesis of Carbon Compounds, Benjamin, New York, N. Y., 127 pp., 1962.
  19. *Clifford T. N.*, Radiometric dating and pre-Silurian geology of Africa. In: E. I. Hamilton and R. M. Farquar (Editors), Radiometric Dating for Geologists, Interscience, New York, N. Y., pp. 299—416, 1968.
  20. *Cloud P. E.*, Pre-Metazoans and the origins of Metazoa. In: E. T. Drake (Editor), Evolution and Environment, Yale Univ. Press, New Haven, Conn., pp. 1—72, 1968.
  21. *Cloud P. E., Gruner J. W., Hagen H.*, Carbonaceous rock of the Soudan Iron Formation (Early Precambrian), Science, 148, 1713—1716 (1965).
  22. *Eglinton G.*, Hydrocarbons and fatty acids in living organisms and recent and ancient sediments. In: P. A. Schenk and I. Havenaar (Editors), Advances in Organic Geochemistry 1968, Pergamon, London, 1—24, 1969.
  23. *Eglinton G., Calvin M.*, Chemical fossils, Sci. Am., 216 (1), 32—43 (1967).
  24. *Eglinton G., Scott P. M., Belsky T., Burlingame A. L., Calvin M.*, Hydrocarbons of biological origin from a one-billion-year-old sediment, Science, 145, 263—264 (1964).
  25. *Eglinton G., Scott P. M., Belsky T., Burlingame A. L., Richter W., Calvin M.*, Occurrence of isoprenoid alkanes in a Precambrian sediment. In: G. D. Hobson and M. C. Louis (Editors), Advances in Organic Geochemistry, Pergamon, London, 41—74, 1964.
  26. *Engel A. E. J., Nagy B., Nagy L. A., Engel C. G., Kremp G. O., Drew C. M.*, Alga-like forms in Onverwacht Series, South Africa: Oldest recognized lifelike forms on earth, Science, 161, 1005—1008 (1968).
  27. *Faure G., Kovach J.*, The age of the Gunflint Formation of the Animikie Series of Ontario, Canada, Geol. Soc. Am. Bull., 80, 1725—1736 (1969).
  28. *Glaessner M. F.*, Precambrian animals, Sci. Am., 204, 72—78 (1961).
  29. *Glaessner M. F.*, Precambrian fossils, Biol. Rev. Cambridge Phil. Soc., 37, 467—494 (1962).
  30. *Glaessner M. F.*, Precambrian paleontology, Earth-Sci. Rev., 1, 29—50 (1966).
  31. *Glaessner M. F.*, Biological events and the Precambrian time scale, Can. J. Earth Sci., 5, 585—590 (1968).
  32. *Glaessner M. F., Wade M.*, The Late Precambrian fossils from Ediacara, South Australia, Paleontology, 9, 599—628 (1966).
  33. *Glaessner M. F., Preiss W. V., Walter M. R.*, Precambrian columnar Stromatolites in Australia, Morphological and stratigraphical analysis, Science, 164, 1056—1058 (1969).
  34. *Goldich S. S.*, Geochronology in the Lake Superior region, Can. J. Earth Sci., 5, 715—724 (1968).
  35. *Goldich S. S., Nier A. O., Baadsgaard H., Hofman J. H., Krueger H.*, The Precambrian geology and geochronology of Minnesota, Minnesota Geol. Surv., Bull. 41, 193 (1961).
  36. *Goldring R., Curnow C. N.*, The stratigraphy and facies of the Late Precambrian at Ediacara, South Australia, J. Geol. Soc. Australia, 14, 195—214 (1967).
  37. *Gravelle M., Lelubre M.*, Découverte de Stromatolithes du groupe des Co-

- nophytions dans le Pharusien de l'Ahaggar occidental (Sahara Central), Bull. Soc. Géol. France, 6(7), 435—442 (1957).
38. Han J., Calvin M., Occurrence of fatty acids and aliphatic hydrocarbons in a 3—4 billion-year-old sediment, Nature, 224, 576—577 (1969).
  39. Hare P. E., Amino acid artifacts in organic geochemistry, Carnegie Inst. Wash., Yearbook, 64, 232—235 (1965).
  40. Härme M., Perttunen V., Stromatolite structures in Precambrian dolomite in Tervola, North Finland. Compt. Rend., Soc. Géol. Finlande, 35, 79—81 (1963).
  41. Hoering T. C., The isolation of organic compounds from Precambrian rocks, Carnegie Inst. Wash., Yearbook, 61, 184—187 (1962).
  42. Hoering T. C., The extractable organic matter in Precambrian rocks and the problem of contamination, Carnegie Inst., Wash., Yearbook, 64, 215—218 (1965).
  43. Hoering T. C., The organic chemistry of Precambrian rocks. In: P. H. Abelson (Editor), Researches in Geochemistry, II. Wiley, New York, N. Y., 87—111, 1967.
  44. Hofmann H. J., Precambrian fossils (?) near Elliot Lake, Ontario, Science, 156, 500—504 (1967).
  45. Hurley P. M., Fairbairn H. W., Pinson W. H., Hower J., Unmetamorphosed minerals in the Gunflint Formation used to test the age of the Animikie, J. Geol., 70, 489—492 (1962).
  46. Johns R. B., Belsky T., McCarthy E. D., Burlingame A. L., Haug P., Schnoes H. K., Richter W., Calvin M., The organic geochemistry of ancient sediments, II, Geochim. Cosmochim. Acta, 30, 1191—1222 (1966).
  47. Kluyver A. J., 's Levens nevels. Handel. 26e Nederl. Natuurk.-Geneesk. Congr., 82, 82—106. (Translated as «Life's fringes» in: A. F. Kamp, J. W. M. La Rivière and W. Verhoeven, Albert Jan Kluyver, North-Holland, Amsterdam, 329—348, 1937).
  48. Kvenvolden K. A., Peterson E., Pollock G. E., Optical configuration of aminoacids in Precambrian Fig Tree chert, Science, 221, 141—143 (1969).
  49. Laberge G. L., Microfossils and Precambrian iron-formations, Geol. Soc. Am. Bull., 78, 331—342 (1967).
  50. Licari G. R., Cloud P. E., Reproductive structures and taxonomic affinities of some nanofossils from the Gunflint Iron Formation, Proc. Natl. Acad. U. S., 59, 1053—1060 (1968).
  51. MacGregor A. M., A pre-Cambrian algal limestone in Southern Rhodesia, Trans. Geol. Soc. S. Africa, 43, 9—16 (1940).
  52. MacLeod W. D., Combined gas chromatography—mass spectrometry of complex hydrocarbon trace residues in sediments, J. Gas. Chromatog., 6, 591—594 (1968).
  53. Matisto A., Über den Ursprung des Kohlenstoffes in *Corycium*, Neues Jahrb. Geol. Paläontol., Monatsh., 1963, 441—443 (1963).
  54. McCarthy E. D., A treatise in organic geochemistry, Lawrence Rad. Lab., Berkeley, Rept. UCRL-47758, 290, 1967.
  55. McCarthy E. D., Calvin M., Organic geochemical studies, I. Molecular criteria for hydrocarbon genesis, Nature, 216, 642—647 (1967).
  56. Meinschein W. G., Barghoorn E. S., Biological remnants in a Precambrian sediment, Science, 145, 262—263 (1964).
  57. Moorhouse W. W., Beales F. W., Fossils from the Animikie, Port Arthur, Ontario, Trans. Roy. Soc. Can., 56, 97—110 (1962).
  58. Murphy R. C., Djuricic M. V., Markey S. P., Biemann K., Acidic components of Green River Shale identified by a gas chromatography-mass spectrometry-computer system, Science, 165, 695—697 (1969).
  59. Nagy B., Nagy L. A., Early Pre-Cambrian Onverwacht microstructures: Possibly the oldest fossils on earth? Nature, 223, 1226—1229 (1969).
  60. Nagy B., Urey H. C., Organic geochemical investigations in relation to

- the analysis of returned lunar rock samples, Life Sci. Space Rev., 7, 31—46 (1969).
61. Nicolaysen L. O., Stratigraphic interpretation of age measurements in southern Africa. In: A. E. J. Engel (Editor), Petrographic Studies—Geol. Soc. Am., Buddingron Vol., 569—598, 1962.
  62. Oró J., Nooner D. W., Aliphatic hydrocarbons in Pre-Cambrian rocks, Nature, 213, 1082—1085 (1967).
  63. Oró J., Nooner D. W., Zlatkis A., Hydrocarbons of biological origin in sediments about two billion years old, Science, 148, 77—79 (1965).
  64. Paproth E., Teichmüller R., Die paläogeographische Entwicklung der subvarischischen Saumsenke in Nordwestdeutschland im Laufe des Karbons, Compt. Rend. Congr. Intern. Stratigraphie Géol. Carbonifère, 4<sup>e</sup>, Heerlen, 1961, 2, 471—491 (1961).
  65. Peterman Z. E., Rb—Sr dating of metasedimentary rocks of Minnesota, Geol. Soc. Am. Bull., 77, 1031—1044 (1966).
  66. Pflug H. D., Einige Reste niederer Pflanzen aus dem Algonkium, Paleontographica, 117B, 59—74 (1966).
  67. Pflug H. D., Structured organic remains from the Fig Tree Series of the Barberton Mountain Land, Econ. Geol. Res. Unit. Univ. Witwatersrand, Johannesburg, Inform. Circ., 28, 14 pp., 1966.
  68. Pflug H. D., Strukturierte organische Reste aus über 3 Milliarden Jahre alten Gesteine Südafrikas, Naturwissenschaften, 54, 236—241 (1967).
  69. Pflug H. D., Meinel W., Neumann K. H., Meinel M., Entwicklungstendenzen des frühen Lebens auf der Erde, Naturwissenschaften, 56, 10—14 (1969).
  70. Prashnowsky A. A., Schidlowski M., Investigations of Pre-Cambrian tucho-lite, Nature, 216, 560—563 (1967).
  71. Ruttén M. G., Geologic data on atmospheric history, Paleogeography Paleoclimatol. Paleoeool., 2, 47—57 (1966).
  72. Ruttén M. G., Sedimentary ores of the Early and Middle Precambrian and the history of atmospheric oxygen, Proc. Inter-Univ. Congr., 15th, 1967, Leicester, pp. 187—195, 1969.
  73. Salop L. I., Pre-Cambrian of the U. S. S. R. Proc. Intern. Geol. Congr., 23rd, Prague, 4, 61—73 (1968).
  74. Schidlowski M., Probable life-forms from the Precambrian of the Witwatersrand System (South Africa), Nature, 205, 895—896 (1965).
  75. Schidlowski M., Zellular strukturierte Elemente aus dem Präkambrium des Witwatersrand Systeme (Südafrika), Z. Deut. Geol. Ges., 115, 183—186 (1966).
  76. Schidlowski M., Untersuchungen zur Metallogene im südwestlichen Witwatersrand-Becken (Oranje-Freistaat-Goldfeld, Südafrika), Beih. Geol. Jb., 85, 80 (1970).
  77. Schopf J. W., Barghoorn E. S., Alga-like fossils from the Early Precambrian of South Africa, Science, 156, 508—512 (1967).
  78. Schopf J. W., Kvenvolden K. A., Barghoorn E. S., Amino acids in Precambrian sediments. An assay, Proc. Natl. Acad. U. S., 59, 639—646 (1968).
  79. Sederholm J. J., Über eine archaische Sedimentformation im südwestlichen Finnland und ihre Bedeutung für die Erklärung der Entstehungsweise des Grundgebirges, Bull. Comm. Géol. Finlande, I, 6, 254 (1897).
  80. Tyler S. A., Barghoorn E. S., Occurrence of structurally preserved plants in the pre-Cambrian rocks of the Canadian Shield, Science, 119, 606—608 (1954).
  81. Van Hoeven W., Organic geochemistry, Lawrence Radiation Lab., Berkeley, Rept., UCRL-18690, 242, 1969.
  82. Van Hoeven W., Maxwell J. R., Calvin M., Fatty acids and hydrocarbons as evidence of life processes in sediments and crude oils, Geochim. Cosmochim. Acta, 33, 877—882 (1969).



83. *Van Straaten L. M. J. U.*, Occurrence in Finland of structures due to sub-aquatic sliding of sediments, *Bull. Comm. Géol. Finlande*, 144, 9—18 (1950).
84. *Viljoen M. J., Viljoen R. P.*, A reassessment of the Onverwacht Series in the Komati River valley, *Econ. Geol. Res. Unit, Univ. Witwatersrand, Johannesburg, Inform. Circ.*, 36, 35 (1967).
85. *Wade M.*, Medusae from the uppermost Precambrian or Cambrian sandstones, Central Australia, *Paleontology*, 12, 351—356 (1969).
86. *Young R. B.*, Further notes on algal structures in the Dolomite Series, *Trans. Geol. Soc. S. Africa*, 43, 17—22 (1940).
87. *Young R. B.*, Note on an unusual type of concretionary structure in limestones of the Dolomite Series, *Trans. Geol. Soc. S. Africa*, 43, 23—26 (1940).

## УСЛОВИЯ СРЕДЫ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ

## 1. РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ СРЕДЫ ПО ИСКОПАЕМЫМ ОСТАТКАМ И ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Теперь, после ознакомления с ископаемыми остатками ранних стадий развития жизни, мы расскажем о том, какие сведения о ранней жизни можно получить, изучая эти остатки и рассматривая различные данные геологии.

Ископаемые остатки докембрия — окаменелости и биогенные отложения — обычно могут лишь свидетельствовать о присутствии жизни на Земле во время их образования. Ископаемые остатки, относящиеся к более поздним эпохам, рассказывают нам гораздо больше: например, о том, где жил соответствующий организм — в море, в озере или на суше. По «молодым» ископаемым можно даже судить о том, тепло или холодно, сыро или сухо было в том месте, где они подверглись захоронению. Но узнавать все это по остаткам ранней жизни мы пока не умеем. Организмы той эпохи были настолько примитивны, что могли, видимо, существовать в любой среде. Даже когда мы обнаруживаем молекулярные ископаемые, указывающие на возможность органического фотосинтеза, мы не можем сделать заключение о присутствии в среде свободного кислорода, поскольку у нас нет данных о кислородном балансе, о соотношении выделения и поглощения кислорода.

Недвусмысленным биологическим индикатором уровня кислорода в атмосфере может служить лишь существование наземной флоры или фауны. Из гл. XV мы узнаем, что наземные растения и животные, по-видимому, не могли жить в атмосфере с содержанием кислорода менее 0,1 его содержания в современной атмосфере, так как при меньшей концентрации кислорода губительные ультрафиолетовые лучи беспрепятственно достигали поверхности Земли. Однако, как мы увидим в гл. XVI, содержание кислорода в атмосфере достигло этого порога, по всей вероятности, только в силуре, так что биологический индикатор бесполезен для восстановления ранней истории жизни.

Данные о составе древней атмосферы можно получить, изучая породы, формировавшиеся в контакте с этой атмосферой. Пока такой способ позволяет нам получить лишь самый общий ответ, сообщая, была ли атмосфера в тот или иной период кислородной или нет. Важнейшие из таких пород — осадки, образовавшиеся в процессах выветривания, переноса и отложения. Эти процессы,

идущие на поверхности Земли, называются *экзогенными* в противоположность *эндогенным* процессам, протекающим внутри коры.

В этой главе речь пойдет о том, какие данные можно получить, изучая горные породы, относящиеся к интересующей нас эпохе. Но сначала кратко рассмотрим различия между эндогенными и экзогенными процессами, а также ознакомимся с процессом выветривания.

## 2. ЭКЗОГЕННЫЕ И ЭНДОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Процессы, идущие на поверхности суши (т. е. на поверхности так называемой литосферы), в воде (т. е. в гидросфере) и в воздухе (атмосфере), геологи называют экзогенными процессами. Они затрагивают лишь земную поверхность. Все они в какой-то мере связаны с атмосферой — одни прямо, другие косвенно. Процессы, протекающие внутри коры, называются *эндогенными*. Типичные примеры эндогенных процессов — горообразование, метаморфизм глубинных пород и образование гранитов. Типичные экзогенные процессы — выветривание, почвообразование, эрозия, перенос ветром или водой, осадкообразование.

Нас интересуют только породы, формировавшиеся в контакте с атмосферой, т. е. продукты экзогенных процессов. Считается, что состав этих пород в какой-то мере отражает состав древней атмосферы.

## 3. ВЫВЕТРИВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

В самом важном для нашей проблемы цикле экзогенных процессов (выветривание — эрозия — перенос — осадкообразование) выветривание не обязательно приурочено к началу цикла. В зависимости от того, как протекают отдельные стадии, например от скорости эрозии и переноса, а также от среды (низменность это или океан), в которой происходит осадкообразование, выветривание может идти и на поздних стадиях цикла. На этот процесс сильно влияет состав атмосферы, так как для того, чтобы шло выветривание, порода и ее минералы должны постоянно соприкасаться с атмосферой (для остальных процессов цикла допустим перерыв в таком контакте на больший или меньший срок).

Для того чтобы мы могли оценить эффект выветривания, следует кратко ознакомиться с современным составом пород земной коры. Самые распространенные в коре элементы — кремний (Si), алюминий (Al) и кислород (O). Из символов первых двух элементов составлен геологический термин для обозначения материковой коры — *сиаль*.

Большинство минералов, образующих породы земной коры, состоит из соединений этих трех элементов с добавками других

элементов. Кварц — это двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Большинство других минералов представляют собой силикаты, т. е. соединения Si, O и Al, в состав которых входят щелочноземельные металлы Ca и Mg, щелочные металлы K и Na, основные металлы типа Fe, водород, галогены Cl и Br, а также другие элементы. Силикаты, в состав которых кроме алюминия и кремния входят только щелочные металлы и кальций, образуют светлоокрашенные минералы, например полевые шпаты. В темноцветных минералах — биотите, авгите, роговой обманке и оливине — кроме алюминия и кремния содержатся магний, железо и другие металлы. Именно из кварца вместе с полевыми шпатами и темноцветными минералами и сложена в основном земная кора. Кроме того встречаются — главным образом в изверженных и метаморфических породах и в соответствующих рудных жилах — также рудные минералы. Они представляют собой сульфиды, например пирит ( $\text{FeS}_2$ ), и окислы металлов, например магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Как правило, сульфиды образуются в низкотемпературных процессах, а окислы — при более высоких температурах.

Возвращаясь к процессу выветривания, надо сказать, что породы, выходящие на земную поверхность, подвергаются двум видам воздействия — физическому и химическому.

В настоящее время редко можно встретить чисто физическое выветривание. Оно происходит в очень холодных или в очень жарких и сухих районах — арктической тундре и пустынях. В арктических областях породы разрушает в основном морозное выветривание, а в пустынях — жара. В остальных же зонах Земли мы встречаем комбинированное, физико-химическое выветривание. Чаще всего химическое выветривание преобладает над физическим. Нередко влияние последнего малозаметно; тогда обычно говорят просто о химическом выветривании, пренебрегая ролью физического.

## 4. МИНЕРАЛЫ, РАЗРУШАЮЩИЕСЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В условиях современной окислительной атмосферы химическому выветриванию подвержены все минералы, кроме окислов. И полевые шпаты, и темноокрашенные минералы обычных пород, и сульфиды рудных жил окисляются, образуя растворимые ионные соединения. Остаются нетронутыми только окислы — обычный кварц и гораздо менее распространенные полностью окисленные металлы, например минерал гематит. Растворы с ионами, образовавшимися в результате распада полевых шпатов, темноцветных минералов и рудных минералов, переносятся грунтовыми водами и реками в низины, озера и океаны. Там, как правило ниже горизонта грунтовых вод, часто в отсутствие свободного кислорода,

образуются новые соединения. В основном эти новые минералы относятся к группе глинистых.

Это упрощенный вариант обычного цикла выветривание — перенос — рекомбинация. Мы отметили здесь два основных пункта, важных для нашей проблемы: 1) что все минералы, кроме окислов, подвержены сейчас разрушительному действию химического выветривания и 2) что ионы, высвободившиеся из минералов при выветривании, после переноса в район отложения соединяются друг с другом, образуя обычно глинистые минералы.

Вот почему мы встречаем сейчас только три основных типа осадков: песок, глину и известняк. Пески представлены почти исключительно кварцевыми песками. Это продукты химического выветривания, часто подвергавшиеся повторной эрозии, переносу и переотложению. Глины — новообразовавшиеся отложения, возникшие при рекомбинации ионов — продуктов химического выветривания. Карбонатное вещество известняков имеет главным образом биогенную природу — это раковины животных и продукты жизнедеятельности некоторых растений.

Другие минералы лишь в исключительных случаях имеют возможность сохраниться в цикле выветривание — перенос — осадкообразование. Например, в песке иногда может содержаться заметное количество полевого шпата. Но это случается только тогда, когда продукты разрушения изверженных пород отлагались недалеко от места выхода этих пород, и при условии, что осадконакопление шло так быстро, что не могло происходить дальнейшее химическое выветривание. Сульфиды встречаются теперь еще реже; они не только выветриваются быстрее полевых шпатов, но еще и разлагаются серными бактериями. Они сохраняются в полярных тундрах, где жестокий арктический мороз препятствует химической эрозии, или в быстро опускающейся долине Инда, где новые осадки так быстро покрывают старые, что отложения оказываются изолированными от воздуха до того, как зерна пирита успеют разрушиться.

Эти исключения, будучи очень редкими и связанными с необычными условиями внешней среды, лишь подтверждают основное правило: в условиях нашей современной окислительной атмосферы все пески — это кварцевые пески. Устойчивыми минералами являются лишь окислы.

##### 5. МИНЕРАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ В УСЛОВИЯХ БЕСКИСЛОРОДНОЙ АТМОСФЕРЫ

Но в условиях первичной атмосферы восстановительного характера дело обстоит иначе. Тогда полевые шпаты, темноцветные минералы и сульфиды могли гораздо дольше находиться на поверхности Земли, не разрушаясь. Они могли вовлекаться в новые

циклы эрозия — перенос — осадкообразование, когда в результате, например, незначительных движений коры, изменения русла рек, понижения уровня моря место их первоначального отложения подвергалось эрозии. Эти минералы подвергались тогда главным образом механическим воздействиям, т. е. физическому, а не химическому выветриванию. Пройдя несколько раз через цикл эрозия — перенос — отложение, обломки этих минералов должны были хорошо обкататься и отсортироваться по твердости, размеру и удельной массе, подобно современным кварцевым пескам.

В такой восстановительной атмосфере могли формироваться пески из самых разных минералов, например крупнозернистые и тонкозернистые пески из легких минералов — кварца и полевого шпата (а не одного кварца, как сейчас). Или пески минералов средней удельной массы (типа роговой обманки и авгита). Могли существовать и пески из тяжелых рудных минералов — сульфидов и неполностью окисленных металлических окислов, например магнетита, уранинита. Место окончательного отложения минерала определялось не химическими, а физическими его свойствами — размером, формой и удельной массой отдельных зерен.

##### 6. ИССЛЕДОВАНИЯ РАНКАМЫ; ПРОДУКТЫ РАЗРУШЕНИЯ ГРАНИТОВ

Первую попытку определить состав первичной атмосферы исходя из разного хода экзогенных процессов в различных атмосферах предпринял уже в 1955 году Ранкама [23]. Он сделал некоторые выводы о характере атмосферы, изучая древние обломочные породы, залегающие вокруг гранитных массивов в Финляндии, из которых, как можно думать, эти обломочные породы образовались.

Этот гранит, который представляет собой кварцевый диорит, содержит около 4% двухвалентного железа и 2% трехвалентного (по массе окислов). В условиях окислительного выветривания, переноса и отложения двухвалентное железо окисляется. Но в изученных Ранкамой породах Финляндии ситуация иная: отношение  $Fe_2O_3/FeO$  в них сравнимо с таковым близлежащих кварцевых диоритов и даже ниже, чем в диоритовой гальке, включенной в осадочную породу (табл. 16). Из этого Ранкама сделал вывод, что выветривание данного кварцевого диорита происходило в восстановительной атмосфере.

Так было получено первое доказательство того, что в докембрии Земля действительно была окружена бескислородной атмосферой. Это надо расценивать как крупный успех в исследовании возможности возникновения жизни естественным путем.

Работы Ранкамы дали бы нам и точное представление о том, когда именно существовала бескислородная атмосфера, если бы удалось определить возраст осадочных пород, окружающих кварцевый диорит. К сожалению, попытка установить их возраст не

Таблица 16

Содержание двухвалентного и трехвалентного железа (весовые %) в гранитах (кварцевых диоритах) и в образовавшихся из них осадочных породах докембрия вблизи Тампере (Финляндия) [23]

	Галька из кварцевого диорита	Кварцевые диориты					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,98	0,79	0,61	0,75	1,46	0,50	1,09
FeO	3,67	6,70	4,06	6,23	7,99	4,35	5,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	0,54	0,12	0,15	0,12	0,18	0,11	0,19
Осадочные породы							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,16	1,73	0,49	0,65	1,43	
FeO		2,94	5,19	5,06	6,31	6,71	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO		0,05	0,33	0,10	0,10	0,21	

увенчалась успехом. Сначала он был оценен в 1800 млн. лет, но, как затем выяснилось, это возраст более позднего метаморфизма, так что на самом деле эта порода должна быть гораздо древнее. Более того, с тех пор как были опубликованы труды Ранкамы, некоторые геологи выразили сомнение в том, действительно ли эти метаморфические осадочные породы являются продуктом эрозии гранита. Тем самым ставятся под сомнение все выводы Ранкамы. Однако основная идея автора остается верной, и ее применение позволило в дальнейшем получить гораздо более достоверные результаты. Мы обсудим их в следующих разделах.

#### 7. РАБОТЫ РАМДОРА; ПИРИТОВЫЕ ПЕСКИ И ЗОЛОТО-УРАНОВЫЕ «РИФЫ»

В 1958 году Рамдор [21] обратил внимание на тот факт, что древние докембрийские осадочные породы древних щитов Южной Африки, Бразилии и Канады, имеющие промышленное значение ввиду того, что в них содержится уран (вместе с золотом или без него), и потому хорошо изученные, могли образоваться в бескислородной атмосфере.

Из осадочных пород Южной Африки уже давно добывается золото, поэтому их называют «золотыми рифами». В последние десятилетия здесь добывается и уран, отчего, конечно, возросло экономическое значение этих пород. Но сходные с ними породы Бразилии и Канады так бедны золотом, что их никогда не называли «золотыми рифами», и разрабатываться они стали сравни-

тельно недавно, когда содержащийся в них уран приобрел важное значение. Отложения, изученные Рамдором, относятся к следующим формациям: Доминион-Риф и Витватерсранд в Южной Африке; Серра-де-Жакобина в Бразилии, штат Байя; Блайнд-Ривер, провинция Онтарио в Канаде. Они сильно различаются по возрасту, а также по географическому и геологическому положению. Общее между ними то, что все они относятся к раннему и среднему докембрию, причем ни в позднем докембрии, ни в палеозое подобных пород не обнаружено.

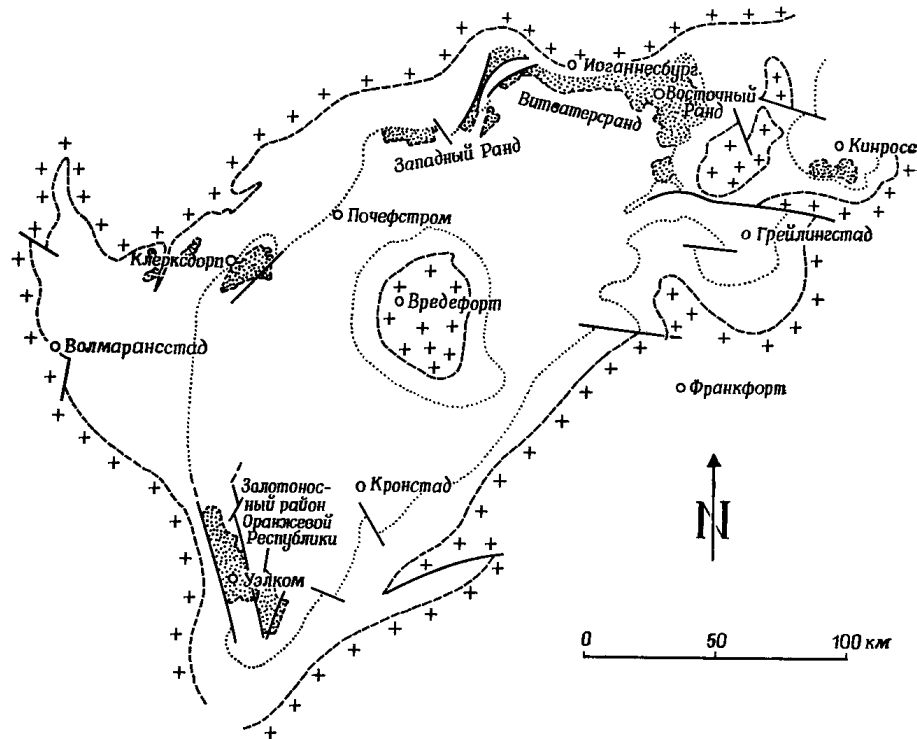
Но нас не интересует их промышленное значение. Они важны с общегеологической точки зрения и с точки зрения нашей проблемы. Эти породы сложены древними песками и гравием и возникли в результате экзогенных процессов. Следовательно, их состав должен в какой-то мере отражать состав древней атмосферы. В этих отложениях присутствуют зерна не только кварца, но и сульфидов, особенно пирита, а также урановой смолки. Урановая смолка — сложный минерал непостоянного состава (от UO<sub>2</sub> до U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Первоначально он состоял из наименее окисленной формы урана — минерала уранинита (UO<sub>2</sub>), а затем окисление привело к образованию урановой смолки, смеси окислов урана.

Несмотря на различия в географическом и стратиграфическом положении, а также в возрасте, состав этих кварцево-пиритовых песков с небольшой примесью золота и урана так однообразен, что даже специалисты зачастую не могут сказать, из какого месторождения взят образец. Конечно, минеральный состав меняется от пласта к пласту; обнаружена и горизонтальная изменчивость состава в пределах одного пласта. Но все эти колебания состава не выходят за определенные весьма узкие пределы, и общий характер пород из разных мест и горизонтов остается однородным. Однако еще важнее то, что эта картина резко отличается от того, что наблюдается для всех более молодых отложений гравия и песка, возникших в конце докембрия и позже, вплоть до наших дней.

#### 8. ПЕСКИ С ПИРИТОМ, УРАНИНИТОМ И ИЛЬМЕНИТОМ

Отложения, о которых говорилось в предыдущем разделе, представляют собой древние конгломераты и пески, сцементированные в очень твердую породу, залегающую в виде «рифов». Кроме кварца в них содержится много пирита (FeS<sub>2</sub>), ильменита (FeTiO<sub>3</sub>) и урановой смолки, образовавшейся из первичного минерала уранинита (UO<sub>2</sub>). Эти породы обладают признаками, характерными для отложений, накапливавшихся в виде гравия и песков в руслах рек и в озерах. Поскольку такие породы богаты ценными минералами, их называют *россыпями*. Окатанность отдельных зерен, очень хорошая отсортированность по размеру зерна, различия между пластами по минеральному составу и размеру

зерна свидетельствуют о том, что это именно озерные и речные отложения. Рамдор [21] нашел следы эрозии в более древних пластах, а также признаки переотложения обломков более древних песчаников и конгломератов вместе с отдельными зернами минералов в более молодые пласты. Значит, цикл выветривание —



Фиг. 71. Схематическая карта бассейна Витватерсранд (Южная Африка). Крестики — древние породы основания (возраст около 3 млрд. лет), окружающие бассейн и обнажающиеся также в области купола Вредефорт; белым обозначена система Витватерсранд; пунктирная линия — граница между вышележащими и нижними частями системы. Все более молодые породы не отмечены. Точками отмечены области золотых месторождений — районы, в которых содержание золота в конгломератах достаточно высоко для его добычи.

эрозия — перенос — отложение повторялся несколько раз и, следовательно, данные породы неоднократно приходили в контакт с атмосферой.

Таким образом, эти древние отложения содержат зерна очень разного минерального состава — кварц, пирит, урановая смолка — а значит, и разной удельной массы. Физические процессы сортировки отдельных зерен при отложении этих пород происходили гораздо активнее, чем при образовании позднейших отложений песка

и гравия, состоящих почти исключительно из зерен кварца. В древних отложениях одного горизонта более легкие кварцевые зерна всегда гораздо крупнее тяжелых зерен пирита, а зерна самого тяжелого минерала — урановой смолки — самые мелкие.

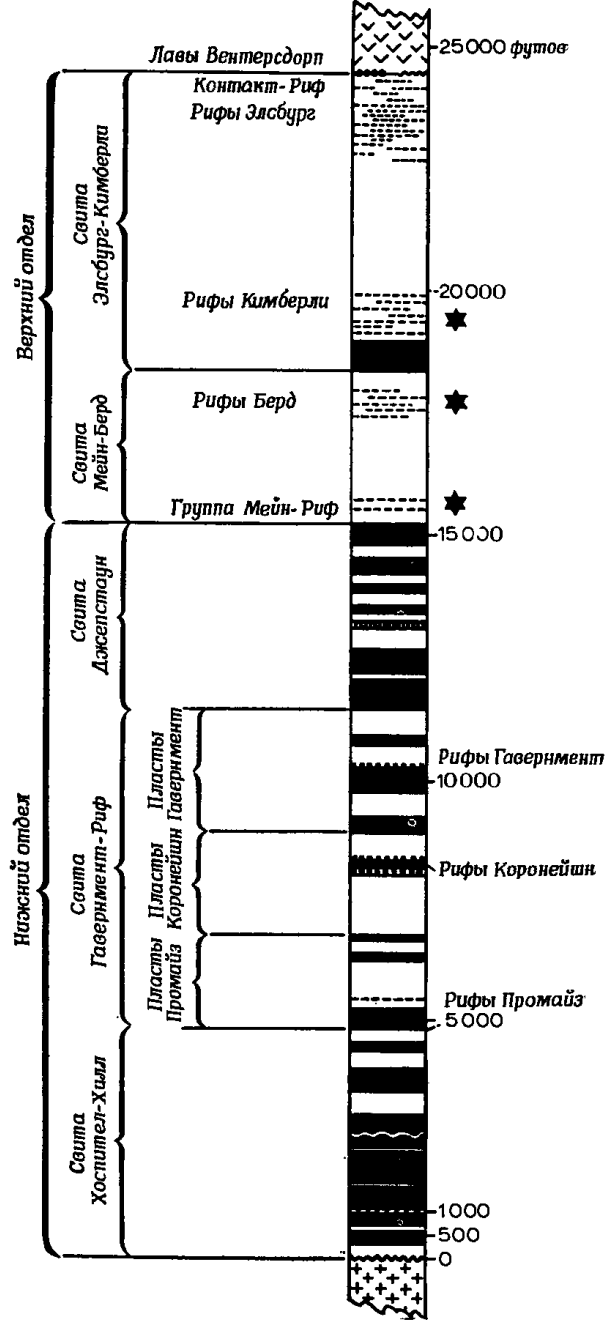
По своему залеганию эти древние пески и гравии очень похожи на отложения более молодых осадочных бассейнов. В качестве примера рассмотрим бассейн Витватерсранд в Южной Африке [27] (фиг. 71). Это блюдцеобразная впадина размером примерно 300 на 100 км, расположенная на гораздо более древнем основании. В центре бассейна в результате позднейшего поднятия и эрозии породы основания обнажились (купол Вредефорт).

Максимальная мощность осадочной серии Витватерсранд составляет около 8 км, но это не означает, что здесь когда-то был постепенно заполнявшийся отложениями бассейн глубиной 8 км. Отложения эти материковые или прибрежные (или только прибрежные); возможно, они сформировались в дельтах и аналогичных образованиях, существовавших на протяжении всего времени образования системы Витватерсранд. Мы можем представить себе медленно опускающийся бассейн, в котором осадконакопление преобладало над опусканием. Поверхность суши всегда оставалась вблизи уровня моря, независимо от того, насколько низко опускалось основание. Лишь много времени спустя после того, как осадконакопление прекратилось, дальнейшее опускание коры создало знакомый нам блюдцеобразный «бассейн», в котором серия Витватерсранд почти на всем своем протяжении перекрыта молодыми породами.

В процессе отложения этой серии кластических осадков вследствие изменений в скорости опускания коры и скорости седиментации возникла так называемая *ритмичность осадочных пород* (фиг. 72 и 73), вполне сходная с ритмичностью, обнаруженной в более молодых осадочных бассейнах.

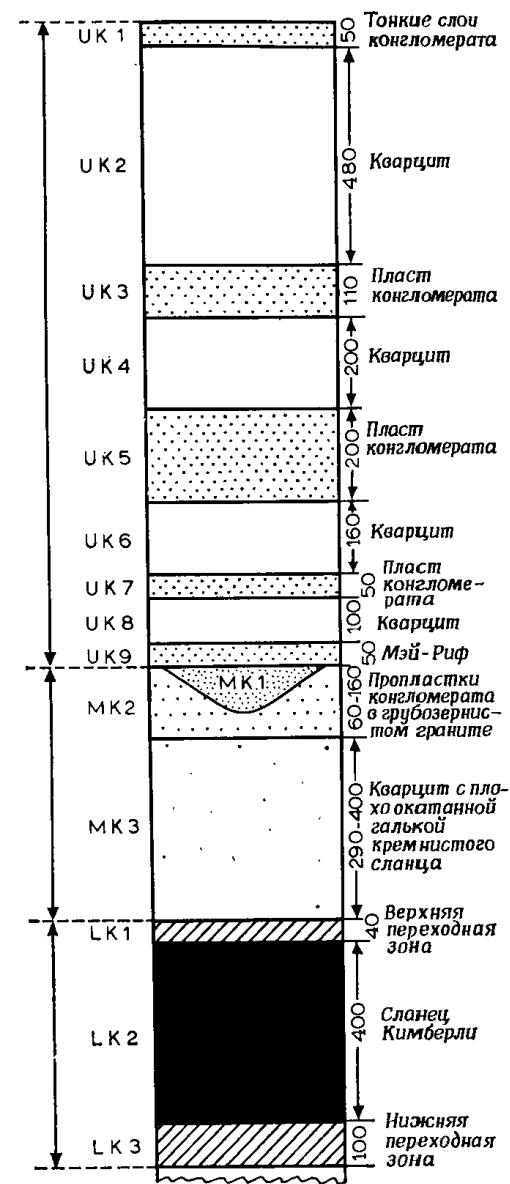
Итак, по способу отложения, переработки и переотложения эти древние гравий и пески поразительно похожи на более новые. Различие только одно, но оно крайне важно: все более молодые пески и гравии состоят главным образом или даже исключительно из кварца, тогда как в этих древних осадочных породах содержатся в больших количествах другие минералы — сульфиды и уранинит, которые в условиях современной атмосферы нестабильны.

Сравнить строение древних и современных песков можно по фото 30 и 31. Первый снимок — шлиф древнего песчаника системы Витватерсранд, возраст более 2 млрд. лет (ср. с фиг. 69). Второй снимок — современный магнетитовый песчаник с побережья к северу от Буэнос-Айреса. Древний песчаник состоит главным образом из пирита, современный — из магнетита; оба минерала имеют сходные удельные массы. Сходство структуры, как мы видим, совершенно очевидно.



Фиг. 72. Стратиграфическая колонка системы Витватерсранд вблизи Йоганнесбурга, Южная Африка [27].

Представлены основные осадочные толщи (черным показаны сланцы, белым — песчаники, пунктиром — конгломераты. Доминион-Риф, образующий основание системы, в данном районе не развит. Мощность указана в футах.



Фиг. 73. Стратиграфическая колонка серии пород Кимберли, входящей в систему Витватерсранд, Южная Африка [27].

Черным и косой штриховкой показаны сланцы, образовавшиеся из глин, белым — кварциты, образовавшиеся из песков, точками — конгломераты, образовавшиеся из гравия. МК1 — русло реки. Различная зернистость осадков, видимо, объясняется в основном изменениями скорости движения коры. Когда движения медленны, эрозия ослаблена, возникают тонкозернистые сланцы. В результате сильных движений коры происходит быстрое поднятие тыловой области складчатости, которая подвергается сильной эрозии, и идет отложение конгломератов. UK1 — UK9 — верхний Кимберли; МК2—МК3 — средний Кимберли; LK1—LK3 — нижний Кимберли.

На фото 32 также показан древний песчаник из системы Витватерсранд. Он состоит в основном из кварца и пирита. Здесь мы тоже замечаем множество зерен сульфида. Пирит наряду с кварцем — важнейший компонент этого песчаника. В верхней части снимка виден переотложенный крупный обломок более древнего песчаника, состоящий почти целиком из пирита. Кроме того, можно различить округлые границы сцементированных зерен пирита, образующих более древний пиритовый песчаник.

Такое вовлечение в новый круговорот старых осадочных пород не является исключением. Об этом свидетельствуют, в частности, подробные седиментологические исследования рифов Кимберли на месторождении золота Ист-Рэнд, проведенные Армстронгом [1]. Он сделал даже вывод, что основная часть породы верхнекимберлийских рифов 9А — продукт эрозии более древних верхнекимберлийских рифов 9В, а те в свою очередь могли произойти из различных пластов среднекимберлийской серии.

На фото 33 виден осадочный ритм, во всех отношениях сравнимый с ритмичностью в отложениях более молодых песков и гравиев. Порода, состоящая почти целиком из зерен кварца, покрыта тонким слоем из зерен пирита и урановой смолки; затем опять следует почти чистый кварцевый песок. Границы кварцевых зерен не видны на фотографии, воспроизведенной типографским способом, но на оригинальной микрофотографии они выступают явно и хорошо видно, что зерна кварца не менее чем в 2 раза превосходят по размеру зерна пирита. Зерна урановой смолки мельче остальных и, кроме того, лучше других минералов отсортированы по размеру.

Зерна уранинита, как видно при большем увеличении, тоже имеют округлую форму, что характерно для кластических зерен, переносившихся с потоками воды и утративших при этом угловатость, присущую исходным кристаллам (фото 34).

Большинство геологов согласны с выводом Рамдора [21], что эти отложения возникли в условиях первичной бескислородной атмосферы, когда не могло идти химическое выветривание сульфидов, уранинита и других подобных минералов, неустойчивых в кислородной атмосфере.

Однако не все геологи принимают этот вывод. Наиболее резкой критике подверг предположения Рамдора покойный проф. Дэвидсон [6, 7]. Но он сам выразительно и кратко изложил аргументы в пользу гипотезы Рамдора: «Я могу лишь сказать, что мы не знаем геологического образования, из которого могли бы произойти россыпи золота, уранинита и пирита без примеси других тяжелых минералов. Если бы кто-нибудь мог предположить, каким образом сингенетически возникли такие отложения в Доминион-Риф, на юго-востоке Финляндии, в Блайнд-Ривер и т. д., — если бы кто-нибудь мог предположить, из какого геологического образования

могли сформироваться сингенетически такие ассоциации, то мы бы сделали большой шаг вперед» [7, стр. 1205]. Но ведь именно это и сделал Рамдор, предположив, что такие золото-урановые месторождения возникли путем осадкообразования в условиях бескислородной атмосферы.

Этим еще раз подчеркивается фундаментальность различия между примитивной и современной атмосферами, различия, о котором я уже много раз говорил и о котором не раз напомню еще. Эти две атмосферы различны как день и ночь. Все мы, привыкшие к современной кислородной атмосфере, лишь с трудом представляем себе те химические, физические и биологические процессы, которые происходили в условиях первичной бескислородной атмосферы.

Вопрос о том, имеют ли руды системы Витватерсранд древнее осадочное происхождение или уран и золото были принесены в эти пласты позже эндогенными растворами, очень важен для дальнейшей разработки руд. Поэтому для его решения привлечены и более тонкие методы, с помощью которых были получены данные, свидетельствующие в пользу первичной осадочной природы этих минералов. Для примера расскажу о двух подходах к проблеме. Изучалось отношение стабильных изотопов серы [8, 17]. В изверженных породах и в залежах серы, образовавшихся из гипогенных растворов, отношение стабильных изотопов серы довольно однообразно для каждой массы породы. Видимо, это объясняется неким процессом фракционирования, шедшим в магме. В осадочных же породах отношение изотопов серы варьирует гораздо сильнее, так как сера, содержащаяся в них, принесена из самых разных источников. Оказалось, что пириты системы Витватерсранд по изотопному составу своей серы попадают в разряд осадочных пород. Разброс значений слишком велик для изверженной породы.

Проводилась, кроме того, оценка возраста отдельных зерен уранинита путем определения количества в них уранинита и свинцового блеска визуальным путем (фото 34) и методом электронного микронзонда. Оказалось, что «возраст» разных зерен сильно различается, чего и следовало ожидать в осадочной породе, представляющей собой смесь зерен изверженных пород разного возраста. Более того, возраст отдельных зерен уранинита, как правило, выше возраста системы Витватерсранд, значит, возможность их образования из более молодых гипогенных растворов исключена.

Итак, хотя здесь невозможно слишком глубоко вдаваться в эту проблему, я думаю, можно считать доказанным, что пиритно-уранитные отложения раннего и среднего докембрия являются осадочными породами, сформировавшимися в бескислородной атмосфере.

### 9. ДАЛЬНЕЙШАЯ ИСТОРИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ ЗОЛОТО-УРАНОВЫХ «РИФОВ»

Этот вывод относится к происхождению описываемых отложений. Но в последующие 2 млрд. лет их истории они подверглись значительным изменениям, затруднившим расшифровку их происхождения.

Одно из этих изменений связано с подвижностью золота. Золото почти наверняка перемещалось в осадочных породах за длительный период их истории. Более того, если не все это золото, то хотя бы часть его могла попасть в породу позже, из гипогенных растворов. Для нашей проблемы неважно, что какой-то участок отдельного рифа случайно обогатился золотом, лишь бы можно было различить особенности первоначального строения породы, но для геолога, ищущего золото, такая случайность очень важна — от нее зависит успех или неудача. Историю золота проследить трудно. Старая поговорка «золото не оставляет следов» оказалась верна и в минералогии. Тем не менее Армстронг в своей уже цитированной работе по седиментологии верхнекемберлийских рифов в месторождении золота Восточный Ранд [1] подчеркивает, что распределение золота очевидно зависит от седиментологических факторов.

Все же попытаться восстановить дальнейшую историю этих месторождений лучше по двум другим минералам — пириту и ураниниту.

Когда породы пропитываются растворами, содержащими серу и железо, исходные обкатанные зерна пирита могут служить центрами кристаллизации. Новая кристаллизация будет идти, конечно, по законам кристаллографии, рост кристаллов будет ограничен плоскими гранями, которые на шлифах выглядят как прямые линии, образующие острые углы. Округлая форма исходных кластических зерен может совершенно исчезнуть, и осадочный характер породы будет замаскирован (фото 35, 36; см. также [26]).

Перенос урана в растворах происходит гораздо менее интенсивно, поэтому исходные зерна уранинита не обрастают новым минералом, как пирит. Впрочем, они тоже изменяются: уранинит соединяется с титаном, содержащимся в породе, образуя минерал браннерит ( $UTi_2O_6$ ). При этом меняется структура зерен, из гомогенной она становится волокнистой, но эти очень мелкие волокна не распадаются, и зерно в целом сохраняет свою округлую форму (фото 37), так что осадочная природа зерен не маскируется.

Итак, интересующие нас отложения имеют длительную (более 2 млрд. лет) и сложную историю. Понятно, почему некоторые минералоги, занимающиеся рудными месторождениями, до сих пор все еще продолжают спорить о деталях возникновения и истории этих отложений.

### 10. ВОЗРАСТ ЗОЛОТО-УРАНОВЫХ «РИФОВ», ВОЗНИКШИХ В УСЛОВИЯХ БЕСКИСЛОРОДНОЙ АТМОСФЕРЫ

В гл. III я уже объяснял, почему методы определения абсолютного возраста не могут применяться непосредственно для определения возраста осадочных пород. Данные по возрасту этих пород, сообщаемые в литературе, следует считать лишь приближенными (табл. 17).

Таблица 17

Приблизительный возраст золото-урановых  
«рифов», образовавшихся в условиях  
бескислородной атмосферы

Золото-урановые «рифы»	Возраст, млн. лет	Источник данных
Блайнд-Ривер, Онтарио, Канада	1800	[9]
Витватерсранд, Южная Африка	2000—3000	[3]
Доминион-Риф, Южная Африка	3000	[14]

Но мы видели, что в исключительных случаях определить абсолютный возраст осадочных пород все же возможно. Для этого необходимо, чтобы в состав породы входил минерал, образовавшийся во время седиментации (аутигенный минерал) и содержащий радиоактивный элемент. Так, возраст разных минералов урановой руды из Блайнд-Ривер (Онтарио, Канада), как оказалось, различен [9]. Вместо того чтобы определять содержание урана и свинца в образце в целом (так называемое датирование по монолиту), сначала выделяют из породы зерна разных минералов, а потом отдельно определяют возраст этих минералов.

В песках и гравии содержатся зерна минералов монацита и циркона, которые, как известно, возникли при эрозии изверженных пород. Абсолютный возраст этих минералов составляет около 2,5 млрд. лет, но он не имеет ничего общего с возрастом всей породы. Это время, отделяющее нас от периода кристаллизации более древних гранитов, т. е. от тех времен, когда эти граниты интродуцировали в кору и застыли.

В отложениях Блайнд-Ривер встречаются некоторые вторичные урановые минералы типа браннерита, описанного в системе Витватерсранд. Считается, что хотя бы некоторые из этих минералов образовались во время седиментации. Аутигенные минералы могут рассказать о возрасте осадочной породы. Правда, в дальнейшем, очевидно, происходила перекристаллизация, причем уран и



свинец могли теряться. Возраст зерен различных урановых минералов колеблется от 1680 до 2000 млн. лет. Дерри [9] предполагает, что некоторые минералы теряли уран, отчего определяемое значение их возраста завышено, а другие теряли свинец, становясь, напротив, хронологически «моложе». Дерри оценивает возраст отложений Блайнд-Ривер в 1,8 млрд. лет.

Однако, судя по их геологическому положению в нижнем гуроне, их возраст может быть и гораздо больше — примерно до 2,4 млрд. лет (см. табл. 18, в которой Блайнд-Ривер ориентировочно коррелируется с Покегама из нижних пластов среднего докембрия). В этом случае граниты возраста 2,5 млрд. лет интродировали сюда во время альгомского горообразования. Оно приурочено к границе между ранним и средним докембрием: его возраст оценивается в 2,5 млрд. лет. Пески и гравии отложений Блайнд-Ривер, образующие основную посторогенную серию среднего докембрия, состоят из продуктов эрозии этого пояса складчатости, и их возраст не должен сильно отличаться от возраста самого горообразования.

На примере Блайнд-Ривер мы видели, почему датировки таких древних осадочных пород надо считать лишь весьма приближенными. Точно такая же неопределенность характерна и для других сходных отложений древних щитов.

Потребуется еще провести множество анализов и усовершенствовать наши методы исследования, прежде чем мы сможем уточнить предполагаемый возраст этих отложений. Сейчас, во всяком случае, считается, что этим осадочным породам, сформировавшимся в условиях бескислородной атмосферы, около 2 млрд. лет. Учитывая приближенность наших определений, примем, что их возраст составляет около 1,8 млрд. лет.

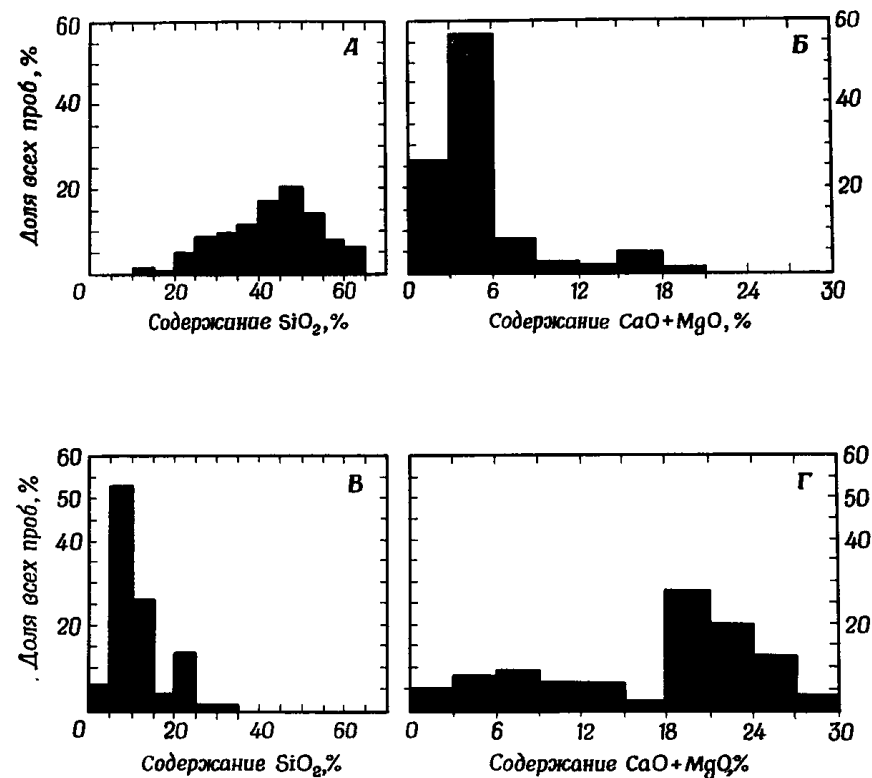
#### 11. ДОКЕМБРИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ФОРМАЦИИ

В последние годы в качестве возможного индикатора отсутствия кислорода в атмосфере стали использовать также осадочные породы другого типа, а именно докембрийские железорудные формации. Как и рассмотренные нами докембрийские золото-урановые «риффы», железорудные формации имеют экономическое значение.

Железорудные формации — это сформировавшиеся на поверхности отложения железа, всегда приуроченные к осадочным породам. Существуют и другие месторождения железа в виде рудных жил, разрабатываемых сейчас или уже исчерпанных. Такие месторождения возникли путем осаждения железа из растворов, поднявшихся с глубины, — так называемых *гипогенных растворов*. Почти все месторождения железа, имевшие экономическое значение в ранние периоды истории цивилизации и в средние века, были именно такими месторождениями. Содержание железа в них часто

очень высоко, а это как раз было очень важно при неразвитой технологии выплавки. В осадочных железорудных формациях содержание железа обычно ниже, в среднем менее 30%.

Сейчас добыча железа из рудных жил продолжается только в области Зигерланд, ФРГ. В других районах почти вся добыча железа сосредоточена в осадочных месторождениях. Их недостаток —



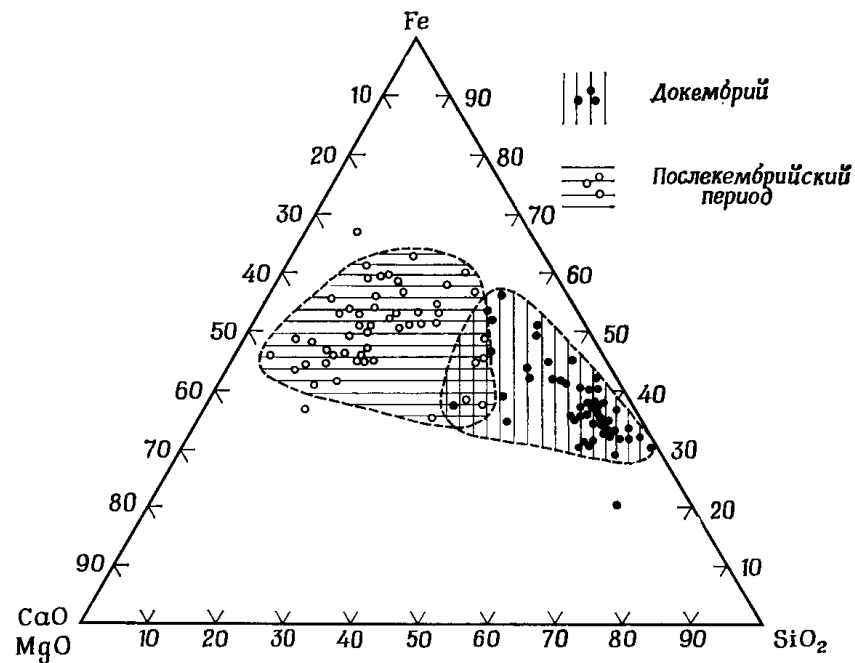
Фиг. 74. Распространенность  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO} + \text{MgO}$  в докембрийских (вверху) и более молодых (внизу) железорудных формациях.

А — 354 анализа; Б — 124 анализа; В — 70 анализов; Г — 64 анализа.

сравнительно низкое содержание железа — в наши дни перевешивается большим преимуществом — их значительным объемом. Но различие по богатству руды еще сохраняется кое-где в названиях. В Лоррене (Франция) осадочные железорудные формации издавна называются «minette», т. е. руды, невыгодные для разработки<sup>1</sup>. Породы североамериканских докембрийских железорудных формаций долго считались весьма убогим материалом, непригодным

<sup>1</sup> От mine (франц.) — рудник, рудная жила. Уменьшительный суффикс имеет здесь пренебрежительное значение. — Прим. перев.

для добычи железа. Минеттовые руды стали разрабатываться лишь после того, как была изобретена доменная печь, а североамериканским отложениям пришлось подождать развития современных способов обогащения руд<sup>1</sup>.



Фиг. 75. Содержание FeO, SiO<sub>2</sub> и CaO + MgO в докембрийских и более молодых железорудных формациях [19].

Докембрийские железорудные формации по своему составу явно отличаются от молодых; совпадения встречаются лишь изредка (небольшое перекрытие на рисунке). Существуют небольшие, но заметные различия и в содержании других веществ. В докембрийских железорудных формациях гораздо меньше Al, P и Ti, но больше Mn; так, в древних формациях содержится всего 1,6% Al (в молодых — 6,1%), 0,26% P (в молодых — 0,86%); 0,15% Ti (в молодых — 0,45%) и 1% Mn (в молодых — 0,34%).

Обычно докембрийские железорудные формации представлены очень тонкими пластами; богатые железом пласты перемежаются с бедными или совсем не содержащими железа. В противоположность более молодым минеттам при возникновении таких формаций смена условий происходила настолько быстро и отдельные слои так тонки, что их называют пластинами (фото 38).

Но это не единственное различие между более молодыми и докембрийскими железорудными формациями. Между ними есть гораздо более существенное различие: первые всегда связаны с

<sup>1</sup> Мы, конечно, оставляем в стороне железные руды с более высоким содержанием Fe (до 60%), которые до недавнего времени составляли основную часть разрабатываемых железных руд. Они постепенно образовались из осадочных полосчатых железорудных формаций в результате процессов окисления и обогащения.

карбонатом, главным образом с CaCO<sub>3</sub>, а вторые — с кремнистым сланцем, т. е. с очень мелкозернистыми кремнистыми породами. Эти последние встречаются и в более молодых железорудных формациях, но их происхождение здесь всегда вторично — кремнезем заместил содержащийся здесь ранее карбонат.

Все молодые железорудные формации с преобладанием известняка сейчас классифицируются как формации «типа минетт», а докембрийские, кремнистые, относят к «типу формации Верхнего озера» независимо от того, где они находятся. Различия в составе пород этих двух типов видны из фиг. 74 и 75.

В докембрийских железорудных формациях железо содержится главным образом в виде первичных минералов — сидерита (FeCO<sub>3</sub>), пирита (FeS), магнетита (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) и силикатов железа. Есть в этих породах и самая окисленная форма железа — гематит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), но неизвестно, какая часть гематита присутствовала здесь с самого начала и сколько его появилось позже, в результате окисления. Но считается, что большая часть гематита возникла при последующем окислении магнетита, хотя какое-то небольшое его количество, видимо, присутствовало в породе первоначально.

Сравнивая эту ситуацию с тем, что наблюдается для докембрийских золото-урановых «риффов», мы видим, что различие между докембрийскими и более молодыми железорудными формациями выражено не так резко, как в случае риффов. Мы находим в древних песчаниках только восстановленное железо в форме пирита, а в более молодых — только окисленное, например гематит.

Но в железорудных формациях, каков бы ни был их возраст, мы всегда находим окисленное железо. Правда, в отложениях докембрия встречается магнетит — менее окисленная форма, а в более поздних — гематит, полностью окисленная форма, но главное различие между ранними и поздними железорудными формациями связано не с минералами железа, а с сопровождающими минералами: в древних отложениях это кремнезем, в более поздних — карбонат.

Итак, различные осадочные породы докембрия отличаются от более поздних, однако их различие между собой не связано с возрастом. Как явствует из данных, приведенных в табл. 18, в позднем и среднем докембрии возникали и золото-урановые «риффы», и кремнистые железорудные формации. Мы вернемся к этому различию в одном из следующих разделов, обсуждая происхождение железорудных формаций.

Возвращаясь к докембрийским железорудным формациям, отметим, что основные сведения о них получены для Северной Америки. Здесь, в Канаде и на севере США, интенсивно изучались железорудные формации Канадского щита. Но и на других древних щитах встречаются подобные формации. Местные наименования этих пород, такие, как таконит и итабирит, широко употребля-

Стратиграфическое строение и хронология докембрия Миннесоты<sup>1</sup> [12]

Эра	Группа	Формация	Характерные процессы
Палеозойская			
600 млн. лет		<i>Несогласие</i> -----	
		Песчаники Хинкли	
		Песчаники Фондю-Лак	
Позднедокембрийская		<i>Несогласие</i> -----	
	Вулканическая группа Норт-Шор	Нерасчлененные лавы, туфы и осадки	Вулканическая деятельность Кивино (1000—1200 млн. лет)
		Конгломерат Паквандрж (?)	
		<i>Несогласие</i> -----	
		Кварциты Спукс (?)	
1800 млн. лет		<i>Несогласие</i> -----	
		Рэббит-Лейк = =Виргиния = = Роув = Томсон	Пинокинское горообразование (1600—1900 млн. лет)
Среднедокембрийская	Анимики	Троммалд = Бивабик = Ганфлинт	
		Маномен = Покегама = Какабека	
2600 млн. лет		<i>Несогласие</i> -----	
	Найф-Лейк	Нерасчлененные сланцы, граувакки, конгломераты, туфы, лавы	Альгомское горообразование (2400—2750 млн. лет)

<sup>1</sup> В Миннесоте найдены три основные железорудные формации. Это (в порядке приближения к нашим дням) Соуден, Эгейва (в средней части серии Найф-Лейк) и Бивабик (или Ганфлинт). Золото-урановые «риффы» Блайнд-Ривер (Онтарио), относящиеся по местной стратиграфии к нижнему гурону, примерно соответствуют по возрасту кварциту Покегама из Миннесоты. Горообразование Кивино (местный миннесотский термин) можно соотнести с канадским гренвиллским горообразованием (фиг. 99).

Продолжение табл. 18

Эра	Группа	Формация	Характерные процессы
Раннедокембрийская		<i>Несогласие</i> -----	Лаврентьевское горообразование (возраст?)
		Железорудная формация Соуден	
	Киватин	Измененные зеленокаменные породы	
	Коучичинг (?)	Метаосадочные породы (?)	
		Более древние породы (?)	(3300—3550 млн. лет)

ются в геологической литературе. Как и в случае докембрийских золото-урановых «риффов», между докембрийскими железорудными формациями разных древних щитов существует поразительное сходство, можно даже сказать — совпадение. Более того, докембрийские железорудные формации резко отличаются от более молодых. Следовательно, мы вправе взять наиболее изученные железорудные формации Канадского щита в качестве примера всех этих докембрийских пород. Карта (фиг. 76) показывает распределение железорудных формаций Канадского щита. Их стратиграфическое положение указано в табл. 18.

## 12. ПИРИТОВЫЕ ПЕСКИ И ДОКЕМБРИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ФОРМАЦИИ

Итак, осадочные породы, возникшие примерно одновременно, а значит, в одинаковых атмосферных условиях, окислены в разной степени. Для того чтобы разобраться в этом противоречии, рассмотрим более подробно различия между кислородной и бескислородной атмосферами и между историей пиритовых песков и железорудных формаций.

Мы должны дать более строгое определение термину «бескислородный». Это не обязательно означает «абсолютно лишенный даже следов свободного кислорода». «Бескислородный» означает лишь «с небольшим содержанием кислорода, недостаточным для существования современной нам жизни и для хода знакомых нам процессов выветривания». Аналогичные определения приложимы ко всем случаям преимущественно количественных различий. Скажем, различие между тьмой и светом кажется предельно четким.



ры как такой атмосферы, в которой содержание кислорода не превышало 1% современного уровня. Пуристы предпочли бы термин «малокислородная» [18], но я думаю, что это ненужное усложнение.

Таким образом, даже в самой древней атмосфере всегда имелось какое-то количество свободного кислорода. Зная это, мы можем теперь понять различие в истории пиритовых песков и железорудных формаций. Вспомним описанный в гл. X цикл горообразования. Пиритовые пески отлагались во время посторогенных периодов, а железорудные формации возникали в геосинклинальные периоды следующих друг за другом циклов горообразования в раннем и среднем докембрии. В посторогенном периоде вертикальные перемещения коры, устраняющие неравновесие, возникшее при горообразовании, проявляются довольно сильно; сравнительно быстро идут эрозия, перенос и осадконакопление. Образуются главным образом грубозернистые осадки — пески и гравий. В геосинклинальный период движения коры, особенно вне геосинклинальных поясов, незначительны. Выветривание, эрозия, перенос и осадкообразование замедляются, и образуются тонкозернистые осадочные породы, такие, как сланцы и хемогенные отложения.

Выше уже говорилось о том, что выветривание минералов и пород в бескислородной атмосфере шло совершенно иначе, чем в кислородной. В последнем случае преобладает химическое выветривание, а в первом — физическое. Хороший пример физического выветривания — процессы, приведшие к образованию пиритовых песков раннего и среднего докембрия. Но преобладание определенного типа выветривания не абсолютно: в необычных условиях это правило может нарушаться. Мы уже говорили о том, что в суровых климатических условиях Арктики или в жарких пустынях, где слишком холодно или слишком мало влаги для активного течения химических реакций, физическое выветривание и сейчас преобладает над химическим. Обратная ситуация могла складываться в бескислородной атмосфере в те периоды, когда движения коры были столь незначительными, что материка стачивались эрозией до уровня моря и эрозия прекращалась. Тогда химическое выветривание начинало преобладать над физическим даже в бескислородной атмосфере. Химическое выветривание сводилось главным образом к выщелачиванию, причем оставшийся нерастворимый остаток не подвергался переносу из-за выровненности ландшафта, которая отнюдь не благоприятствует стоку. Растворимые вещества в отличие от зерен породы все же переносятся водой и в этих условиях. Поэтому химическое осаждение преобладает над физическим.

Следовательно, в геосинклинальный период каждого орогенического цикла, когда материка сглаживались до уровня моря, цикл

выветривание — перенос — осадкообразование сильно замедлялся по сравнению с посторогенными периодами и, кроме того, материал дольше и теснее контактировал с атмосферой. Поскольку атмосфера никогда не была совершенно лишена свободного кислорода, в такие периоды неполностью окисленные окислы могли возникать и в условиях «бескислородной» атмосферы. Одновременно в результате действия не совсем еще понятных химических механизмов осаждались железосодержащие силикаты вместо карбонатов, формирующихся в условиях кислородной атмосферы.

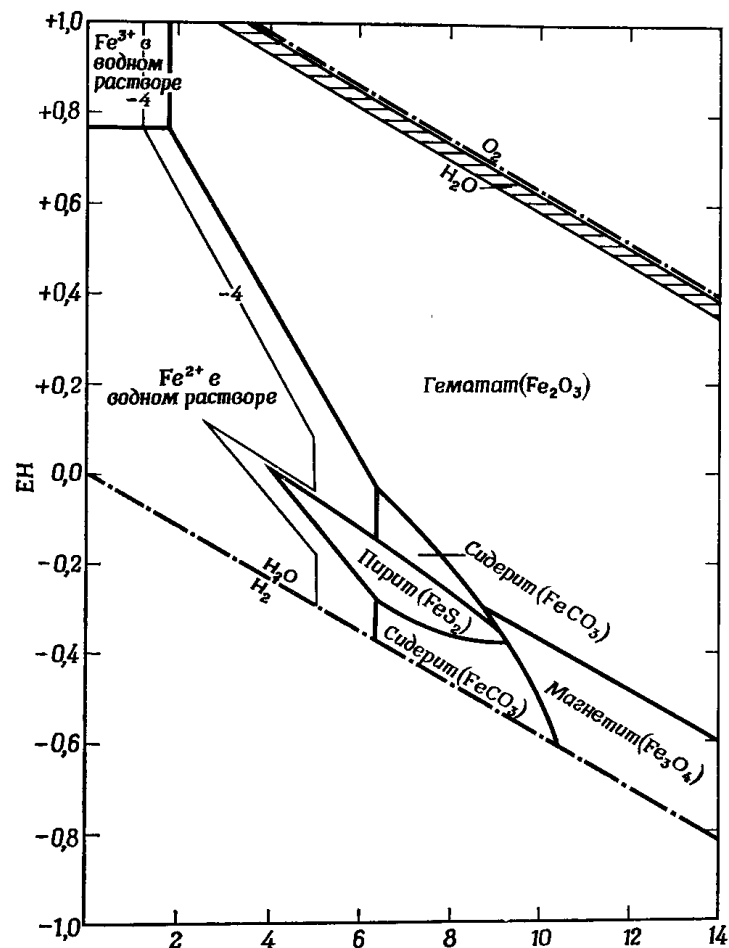
Таким образом, результат процессов выветривания, эрозии, переноса и отложения зависит не только от процентного содержания свободного кислорода в атмосфере, но и от скорости и интенсивности самих этих процессов. Если их скорость нормальна, то в условиях кислородной атмосферы образуются полностью окисленные вещества, а в условиях бескислородной — неокисленные. Если скорость этих процессов велика, то даже в условиях кислородной атмосферы могут отлагаться неокисленные вещества. Если же, напротив, эти процессы идут медленно, то вовлеченные в них вещества могут успеть окислиться даже в условиях бескислородной атмосферы. Итак, природа осадочных пород, формирующихся в условиях той или иной атмосферы, зависит от баланса между скоростью окисления при данном уровне содержания свободного кислорода в атмосфере и скоростью экзогенных процессов, в результате которых образуются эти породы.

Сейчас мы не можем представить себе, как выглядел этот баланс в разные периоды геологической истории. Во-первых, нам неизвестна абсолютная скорость экзогенных процессов в посторогенный или в геосинклинальный период. Очевидно, скорость эта варьировала, но данных для ее оценки нет. Во-вторых, мы не имеем представления и о скорости окисления при разном содержании кислорода в атмосфере.

Заметим, кстати, что геохимики интересуются почти исключительно конечным равновесием, достигнутым в реакциях минеральных веществ, но не кинетикой этих реакций. Поэтому обычные выводы геохимии неприложимы к нашей проблеме: нас интересует баланс между скоростями нескольких не зависящих друг от друга процессов.

К этому вопросу мы вернемся в следующей главе, но уже сейчас можно сделать некоторые выводы. Окислительный потенциал свободного кислорода (но не скорость окисления) так высок, что если экстраполировать термодинамические уравнения на атмосферу, совершенно лишенную кислорода, то мы получим бессмысленный вывод, который сводится к следующему: будь в земной атмосфере хотя бы один атом кислорода, его существование было бы эфемерным. Это видно и по диаграмме равновесия системы железо — вода — кислород (фиг. 77). Анализ диаграммы показывает,

что переход от современной атмосферы к атмосфере, содержащей в 100 раз меньше кислорода, ненамного изменяет положение вещей. Но мы видели, что осадочные породы, сформировавшиеся в условиях первичной атмосферы, сильно отличаются от более поздних. Следовательно, аргументы в пользу существования первичной



Фиг. 77. Устойчивость окислов, карбонатов, сульфидов и силикатов железа при температуре 25°С и общем давлении 1 атм в присутствии воды [40].  
Общая сера  $10^{-6}$ . Заштрихованная область в верхней части рисунка показывает изменение для  $H_2O$  и  $O_2$  при переходе от современного содержания кислорода, PAL (верхняя линия), к одной десятой этого уровня, 0,1 PAL (нижняя линия). Такое изменение практически не влияет на гематит.

атмосферы должны основываться не на равновесиях реакций (равновесие, по-видимому, не может быть достигнуто в реакциях минералов со свободным кислородом), а на их кинетике.

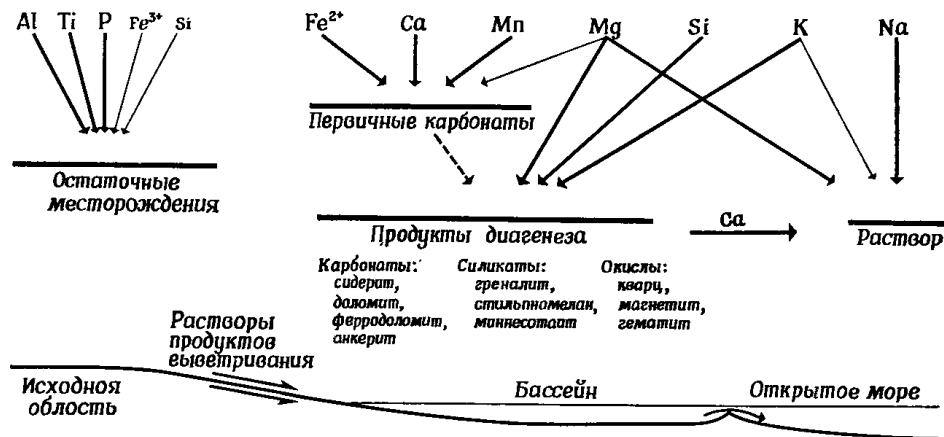
### 13. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДОКЕМБРИЙСКИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ФОРМАЦИЙ

Авторы, изучавшие железорудные формации типа формации Верхнего озера, конечно, расходятся во мнении о подробностях образования этих отложений. Но существуют и некоторые общепринятые заключения об условиях возникновения таких формаций. Материал этих осадков, вероятно, сносился с материков, рельеф которых находился в стадии зрелости, т. е. характеризовавшихся обширными низменностями, без выраженных горных хребтов. Материал, из которого сложились железорудные формации, выщелачивался на низменностях и затем сносился и осаждался в больших озерах или мелководных морях.

Этот тип выветривания — выщелачивание на плоских обширных низменностях — сходен с тем выветриванием, в результате которого сейчас создаются латеритные почвы. В современных латеритных почвах под зоной выщелачивания лежит так называемая зона цементации, в которой под влиянием рельефа и других факторов внешней среды могут накапливаться элементы, вымытые из верхних слоев. Так могут создаваться железо-латеритные и алюминиево-латеритные (бокситовые) отложения, имеющие экономическое значение и часто называемые латеритами (или латеритами в узком смысле слова). Но нас сейчас интересует активное латеритное выветривание, выщелачивание верхних слоев [11]. В ходе дальнейшей эрозии материков оно продвигается глубже и захватывает, наконец, лежащие ниже зоны цементации, имеющие, таким образом, временный характер.

Латеритное выветривание развивается в тропических и субтропических климатах, как правило там, где есть смена засушливого и дождливого сезонов. Кроме дождевой воды, важным фактором выщелачивания является сейчас гуминовая кислота, продукт разложения растительных остатков. В результате такого выветривания образуются латеритные почвы. Здесь важно вспомнить, что в железорудных формациях часто встречаются тонкие прослой графита [19]. Как мы узнаем из гл. XV и XVI, в раннем и среднем докембрии, в условиях бескислородной атмосферы, на суше не могла существовать никакая, даже самая примитивная растительность, так как атмосфера не задерживала жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца, губительное для всякой жизни. С другой стороны, это же излучение, как нам уже известно, способствовало неорганическому синтезу «органических» молекул, а для выветривания безразлично, каким путем образовались органические кислоты — биогенным или абиогенным. Присутствие графита в железорудных формациях свидетельствует о некотором сходстве между докембрийским выветриванием, происходившим на этих огромных плоских низменностях, и современным латеритным выветриванием.

Лепп и Голдич [49] предложили следующее объяснение механизма отложения железорудных формаций. В результате выветривания растворы, содержащие железо, кремний, кальций и натрий, переносились в море, а другие элементы, особенно алюминий и фосфор, оставались в районе выветривания в виде нерастворимого остатка. В условиях бескислородной атмосферы кремний и



Фиг. 78. Схема латеритного выветривания на материковой низменности и образования железорудной формации в мелководном море в условиях бескислородной атмосферы.

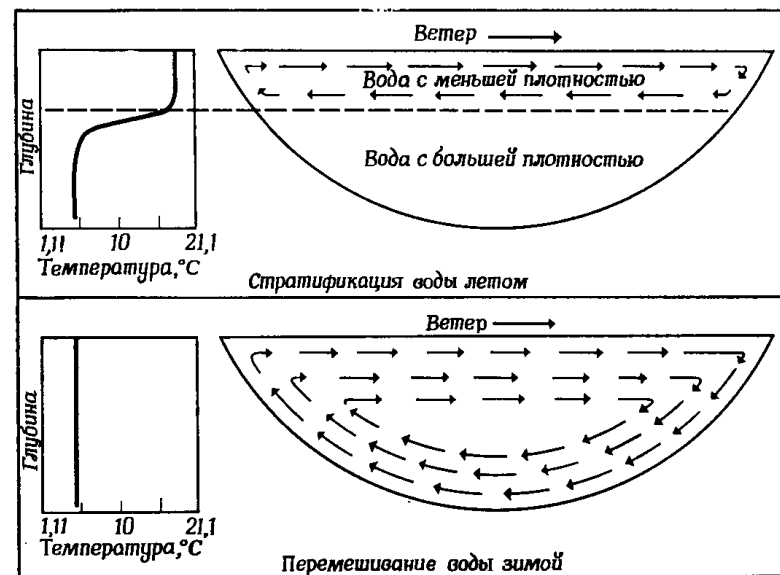
Толстые стрелки — устойчивые остаточные образования и отложения, тонкие стрелки — перенос. Al, Ti и P остаются в виде остаточных месторождений в исходном районе. В осадочном бассейне формируются разные промежуточные продукты, но в конце концов Ca, Mg, K и Na выносятся в открытое море, а Fe и Si отлагаются в бассейне.

железо должны были осаждаться примерно в одних и тех же районах, а кальций, магний и натрий выносились в открытое море (фиг. 78). В условиях кислородной атмосферы совместно должны осаждаться железо и кальций, а кремний и натрий сносятся в море.

Но эта простая гипотеза не объясняет, однако, появления слоистости, чрезвычайно тонких чередующихся прослоек железосодержащих минералов и кремнистого сланца, столь типичных для многих докембрийских железорудных формаций. Такая структура могла возникнуть в том случае, если отложение шло не в мелководных морях или лагунах, а в больших, сравнительно глубоких озерах [16]. В таких изолированных водных массах (фиг. 79) существует сезонный цикл интенсивности перемешивания воды. Видимо, слоистость, характерная для железорудных формаций, может быть связана с тем, что в разные сезоны осаднение шло по-разному, в зависимости от перемешивания.

Озера, в которых период перемешивания составляет 1 год, называются *мономикстными*, а те, в которых этот период равен по-

лугоду, т. е. перемешивающиеся дважды в год, — *димикстными*. Димикстные озера встречаются сейчас только в умеренной зоне и севернее, где сильно влияние смены сезонов и зимнего замерзания водоемов. Мономикстные озера находятся в субтропиках и в теплых районах умеренной зоны. Для нашей проблемы в общем неважно, сколько раз в год складываются условия, благоприятные



Фиг. 79. Схема циркуляции воды в глубоких озерах так называемого мономикстного типа, распространенных в субтропиках и в теплом климате.

для перемешивания, однако, поскольку во время образования докембрийских железорудных формаций в районах их образования, по-видимому, воздействие по-настоящему холодного климата можно исключить, нам больше подходит мономикстный тип.

В мономикстных озерах летом сильно выражена стратификация — разделение на верхний слой теплой и легкой воды (*эпилимнион*) и нижний, холодный слой — *гиполимнион*. Температура воды в гиполимнионе может составлять около 4°С — это температура, при которой пресная вода обладает максимальной плотностью. Зимой поверхностная вода, охлаждаясь ниже 4°С, приобретает плотность, примерно равную плотности глубинной воды, и течения, возникающие под действием ветра и волн, перемешивают воды озера на всю его глубину.

Летом верхние слои воды хорошо аэрируются и насыщаются кислородом, а в глубинной, застойной воде весь кислород быстро расходуется на разложение опускающихся сверху органических (а в далекие геологические эпохи — «органических») веществ, и

в этом слое царят восстановительные условия. Зимой, когда стратификация исчезает, хорошо аэрируется вся водная масса. Вспомним теперь, что при восстановительных условиях железо растворяется гораздо лучше, чем при окислительных. Растворимость железа определяется целым рядом факторов, но в восстановительных условиях она может увеличиться более чем в 100 000 раз по сравнению с окислительными условиями [16].

Как только благодаря циркуляции глубинные слои воды начинают насыщаться кислородом, железо выпадет в осадок. Эта реакция начинается уже при невысокой концентрации кислорода. Выделяющийся нерастворимый осадок железа сравнительно тяжел. Он слабо вовлекается в циркуляцию озерной воды и довольно быстро опускается на дно.

Глубинный слой воды пресноводного озера — гипolimнион — будет, таким образом, служить как бы ловушкой для всего растворенного железа, приносимого в озеро. И что очень важно — отложение железа будет идти не постоянно в течение всего года, а будет иметь сезонный характер. Поведение кремния мало изучено, но вполне вероятно, что этот элемент будет отлагаться поочередно с железом.

На основе этих идей была разработана несколько более сложная гипотеза, в детали которой мы не можем здесь вдаваться [13]. Нам важно, что для осаждения окисленного железа при перемешивании воды в глубоком озере достаточно уже очень небольшого количества кислорода. Теперь понятно, каким образом в сходных атмосферных условиях могли возникать железорудные формации, в которых железо частично окислено, и пиритовые пески, в которых железо восстановлено. Первые сформировались в результате химического цикла выветривание — перенос — осаждение, в котором преобладало выщелачивание исходных пород и химическое осаждение в осадочных бассейнах, а вторые — в условиях преобладания физических процессов: физического выветривания, быстрого переноса в осадочный бассейн и механического осадкообразования.

Наконец, вспомним, что докембрийские полосчатые железорудные формации отличаются от всех более новых. Это различие не только внешнее, оно связано и со способом образования. Молодые железорудные формации никогда не бывают слоистыми; к ним всегда приурочены только морские формы ископаемых остатков. Следовательно, они сформировались не в озерах. Стратификация воды, сезонный ритм перемешивания, от которого, по-видимому, зависело образование полосчатых железорудных формаций — все эти процессы характерны сейчас только для озер, но не для моря.

Еще один аспект генезиса полосчатых железорудных формаций — возможность участия биохимических реакций в образовании кремнистых сланцев. Как мы узнаем из следующей главы,

считается, что большая часть фанерозойских кремнистых сланцев возникла именно во время отложения данного пласта, а не позднее, в результате диагенеза, как думали раньше. Теперь полагают, что кремнистые сланцы образовались на морском дне, непосредственно или в результате окремнения уже существовавших отложений. Из предыдущей главы мы знаем, что в полосчатых железорудных формациях среднего, а может быть, и раннего докембрия встречаются органические остатки. Более того, не раз отмечалось наличие в этих породах графита, иногда даже в макроскопических количествах. Это может свидетельствовать об участии биохимических процессов в отложении кремнистого сланца полосчатых железорудных формаций. С другой стороны, мы уже не раз говорили, что преджизнь могла в период образования этих формаций сосуществовать с ранней жизнью (гл. XII, разд. 12 и гл. XVIII, разд. 2). В таком случае трудно сказать, участвовали ли в образовании кремнистых сланцев органические или «органические» соединения (или же и те и другие вместе). Иными словами, неясно, какие происходили при этом процессы — биохимические или чисто неорганические, и получить однозначный ответ на этот вопрос пока невозможно.

#### 14. МОРСКИЕ ИЛИ НАЗЕМНЫЕ (ПРЕСНОВОДНЫЕ)?

Один из главнейших признаков любой местности — лежит она ниже или выше уровня моря. Поскольку различия между озерами и морями важны для понимания истории докембрийских железорудных формаций, нам надо ближе с ними познакомиться. В общем можно выделить морскую и континентальную среду.

Моря мы разделяем на окраинные и средиземные. Последние делятся на соленые и солоноватоводные в зависимости от того, каков баланс между поступлением пресной воды с дождем или реками с одной стороны и испарением — с другой. В окраинном море важна глубина. Мы можем наметить четыре зоны: 1) океаны с глубинами от 200 м до 10 км; 2) мелкие моря, обычно называемые шельфовыми, с глубиной менее 200 м; 3) верхние слои этих морей (от уровня отлива до 50 м), составляющие зону фототрофных организмов (здесь за счет проникающего сюда солнечного света идет органический фотосинтез); 4) последняя зона — приливно-отливная, или литораль (от уровня воды во время прилива до уровня воды во время отлива).

Для сухопутных районов самыми важными факторами являются высота над уровнем моря и климат. Геологов, впрочем, высота не очень интересует: ведь все возвышенности подвергаются эрозии и постепенно исчезают с лица Земли.

Поэтому в геологической летописи, как правило, сохраняются только указания об условиях, существовавших в низменностях.



Во влажном климате развиваются марши, болота, крупные и мелкие озера. Такой ландшафт называется озерным. Его противоположность — равнинная пустыня.

Геологи отличают древнее дно моря от озерного ландшафта по ископаемым остаткам. Чаще всего определенные группы растений и животных тесно связаны с морскими или озерными условиями существования. Но когда речь идет о серии пород, не содержащей ископаемых остатков, обычно не удается определить, отлагалась она в море или в пресноводном бассейне. И тут не помогают все наши знания, накопленные при изучении осадочных пород. Не существует безошибочных седиментологических критериев, позволяющих отличать морские осадки от пресноводных.

Но для выявления материковых ландшафтов такой критерий есть: это ископаемые почвы, или палеопочвы (конечно, в тех случаях, когда их удастся найти). Наиболее известные палеопочвы — это так называемые *горизонты стигмариев*, или подстилающие глины, они же — породы, подстилающие угольные пласты. Их находят под пластами угля в материковых угленосных сериях. В этих горизонтах встречаются так называемые стигмарины, корни древовидных растений, живших в болоте. Кроме того, породы эти имеют однородное строение, т. е. они утратили свою первичную стратификацию. Но при изучении условий среды, в которой отлагались осадки докембрия, эти образования не могут нам помочь. Ведь в докембрии еще не было растений с корнями. Неприменим тут и второй критерий — однородность палеопочв, так как она образовалась в результате деятельности роющей почвенной фауны, уничтожающей первичную стратификацию [25], а такой фауны в раннем и среднем докембрии тоже не было.

Для иллюстрации затруднений, связанных с проблемой распознавания морского или озерного происхождения осадочных пород, расскажем о работе по палеобиологии сланцев Нансач, проведенной Баргхоорном и сотр. [2]. Они сделали вывод, что эти сланцы отлагались в мелководном бассейне, в районе речной дельты, вблизи морской береговой линии. Но им не удалось определить, по какую сторону береговой линии шла седиментация, т. е. происходила ли она в пресной воде или в морской. Причина неудачи — а ведь вопрос этот для палеобиологии имеет первостепенную важность! — отсутствие надежных критериев.

Кроме стигмариев мы располагаем и другими критериями для распознавания палеопочв. Они связаны с выщелачиванием или накоплением некоторых элементов во время почвообразования. Эти явления хорошо знакомы почвоведом, занимающимся современными почвами, но приложение данных почвоведения к палеопочвам пока только начинается. Мне кажется, что вопрос этот очень интересен. Мы находимся сейчас в отношении геохимии докембрийских осадочных пород в досадном положении полных невежд. На-

пример, до сих пор невозможно узнать, в каком окружении возникли массивные отложения водорослевых известняков докембрия — в морском или в пресноводном. А может быть, здесь два типа отложений?

## 15. ВОЗРАСТ ДОКЕМБРИЙСКИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ФОРМАЦИЙ

Датировки докембрийских железорудных формаций страдают неточностью, и это естественно: аутигенные минералы этих осадочных пород, окислы железа и кремнезем, не заключали в себе в момент своего образования радиоактивных элементов. Возраст этих формаций, не содержащих к тому же руководящих ископаемых, оценивается лишь относительно: «моложе подстилающих изверженных пород» и «древнее внедренных интрузий».

Чтобы получить представление об абсолютном возрасте этих отложений, Лепп и Голдич [19] опираются на несколько датировок (по монолиту) для сланцев, переслаивающих железорудную породу. Идея метода состоит в том, что при образовании таких тонкозернистых пород кластические зерна, содержавшие родительские и дочерние элементы, образовавшиеся при радиоактивном распаде, протекавшем ранее, уносились водой и откладывались в другом месте. Если это так, то анализ монолита может дать величины, приближающиеся к возрасту этой тонкозернистой осадочной породы.

Такие методы датирования имеют значение в тех случаях, когда перед нами стоит задача соотнести период образования данной железорудной формации с другими породами этой части древнего щита или со всем древним щитом, чтобы облегчить поиски новых обнажений данной железной руды. Их, видимо, нельзя применить для сопоставления железорудных формаций из разных древних щитов, поэтому они используются главным образом в работах с горнопромышленным уклоном.

Нас интересует не столько точный возраст данной железорудной формации, сколько период, в который на Земле возникали железорудные формации типа формации Верхнего озера. Как первое приближение мы можем поэтому использовать хорошо известные датировки интрузивных пород, окружающих осадочные серии. Это, как правило, позволяет ограничить интересующий нас период возрастом предыдущего и последующего горообразований.

Из данных, приведенных в табл. 18, мы видим, что в докембрийских породах Миннесоты (Канадский щит) железорудные формации встречаются в раннем и среднем докембрии; их возраст колеблется от 1,8 млрд. лет до более 2,5 млрд. лет. В сериях моложе пинокинского (а также гренилльского) горообразования не найдено типичных полосчатых железорудных формаций.

Данные по возрасту докембрийских железорудных формаций всего мира, собранные в табл. 19 [13], также подтверждают выводы, сделанные на материале Миннесоты. Как явствует из этих данных, самым древним из полосчатых железорудных формаций более 3 млрд. лет. Правда, мне кажется, что не все эти датировки сравнимы по достоверности с миннесотскими.

Таблица 19

Возраст докембрийских железорудных формаций  
и некоторые данные о них [13]

Возраст, млрд. лет	Формация, местонахождение, описание <sup>1</sup>
Поздний протерозой	<i>Поздний протерозой, Северная территория, Австралия.</i> Оолиты и пизолиты; гематит, сидерит, гриналит
1,7—2,5	<i>Гурон, Северная Америка.</i> Полосчатый силикат—карбонат, силикат—кремнистый сланец, с гранулами. Полосчатый гематит, оолитовый гематит
1,8—1,9	<i>Карелиды — свекофенниды, восточная часть Балтийского щита</i>
≈2,0	<i>Трансвааль, Южная Африка.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец; оолитовый и пизолитовый шамозит—гематит—магнетит—сидерит
2,0—2,5	<i>Протерозой, Западная Австралия.</i> Полосчатый кремнистый сланец—карбонат, железорудный кремнистый сланец
>2,1	<i>Кривой Рог, СССР.</i> Полосчатая железорудная формация
≈2,5	<i>Дарвар, железорудная серия, Индия.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
2,5	<i>Саамиды, Балтийский щит</i>
Архей (> 2,5?)	<i>Мидлбек, Южная Австралия.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
>2,5	<i>Архей, Западная Австралия.</i> Полосчатый гематит—кварциты, джаспилиты
>2,5	<i>Соуден, Северная Америка.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
>2,5	<i>Шамвай, Южная Родезия.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
>2,6	<i>Булавайо, Южная Родезия.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
Подстигает Булавайо	<i>Себакийская, Южная Родезия.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
>2,8	<i>Ньянза, Кения.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
>3,0	<i>Свазиленд.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец
>3,0	<i>Свазиленд, Южная Африка.</i> Полосчатый гематит—кремнистый сланец; магнетит—сидерит—сланец

<sup>1</sup> Литература по данным формациям указана в статье, из которой взята таблица [13].

Относительно возраста докембрийских железорудных формаций остается упомянуть еще одну важную подробность. Как мы узнали из гл. X, геологическая история довольно однообразно повторяется в каждом орогеническом цикле. Каждый цикл начинается с посторогенной стадии, для которой характерна сильная эрозия и мощная кластическая седиментация. В средней и в заключительной частях последующей геосинклинальной фазы вне геосинклинальных бассейнов преобладают химическая эрозия и хемогенное осадкообразование; кора остается стабильной. Что касается железорудных формаций, то до сих пор у нас недостаточно данных, чтобы судить о том, применима ли эта простая схема для всех древних щитов, в которых встречаются железорудные формации типа формации Верхнего озера. Во всяком случае, в миннесотских отложениях эти фазы выражены хорошо. Все три основных процесса формирования железорудных пород происходили или в середине, или в конце геосинклинального периода. Напротив, золото-урановые «риффы» Блайнд-Ривер, находящиеся в древних песках и гравии нижнего гурона, возникали, как правило, в посторогенной фазе альгомского горообразования.

16. ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ, СФОРМИРОВАВШИЕСЯ В УСЛОВИЯХ  
КИСЛОРОДНОЙ АТМОСФЕРЫ; КРАСНОЦВЕТНЫЕ ТОЛЩИ

Итак, в благоприятных условиях в районах, которые не подвергались с самого момента своего возникновения слишком сильным воздействиям, могут сохраниться древние осадочные породы с особенностями, указывающими на формирование в восстановительных атмосферных условиях. С другой стороны, можно утверждать, что некоторые окисленные породы явно образовались в условиях кислородной атмосферы.

Однако все это не так просто. Как мы видели, не каждая осадочная порода, в которой содержатся зерна пирита, обязательно должна была возникнуть в бескислородной атмосфере и не каждая порода из зерен окислов сформировалась в условиях кислородной атмосферы. Возьмем, например, самый распространенный минерал современных песков — кварц; он ничего не может сказать о составе атмосферы. Как мы узнали из предыдущих разделов, пески могут так хорошо отсортировываться по удельной массе зерен, что и в бескислородной атмосфере может накапливаться чистый кварцевый песок. Другой пример — слои кремнистого сланца в полосчатых железорудных формациях: они также состоят в основном из SiO<sub>2</sub>.

Видимо, лучшими индикаторами состава атмосферы являются элементы, имеющие несколько окислов с разной степенью окисленности элемента. Мы уже показали, что полосчатые железорудные формации раннего и среднего докембрия содержат железо главным

образом в его наименее окисленной форме — в виде минерала магнетита, а железорудные формации позднего докембрия и фанерозоя содержат полностью окисленную форму железа — минерал гематит.

Другая группа железосодержащих осадочных пород, в которых однако, содержание железа ниже, чем в обычных железорудных формациях, это *красноцветные толщи*. Они распространены не менее широко, чем железорудные формации, и представляют собой тонкозернистые кварцевые осадочные породы типа илистых наносов, т. е. зерна их имеют промежуточный размер между размерами зерен обычных песков и обычных глин. Более того, в сериях красноцветных толщ обычно встречаются тонкие прослойки глин, а также более грубозернистые пласты песчаников и конгломератов (или только последних). Красноцветные толщи имеют материковое происхождение. Цвет их варьирует от ярко-красного до красноватобурого. Такой окраской они обязаны железу, содержащемуся в них, впрочем в небольшом количестве. Железо включено в эти породы в виде мелких чешуек или адсорбировано на зернах кварца. Оно находится в трехвалентном, т. е. в полностью окисленном, состоянии, обычно в форме гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Образование красноцветных толщ — довольно сложный и еще не до конца понятый процесс. Гематит стабилен в сухом климате с относительной влажностью менее 60%. В более влажных районах устойчивым является сероватый минерал гётит,  $\text{FeO}(\text{OH})$  [30]. Исходя из этого полагали, что красноцветные породы сформировались в пустынях и, таким образом, должны свидетельствовать о пустынном климате данной местности в то далекое время. Но затем выяснилось, что в современных пустынях подобные образования встречаются очень редко. На том основании, что в составе древних красноцветных толщ встречаются глинистые минералы, сейчас предполагают, что эти породы формировались в два этапа. Считается, что их материал образовался на плоскогорьях, в климатических условиях саванн, но окончательное отложение его произошло в близлежащих бассейнах с пустынным климатом. Перенос крупных обломков мог осуществляться временно пересыхающими реками, мелких зерен — ветром или теми же реками. Впрочем, существует гипотеза, согласно которой большая часть гематита образовалась лишь после отложения, в ходе раннего диагенеза осадков.

Мы не будем подробнее вдаваться в проблему происхождения красноцветных толщ — она хорошо освещена в литературе [33]. Но необходимо запомнить, что эта группа осадочных пород обладает некоторыми особыми признаками, одинаковыми для таких пород, залегающих в различных районах земного шара в разных пластах фанерозоя, а также в верхнем докембрии. Это обломочные осадочные породы, сформировавшиеся тем или иным образом в условиях сухого климата и содержащие железо в его наиболее окисленной форме.

## 17. ВОЗРАСТ КРАСНОЦВЕТНЫХ ТОЛЩ

Типичные красноцветные толщи известны нам из сравнительно поздней, «обычной» геологической истории, т. е. из фанерозоя. Например, «древняя красноцветная» и «новая красноцветная» серии Англии относятся соответственно к девону (около 400 млн. лет) и триасу (около 200 млн. лет). Сравнимые с ними красноцветные толщи известны из силура Северной Америки — им более 400 млн. лет. В перми (около 250 млн. лет) красноцветные толщи возникали во многих районах Земли.

Существуют и докембрийские красноцветные толщи. Но, как и большинство докембрийских ископаемых остатков, они относятся к позднему докембрию. Пример — торридонские песчаники Шотландии и иотнийские песчаники Скандинавии. И те и другие относятся к докембрию, но связаны с орогеническим циклом, начавшимся в самом конце докембрия и кончившимся в раннем палеозое. Эти песчаники составляют часть одной осадочной последовательности.

Непосредственно датировать эти породы не представляется возможным. Впрочем, в иотнийской серии песчаников Дала обнаружены прослойки долетрита, возраст которого предварительно оценивается в 1300—1400 млн. лет [34]. К тому же возраст подстилающих порфиритов составляет  $1405 \pm 30$  млн. лет [20]. Он определен по отношению  $\text{Rb}/\text{Sr}$ , и поскольку эта датировка больше заслуживает доверия, верхним пределом возраста древнейших красноцветных толщ считают величину 1400 млн. лет.

Оценку эту надо считать предварительной по двум причинам. Во-первых, не исключено, что будут обнаружены еще более древние красноцветные пласты. Во-вторых, возможно, мы научимся отдельно определять в известных сейчас отложениях этого типа возраст более древних, грубозернистых, сероватых красноцветных толщ и возраст более молодых, тонкозернистых, с сильнее выраженной красной окраской. Тогда мы сможем представить себе, как шло накопление кислорода в земной атмосфере.

Как мы узнали из предыдущего раздела, не каждая серия грубозернистого песчаника с гематитом, осевшим на зернах кварца, соответствует типичным красноцветным толщам фанерозоя. Клауд [5] выразил это, назвав последние «настоящими» красноцветными толщами. Термин звучит не очень научно, но зато хорошо объясняет полевому геологу суть дела.

Ввести понятие «настоящих» красноцветных толщ понадобилось потому, что существуют более ранние красноватые осадочные породы, отличающиеся от интересующих нас пластов. Обсуждая полосчатые железорудные формации, мы уже видели, что окисление в той или иной степени всегда возможно и в бескислородной

атмосфере. Но точно так же, как типичные полосчатые железорудные формации приурочены к раннему и среднему докембрию, так и типичные красноцветные толщи встречаются лишь начиная с позднего докембрия и на протяжении всего фанерозоя.

Возьмем, к примеру, более ранние красноватые отложения — формацию Рораима в Гайане. Это серия грубозернистых красноватых — но не красных — песчаников. Их отличие от типичных красноцветных толщ состоит в том, что они, по-видимому, не имеют прослоев тонкозернистой породы. Возраст формации Рораима может составлять 1,8—2,5 млрд. лет, т. е. эти отложения, возможно, являются современниками пиритовых песков золото-урановых «рифов».

Адсорбция железа на поверхности крупных зерен песка, будь то во время осадкообразования и раннего диагенеза или в ходе дальнейшей истории породы, конечно, совершается легче в грубозернистом песчанике, где грунтовые воды циркулируют гораздо легче, чем в илистых отложениях. Надо заметить, что история формации Рораима сложнее, чем может показаться на первый взгляд. Оказывается, в песчаниках Рораима содержатся споры и пыльца растений третичного периода, принесенные водой. Этот факт доказывает, что в таком крупнозернистом песчанике и после отложения возможна значительная циркуляция грунтовых вод. Итак, даже если возраст формации Рораима определен верно — а в этом есть некоторые сомнения [32], — вполне возможно, что она не является настоящей красноцветной формацией.

Мне лично кажется, что и песчаники Дала также в среднем гораздо более грубозернисты, чем красноцветные толщи фанерозоя, и что в них нет тонкой иловой фракции, столь типичной для последних. Как ни странно, до сих пор не проведен серьезный седиментологический анализ, который позволил бы ответить на вопрос, какие именно признаки характерны для «настоящих» красноцветных толщ фанерозоя. Не изучены в этом отношении краснопесчаниковые серии позднего докембрия, такие, как торридонские песчаники и песчаники Дала. Красноцветные толщи не имеют особого практического значения и потому пока недостаточно исследованы.

Возможно, что в будущем мы научимся различать типы красноцветных толщ. Тогда нам удастся получить данные о том, когда «почти кислородная» атмосфера сменилась кислородной. Но пока все красноцветные толщи позднего докембрия и фанерозоя мы «сваливаем в одну кучу» и считаем, что в период их возникновения атмосфера уже была кислородной.

Итак, примерный возраст самой древней атмосферы, в которой смогли сформироваться красноцветные толщи, составляет 1,4 млрд. лет.

## 18. ВЫВОДЫ

Подведем итог: из этой главы мы узнали, что древние осадочные породы могут дать некоторые сведения о том, каков был состав атмосферы в период их образования. Изучение докембрийских кварцево-пиритных песков золото-урановых руд и полосчатых железорудных формаций позволяет сделать вывод, что Земля имела первичную бескислородную атмосферу. Более того, мы ознакомились с предварительными данными, помогающими нам представить себе, когда существовала эта атмосфера и когда появилась кислородная атмосфера, близкая к современной.

Мы отметили также, что имеющиеся данные не позволяют решить, начиная с какого момента, с какого уровня содержания кислорода атмосферу следует считать кислородной. Такая неопределенность объясняется тем, что наши умозаключения основаны главным образом на степени окисленности железа, включенного в осадочные породы. Мы находим там полностью восстановленное железо (FeS), частично окисленное (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) или полностью окисленное (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Мы узнали, что геохимия железа, да и геохимия большинства породообразующих минералов изучалась до сих пор в основном с точки зрения равновесных реакций, а наиболее важный аспект — кинетика реакций — остается почти неизученным. Степень окисленности железа, содержащегося в осадочных породах, зависит не только от количества кислорода в древней атмосфере, но и от соотношения между скоростью окисления, с одной стороны, и переноса и осадкообразования — с другой. В гл. XV мы используем известную способность многих современных микроорганизмов переключать свой метаболизм с брожения на дыхание и попытаемся примерно определить верхний уровень содержания свободного кислорода в первичной бескислородной атмосфере.

Что же касается датировки периода смены атмосфер, то мы видели, что и кварцево-пиритовые пески, и полосчатые железорудные формации встречаются в раннем и среднем, но не в позднем докембрии. Таким образом, границу между средним и поздним докембрием — 1,8 млрд. лет — предварительно можно считать концом господства бескислородной атмосферы. Возраст песчаников Дала из центральной Швеции — 1,4 млрд. лет — принят сейчас за время появления кислородной атмосферы. Значит, примерно 1,8—1,4 млрд. лет назад произошел переход от первичной бескислородной к современной кислородной атмосфере.

Теперь мы можем набросать в самых общих чертах историю атмосферного кислорода, а с ней и историю появления и раннего развития жизни. Этим мы займемся в гл. XVI. Но до того нам придется обсудить некоторые проблемы геологии. Они не имеют прямого отношения к нашему основному вопросу, но важны для лучшего понимания современной теории происхождения жизни.

## Список литературы

1. *Armstrong G. C.*, Sedimentological control of gold mineralisation in the Kimberley Reefs of the East Rand Goldfield, Econ. Geol. Unit. Univ. Witwatersrand, Johannesburg., Inform. Circ., 47, 24, 1968.
2. *Barghoorn E. S.*, *Meinschein W. G.*, *Schopf J. W.*, Paleobiology of a Precambrian shale, Science, 148, 461—472 (1965).
3. *Clifford T. N.*, Radiometric dating and pre-Silurian geology of Africa. In: Hamilton E. I. and Farquar R. M. (Editors), Radiometric Dating for Geologists, Interscience, New York, N. Y., 299—416, 1968.
4. *Cloud P. E.*, Significance of the Gunflint (Precambrian) microflora, Science, 148, 27—35 (1965).
5. *Cloud P. E.*, Pre-metazoans and the origins of the Metazoa. In: E. T. Drake (Editor), Evolution and Environment, Yale Univ. Press, New Haven, Conn., 1—72, 1968.
6. *Davidson C. F.*, The Precambrian atmosphere, Nature, 197, 893—894 (1963).
7. *Davidson C. F.*, Geochemical aspects of atmospheric evolution, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 53, 1194—1205 (1965).
8. *Dechow E.*, *Jensen M. L.*, Sulfur isotopes of some Central African sulfide deposits, Econ. Geol., 60, 894—941 (1965).
9. *Derry D. R.*, Evidence of the origin of the Blind River uranium deposits, Econ. Geol., 55, 906—927 (1960).
10. *Garrels R. M.*, Mineral Equilibria, Harper, New York, N. Y., 254 pp., 1960.
11. *Герасимов И. П.*, Recent laterites and their formation, Intern. Geol. Congr. 22nd, New Delhi, 1964, Rept., 14, 116—125, 1968.
12. *Goldich S. S.*, Geochronology in the Lake Superior Region, Can. J. Earth Sci., 5, 715—724 (1968).
13. *Govett G. J. S.*, Origin of banded iron formations, Geol. Soc. Am. Bull., 77, 1191—1212 (1966).
14. *Hales A. L.*, An upper limit to the age of the Witwatersrand System. Ann. N. Y. Acad. Sci., 91, 524—529 (1961).
15. *Hoefs J.*, *Nielsen H.*, *Schidlowski M.*, Sulfur isotope abundances in pyrite from the Witwatersrand conglomerates, Econ. Geol., 63, 975—977 (1968).
16. *Hough J. L.*, Fresh-water environment of deposition of Precambrian banded iron formations, J. Sediment. Petrol., 28, 414—430 (1958).
17. *Jensen M. L.*, *Dechow E.*, Bearing of sulfur isotopes on the origin of South African ore deposits, Geol. Soc. Am. Progr. Ann. Meeting, 1964, 101 (1964).
18. *Jong W. J.*, Actualism in geology and geography, Tijdschr. Koninkl. Ned. Aardrijkskundig Genoot., 58, 238—248 (1966).
19. *Lepp H.*, *Goldich S. S.*, Origin of Precambrian iron formations, Econ. Geol., 59, 1025—1060 (1964).
20. *Priem H. N. A.*, *Mulder F. G.*, *Boelrijk N. A. I. M.*, *Hebeda E. H.*, *Verschure R. H.*, *Verdurmen E. A. T.*, Geochronological and paleomagnetic reconnaissance survey in parts of central and southern Sweden, Phys. Earth Planetary Interiors, 1, 373—380 (1968).
21. *Ramdohr P.*, Die Uran- und Goldalgerstätten Witwatersrand Blind River District, Dominion Reef, Serra de Jacobina: erzmikroskopische Untersuchungen und ein geologischer Vergleich, Abhandl. Deut. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Chem., Geol., Biol., 1958 (3), 35, 1958.
22. *Ramdohr P.*, *Ottemann J.*, *Schidlowski M.*, Mikroskop, Mikrosonde und Schätzung der Uran-Blei Alter, Max Planck Inst. Kernphysik, Heidelberg, 13, 1965.
23. *Rankama K.*, Geologic evidence of chemical composition of the Precambrian atmosphere, Geol. Soc. Am. Spec. Papers, 62, 651—664 (1955).
24. *Retche P.*, A Survey of Weathering Processes and Products (Revised edition), Univ. New Mexico Press, Albuquerque, N. M., 95 pp., 1950.

25. *Rutten M. G.*, Biological homogenization in fossil underclays and seat rocks, Geol. Soc. Am. Bull., 74, 91—92 (1963).
26. *Saager R.*, Structures in pyrite from the Basal Reef in the Orange Free State goldfield, Trans. Geol. Soc. S. Africa, 73, 29—46 (1970).
27. *Schidlowski M.*, Das Witwatersrand Becken. In: Max Richter Festschrift, Pieper, Clausthal-Zellerfeld, pp. 127—147, 1965.
28. *Schidlowski M.*, Beiträge zur Kenntnis der radioaktiven Bestandteile der Witwatersrand-Konglomerate, I. Uranpecherz in den Konglomeraten des Oranje-Freistaat-Goldfeldes, Neues Jahrb. Mineral., Abhandl., 105, 183—202 (1966).
29. *Schidlowski M.*, Beiträge zur Kenntnis der radioaktiven Bestandteile der Witwatersrand-Konglomerate, II. Brannerit und «Uranpechergeister», Neues Jahrb. Mineral., Abhandl., 105, 310—324 (1966).
30. *Schmaltz R. F.*, A note on the system  $Fe_2O_3-H_2O$ , J. Geophys. Res., 64, 575—579 (1959).
31. *Sharpe J. W. N.*, The economic auriferous bankets of the Upper Witwatersrand Beds and their relationship to sedimentation features, Trans. Geol. Soc. S. Africa, 52, 265—300 (1949).
32. *Stainforth R. M.*, Occurrence of pollen and spores in the Roraima Formation of Venezuela and British Guiana, Nature, 210, 292—294 (1966).
33. *Van Houten F. B.*, Origin of red beds—some unsolved problems. In: A. E. M. Nairn (Editor), Problems in Paleoclimatology, Interscience, New York, N. Y., pp. 649—672 (1963).
34. *Welin E.*, *Blomqvist G.*, *Parwel A.*, Rb/Sr whole rock age data on some Swedish Precambrian rocks, Geol. Fören. Stockholm Förhandl., 88, 19—28 (1966).

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СМЕСЬ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В этой главе кратко рассматриваются довольно разнообразные геологические вопросы, имеющие отношение к проблеме происхождения жизни и в то же время не уложившиеся в содержание двух предыдущих глав.

Сначала мы поговорим об оптической активности и о роли кварца, который наряду с глинистыми минералами является важнейшим компонентом осадочных пород. После этого мы рассмотрим разные пути возникновения кремнистых сланцев. Эти породы, состоящие из очень тонкозернистого кремнезема, служат, как было показано в гл. XII, основным хранилищем микроископаемых раннего и среднего докембрия. Поэтому нам важно узнать данные, весьма, впрочем, немногочисленные, касающиеся происхождения кремнистых сланцев. Затем последуют два геохимических раздела, из которых мы узнаем, что известные сейчас данные геохимии сами по себе не позволяют дать однозначный ответ на вопрос, в самом ли деле Земля обладала некогда первичной бескислородной атмосферой.

Потом мы займемся глинистыми минералами. Познакомившись с их строением и химическим разнообразием, мы сможем перейти к современным представлениям об истории состава морской воды. Мы узнаем, что в условиях современной атмосферы состав морской воды должен был бы на протяжении геологической истории сохраняться неизменным. Причина состоит в том, что концентрации основных элементов, Na, Ca, Mg и других, в значительной степени регулируются благодаря глинистым минералам.

Исходя из представления о неизменности состава морской воды, шведский химик проф. Силлен усомнился в одной из основных концепций теории происхождения жизни, назвав ее «мифом о предбиологическом бульоне» (1965 год). По термодинамическим соображениям следует ожидать, что если принимать во внимание только равновесные концентрации, то в океанском «первичном бульоне» содержание свободных радикалов и «органических» молекул должно было оставаться низким, и им можно было бы пренебречь. Видимо, этот вывод остается верным и для океана, контактировавшего с первичной бескислородной атмосферой, хотя равновесные реакции, протекавшие в этом случае, изучены еще слабо. Но ведь

сейчас в лагунах и соленых озерах отлагаются соли, хотя концентрация их в морской воде весьма далека от насыщения. В подобных же условиях, вероятно, могли возникать и концентрированные «бульоны», гораздо более подходящие для развития жизни, чем воды открытого океана.

Кроме явления оптической активности (разд. 2 этой главы), мы коснемся и некоторых других аспектов различия между биогенными и абиогенными соединениями. Это различие, столь явное в наши дни, совсем не обязательно существовало в раннюю эпоху геологической истории. Например, сейчас биогенное и абиогенное вещества могут различаться по соотношению в них стабильных изотопов какого-либо элемента. Но это еще не означает, что это справедливо также для органических и «органических» веществ раннего и среднего докембрия.

Другой вопрос, рассматриваемый здесь довольно подробно, — это механизм отложения известняка различными организмами. В современной кислородной атмосфере этот процесс осуществляется главным образом за счет фотосинтезирующих водорослей. Но и сейчас, как любезно сообщил мне проф. К. Ван-Ниль, протекают другие, весьма многочисленные процессы отложения известняка, особенно анаэробными микроорганизмами; поэтому не удивительно, что биогенные известняки встречаются уже в пластах раннего докембрия (гл. XII, разд. 8).

Я хотел бы кое-что сказать о процессе фоссилизации. Микроископаемые докембрия поразительно хорошо сохранили свою морфологию, но не надо забывать, что это всего лишь внешняя форма организма (особенно это относится к ископаемым остаткам, обнаруживаемым в кремнистых сланцах). Исходное вещество клеток не сохранилось, хотя о «биологически сохранном» веществе в последнее время говорилось так много. Обычно в ископаемых остатках ничего не остается и от внутренних структур клеток. Поэтому невозможно отличить прокариотические клетки от эукариотических.

Надо также сказать несколько предостерегающих слов о смысле палеоботанической классификации водорослей. В противоположность классификации высших растений и животных, основанной на филогенетических соображениях, система водорослей, особенно в палеоботанике, это всего лишь так называемая *морфологическая группа*, отражающая внешнее сходство между разными видами, родами и высшими таксономическими единицами. Для нашей проблемы такая искусственная система не имеет никакой ценности.

Затем мы перейдем к довольно скользкому вопросу о предполагаемой связи между появлением и эволюцией жизни, с одной стороны, и периодами сильных пертурбаций земной коры — с другой. Я не верю, что существует подобная связь между так называемыми «большими вымираниями» и «главными орогенезами», но я знаю, что многие геологи не согласятся со мной. Впрочем, для докембрия

этот вопрос имеет чисто академический характер, поскольку для абсолютной датировки докембрия используются в основном породы, сформировавшиеся во время главных горообразований, — у нас просто нет возможности составить подробную временную шкалу для докембрийских пластов всего мира.

В конце главы мы поговорим о том, что факт длительной эволюции жизни в течение примерно 3 млрд. лет свидетельствует о сравнительном постоянстве температуры поверхности Земли на протяжении всего этого времени.

## 2. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И РОЛЬ КВАРЦА

Оптическая активность — это способность некоторых веществ влиять на поляризованный свет. Она очень характерна для живого вещества, и было даже сказано, что «ни одна другая химическая особенность не отличает так живое вещество от любого иного, как его оптическая активность» [58]. Но это не так: некоторые неорганические кристаллы, хотя бы кварц, тоже обладают оптической активностью. Поэтому вернее будет сказать, что на молекулярном уровне оптическая активность характерна для многих биогенных соединений, тогда как вещества, образовавшиеся неорганическим путем, обладают ею крайне редко.

Оптическая активность объясняется отсутствием симметрии в самих молекулах или в кристаллической решетке. Вещества, обладающие плоскостью симметрии, никогда не проявляют оптической активности. Молекулы или кристаллы, у которых нет плоскости симметрии, не могут быть совмещены со своим зеркальным изображением. Но вещество может и в этом случае обладать какой-либо симметрией низшего порядка, скажем симметрией относительно одной точки, лежащей внутри молекулы или кристалла. Кристаллы с такой симметрией низшего порядка называются в кристаллографии *триклинными*, а кристаллы, обладающие плоскостью симметрии, — *моноклинными* (если же для них характерен еще более высокий порядок симметрии, то их относят к другим кристаллографическим группам). В тех случаях, когда плоскость симметрии отсутствует, но имеется какая-то симметрия низшего порядка, говорят о *диссимметрических* молекулах или кристаллах; когда же не имеется вообще никакой симметрии — об *асимметрических*. Впрочем, эти термины часто применяются не совсем строго.

На молекулярном уровне оптическая активность объясняется существованием двух стереохимически различных изомеров одинакового состава, называемых *стереоизомерами*. На уровне кристаллов оптическая активность связана с существованием «правой» и «левой» форм триклинных кристаллов, называемых *энантиоморфами*. Чтобы образовывать оптически активные кристаллы, соединение не обязательно должно иметь молекулы-стереоизомеры. Так,

кварц ( $\text{SiO}_2$ ) имеет, разумеется, симметричную молекулу, и все же он образует оптически активные кристаллы<sup>1</sup>. Возможно, я слишком упрощаю, но можно сказать, что оптически активные кристаллы влияют на проходящий через них свет потому, что молекулы в их диссимметрической кристаллической решетке расположены винтообразно. Оптическая активность растворов объясняется подобным же действием отдельных диссимметрических «винтообразных» молекул.

Оптическая активность известна уже с начала прошлого века, но первые важные работы по изучению этого явления провел Луи Пастер в середине XIX в. Пастер изучал кристаллы двух стереоизомеров соединения  $\text{HOOC}-\text{CHON}-\text{CHON}-\text{COOH}$  — рацемической ( $\pm$  винной кислоты, не вращающей плоскость поляризации) и винной кислот. Рацемическая кислота образует симметрические кристаллы, а винная кристаллизуется в диссимметрические кристаллы с правыми и левыми энантиоморфами. От названия рацемической кислоты образован термин *рацемизация*, означающий потерю исходной оптической активности в растворе, каков бы ни был состав раствора.

Оптическая активность впервые была обнаружена как вращение плоскости поляризации поляризованного света. Этот аспект оптической активности называется *дисперсией оптического вращения*. Затем оказалось, что оптически активные вещества по-разному поглощают поляризованный по кругу свет в зависимости от того, поляризован ли он вправо или влево. Этот *круговой дихроизм* заметен, конечно, только вблизи полос поглощения; он проявляется в смещении этих полос (так называемый *эффект Коттона*). На явлениях дисперсии оптического вращения и кругового дихроизма основаны два ценных метода анализа, применяемые в органической химии. Эти методы позволяют проводить непрерывный количественный анализ процессов распада или синтеза органических веществ; кроме того, они очень чувствительны. Оба явления, различаясь внешне, едины в своей сути и представляют собой лишь разные стороны феномена оптической активности. Они обусловлены диссимметричностью молекул стереоизомеров или энантиоморфных кристаллов. От одной стороны можно перейти к другой с помощью квантовомеханических уравнений Кронига — Крамера [17, 39].

После работ Пастера биологам стала ясна связь оптической активности с жизнью. Пастер показал, что все органические соединения, в которых имеются строительные блоки, способные суще-

<sup>1</sup> Всем известные кристаллы горного хрусталя только на первый взгляд кажутся гексагональными. На самом деле они псевдогексагональны: углы между гранями призмы слегка отклоняются от угла в  $60^\circ$ , свойственного настоящей шестигранной призме.

ствовать в двух энантиоморфных вариантах, присутствуют в живом веществе лишь в какой-то одной из двух возможных форм. *Левовращающая* форма (L) вращает плоскость поляризованного света влево, а *правовращающая* (D) — вправо<sup>1</sup>.

Общего правила не существует; так, наиболее распространенные аминокислоты присутствуют в живом веществе всегда в L-форме, а некоторые редкие аминокислоты и почти все сахарофосфаты — в D-форме. Но для каждого данного соединения закон нерушим: в современном живом веществе ни одно из веществ не присутствует в виде смеси стереоизомеров, оно всегда обнаруживается только в одной из двух форм — L или D.

Еще Пастер показал, что почти абсолютного разделения смеси L- и D-изомеров данного вещества добиться довольно легко. Надо лишь использовать в каком-то звене цепи реакций оптически активное вещество. В то же время попытки выделить оптически активные вещества непосредственно из рацемических растворов окончились неудачей. Сейчас господствует мнение, что оптически активное вещество может быть создано только другим оптически активным веществом.

Этот вывод напоминает утверждение, высказанное в гл. IV; сейчас только живая материя может создавать другую живую материю. Но мы видели, что в восстановительной среде может происходить неорганический синтез «органических» молекул, т. е. если не само живое, то вещества, характерные для живого, могут быть созданы неорганическим путем. Вместе с С. Фоксом (цит. по [11]) мы можем признать, что «любое известное нам резкое различие между неживым и живым надо рассматривать как еще не постигнутое, но не безнадежно непостижимое». Подобную же позицию занимает и Уолд [58]: «Мне, так же как и читателю, не хочется спорить с хорошо обоснованной концепцией, по которой спонтанная кристаллизация L- и D-форм равновероятна. Затруднение состоит в том, что все доступные мне данные говорят об обратном». И далее: «Возможно, мы слишком легко приняли на веру многие положения. Я думаю, что дополнительные эксперименты в этой области не повредили бы».

На самом деле тут нет такой резкой границы, как обычно думают. Раствор приобретает оптическую активность, если один из изомеров или энантиоморфов синтезируется или разрушается быстрее другого. В специально поставленных опытах были с успехом испробованы оба варианта, но полученная таким способом оптическая активность незначительна, поскольку экспериментаторы столкнулись с большими методическими трудностями. Биохимики, привыкшие к абсолютному разделению L- и D-форм в живом веществе,

<sup>1</sup> Сокращенные обозначения стереоизомеров взяты от латинских слов *laevus* — левый и *dexter* — правый. — *Прим. перев.*

склонны считать результаты этих опытов не заслуживающими внимания. Но надо помнить, что на заре развития жизни даже незначительные отклонения могли давать реальное преимущество в «борьбе за существование» и что наблюдаемое нами теперь совершенство достигнуто за 3 млрд. лет в результате взаимодействия процессов мутирования и естественного отбора. Что касается избирательного синтеза, то было показано, что из перенасыщенных рацемических растворов могут спонтанно выпадать L- или D-энантиоморфы [18]. Что же касается избирательного распада, то Э. Коттон еще в 1896 году обнаружил, что оптические изомеры имеют различные коэффициенты поглощения для лево- и правополяризованного по кругу света (упомянутый уже эффект Коттона) и что по крайней мере в теории рацемическая смесь диссимметрических молекул при облучении таким светом должна преимущественно терять один из «сортов» молекул, приобретая оптическую активность. Однако экспериментальное подтверждение этого было получено только в 1929 году [58] — вот как велики методические трудности в этой области! Другой возможный путь появления оптической активности исследовал Гараи [13], который в 1961 году начал изучение возможного действия  $\beta$ -излучения в комплексе с левополяризованным по кругу тормозным  $\gamma$ -излучением, возникающим при торможении  $\beta$ -частиц (электронов). Лишь через семь лет Гараи получил положительные результаты: он обнаружил, что в этих условиях D-тирозин разрушается быстрее L-тирозина. Конечно, «дополнительные эксперименты в этой области не повредили бы».

О другой возможности получения «оптически чистого вещества... без вмешательства микроба или человека» писал Кальвин [10]. Это аутокатализ стереоспецифических соединений. Если образующееся в какой-либо реакции стереоспецифическое вещество является аутокатализатором, т. е. само катализирует реакцию своего образования, и если, кроме того, скорость этой аутокаталитической реакции на много порядков превышает скорость некаталитической, то, согласно Кальвину, первая молекула нового соединения — L- или D-форма — будет подавлять образование молекул другого изомера. В подтверждение автор ссылается на опыты, в которых на октаэдрическом кобальтовом комплексе синтезировались L- или D-пептиды [1].

Не говоря уже о том, что кобальт и подобные ему амбивалентные металлы редки на поверхности Земли, мы не должны забывать, что переносить результаты опытов из лаборатории в природу надо с большой осмотрительностью. Конечно, в пробирке химика первая же возникшая молекула, если скорость аутокатализа достаточно велика, может индуцировать образование соединений подобной структуры. Но мы помним, что в природе процессы преджизни и биопоэза шли одновременно в самых разных местах земного шара. Если даже в одном или нескольких из этих процессов действительно



но работал механизм аутокатализа, то должно было возникнуть множество «очагов», в которых «первыми» молекулами были где L-, а где D-формы. Эти молекулы индуцировали образование вокруг себя подобных себе форм. Разрастаясь, местные «колонии» L- и D-форм должны были образовать своего рода мозаику. Оба стереоизомера имели одинаковые шансы на возникновение. Чтобы получила преимущество одна из двух форм, во внешней среде должен был присутствовать некий фактор отбора, глобально действующий против другой формы.

В связи с этим я хотел бы указать на возможную роль кварца. Рассматривая ископаемые остатки докембрия и условия среды в то время, мы уже не раз встречались с кварцевыми песками и кремнистыми сланцами. Кварц был и остается наиболее распространенным минералом земной коры. Терентьев и Клабуновский [21, 53] опубликовали работы по оптической активности кварца. Оказывается, кристаллы кварца не просто воздействуют на проходящий свет, но обладают оптически активными свойствами на поверхности. Следовательно, на поверхности L- и D-энантиоморфов теоретически возможна избирательная адсорбция L- или D-изомеров. Но, конечно, если оба сорта энантиоморфных кристаллов встречаются в природе одинаково часто, то общий баланс L- и D-соединений останется неизменным. Мы не знаем, какие кристаллы кварца преобладают. Уолд [58] пишет о споре между немецким кристаллографом Ф. Гольдшмидтом и английским химиком Н. Пири. Гольдшмидт рассказывал, что, по словам одного немецкого фабриканта оптики, «большие правые кристаллы хрусталя встречаются в десять раз чаще левых», а Пири, со слов английских фабрикантов, утверждал, что правые кристаллы встречаются лишь чуть чаще левых.

Поскольку ясных данных о распространенности в природе L- и D-энантиоморфов кварца нет, придется принять, что они встречаются одинаково часто и, следовательно, не могли играть роль в возникновении стереогомогенности живого вещества. Но есть другая возможность: солнечный свет, проходя через атмосферу, становится линейно поляризованным. И хотя лишь поляризованный по кругу свет считается способным вызвать оптическую активность, мы знаем, что действие оптически активных веществ на линейно поляризованный и поляризованный по кругу свет — это две стороны одного и того же явления. Не исключено, что в результате совместного действия обычного на Земле линейно поляризованного света и оптически активных поверхностей кристаллов синтез одного из стереоизомеров какого-либо соединения мог ускоряться.

Часто повторяемое утверждение, что оптическая активность никогда не встречается у неорганически синтезированных «органических» соединений, не имеет смысла. В самом деле, опыты с целью получить оптическую активность в этих условиях не проводились. Эксперименты по синтезу «органических» молекул продол-

жались дни или недели, но не годы, а ведь для создания оптической активности рассмотренными выше способами требуются большие промежутки времени<sup>1</sup>. В этих опытах не использовалось ни  $\beta$ -, ни  $\gamma$ -излучение; в них не применялись оптически активные поверхности кристаллов кварца.

В общем я бы поостерегся утверждать, что, поскольку в наши дни оптическая активность связана только с живым веществом, присутствие оптически активных соединений углерода в древних осадочных породах доказывает существование жизни в то время. Мы уже видели, что сами по себе соединения углерода не могут служить свидетельством существования жизни, так как они могли быть синтезированы абиогенным путем. Вполне вероятно, что «дополнительные эксперименты» докажут возможность абиогенного возникновения оптической активности в условиях первичной атмосферы. Конечно, важно еще и то, у каких молекулярных ископаемых обнаружена оптическая активность — у небольших и относительно простых или у более сложных. Например, сообщение об оптической активности аминокислот из формации Фиг-Три [23] (см. гл. XII, разд. 17) не так уж интересно; более доказательным было бы обнаружение данного свойства у изопреноидных алканов, так как биогенное происхождение этих соединений более вероятно<sup>2</sup>. Однако изопреноидные алканы, обладающие оптической активностью, насколько мне известно, найдены пока только в эоценовых сланцах Грин-Ривер [28], но существование жизни в эоцене не требует доказательств. По-моему, оптическая активность ископаемых углистых веществ сама по себе не доказывает существования жизни в то время, но, взятая вместе с другими данными, она служит сильным аргументом в пользу биогенной природы рассматриваемых соединений. Итак, изучая углистые вещества и другие молекулярные ископаемые, мы видим, что теперь и в геологии граница между неживым и живым становится неясной. Об этом уже говорилось в гл. XII, разд. 2, и мы вернемся к этому вопросу в гл. XVIII, разд. 3.

### 3. ОБРАЗОВАНИЕ КРЕМНИСТЫХ СЛАНЦЕВ

Кремнистые сланцы состоят из крайне тонкозернистого кремнезема. Отдельные кристаллы так малы, что, как правило, не видны в световой микроскоп. Поэтому раньше считалось, что бывают кристаллические и аморфные кремнистые сланцы. Позднее рент-

<sup>1</sup> Так, в упомянутых выше опытах Гараи облучение продолжалось от года до полутора лет. — *Прим. перев.*

<sup>2</sup> К тому же можно усомниться в оптической активности аминокислот, выделенных из образований раннего докембрия. Крепелли [22] показал, что при контакте с одним из самых обычных глинистых минералов — монтмориллонитом — при температуре 100°С аминокислоты рацемизируются уже через 100 ч.

геноструктурный анализ показал, что все кремнистые сланцы состоят из кристаллов, так что теперь их называют *скрытокристаллическими*.

Сейчас кремнистые сланцы формируются в глубоких океанских впадинах, на глубинах около 4 км и более. Здесь отлагаются так называемые *кремнистые илы*, состоящие из скелетов организмов, имеющих раковины из кремнезема. Самые обычные из них — диатомовые водоросли и радиолярии. Эти планктонные формы обитают в верхних слоях морской воды толщиной в несколько десятков метров вместе с другими планктонами, обладающими известковыми (фораминиферы) и хитиновыми панцирями или совсем лишенными твердых покровов. После смерти эти организмы медленно опускаются на дно, причем их вещество химически взаимодействует с морской водой. Карбонат кальция фораминифер и хитин других планктонных организмов растворяются лучше, чем кремнезем диатомовых водорослей и радиолярий, и на определенной глубине остается уже только кремнезем. Однако доказано, что он не находится в равновесии с составом морской воды. Следовательно, глубоководные кремнистые илы образовались из материала, созданного в верхних слоях океана и накапливающегося на дне лишь благодаря тому, что скорость осадконакопления превышает скорость растворения.

В наши дни образование кремнистых сланцев в неглубоких районах океана, в озерах и болотах незначительно. Но в фанерозое, в те периоды, когда перемещения коры ослабевали, образовывались массивные кремнистые отложения. Сейчас в известняках, относящихся к этим периодам, мы находим *кремнистые желваки* неправильной формы, лучше всего известные в толщах мела. Заметим, кстати, что они служили сырьем для самой древней в истории человечества отрасли промышленности — производства кремневых орудий и оружия.

В противоположность глубоководным кремнистым илам кремнезем кремнистых желваков, или просто *кремней*, не является первичной осадочной породой. Он образовался путем вторичной силицификации ранее существовавших известняков, в которых подверглись полному окремнению, в частности, известковые окаменелости. Раньше считалось, что эта вторичная силицификация произошла в процессе диагенеза в ходе последующей истории известняков. Но новейшие исследования показали, что такие случаи редки. Вероятно, кремнистые желваки возникли сразу же после седиментации первичного известняка, до того как отложился следующая известняковый пласт. Такое немедленное окремнение, идущее непосредственно за осадкообразованием, называется *сингенетическим*.

Откуда же взялся кремнезем, заместивший углекислый кальций? Считается, что его возникновение связано с кратковременным

расцветом на Земле кремнеземсодержащих организмов, например кремневых губок. В их теле имеются бесчисленные микроскопические кварцевые иглы (спикулы), придающие прочность живой ткани. После смерти животного кварцевые спикулы рассеиваются и благодаря своему размеру и форме легко растворяются в морской воде. Считается, что временный расцвет кремневых губок или других организмов с кремнеземным скелетом мог привести к такому накоплению кремния, что на дне моря образовывался гель кремневой кислоты. Затем двуокись кремния могла кристаллизоваться вокруг рассеянных в известняке центров кристаллизации, замещая постепенно молекулы карбоната [36].

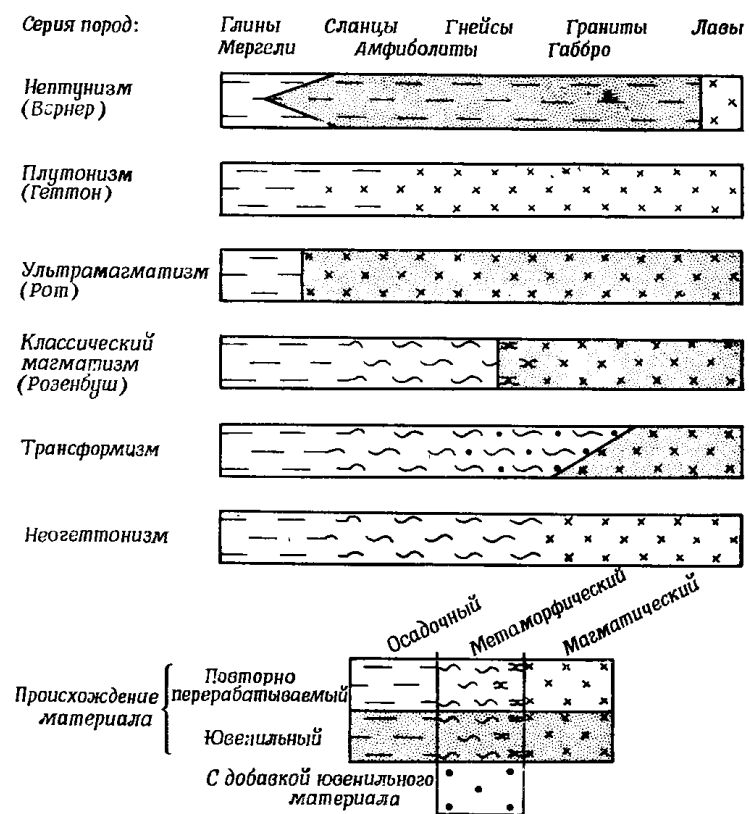
Но ни кремневые конкреции, ни глубоководные кремнистые илы фанерозоя не сравнимы с кремнистыми сланцами полосчатых железорудных формаций раннего и среднего докембрия. Полосчатые железорудные формации возникли или на материках, в озерах [16], или в мелководных шельфовых морях [25], но не в глубоких океанах. Кроме того, в те далекие времена на Земле еще не было ни диатомовых водорослей, ни радиолярий, ни кремневых губок, ни других достаточно развитых выделяющих кремнезем организмов [37]. Значит, способ образования тонкослоистых кремнистых сланцев, столь типичных для раннего и среднего докембрия, отличался от способа образования фанерозойских кремнистых сланцев. Как видите, мы опять пришли к заключению, уже высказанному в предыдущей главе: все полосчатые железорудные формации, встречающиеся только в раннем и среднем докембрии, сформировались в условиях, мало напоминающих современные.

Мы не имеем представления о процессе (или процессах), в результате которого образовались древние кремнистые сланцы. Тот факт, что кремнистые сланцы фанерозоя формировались и формируются если не прямо биологическим путем, то из веществ, выделенных организмами, может вызвать у нас вопрос, не связаны ли и древние кремнистые сланцы с жизнедеятельностью каких-то организмов. Но вряд ли в те времена Земля уже была так населена, что в результате метаболизма живых существ могли образоваться огромные залежи кремнезема. Скорее всего здесь действовали какие-то неорганические реакции, прекратившиеся или резко ослабившиеся при повышении содержания кислорода в атмосфере.

Дело усложняется еще и тем, что, как мы знаем, оба типа более молодых кремнистых пород не находятся в равновесии с обычной морской водой. Глубоководные илы образуются только из-за того, что осадконакопление идет быстрее растворения, а кремневые конкреции возникали там, где в небольшом объеме временно создавался гель кремнекислоты. Как и в случае некоторых других процессов, обсуждавшихся в предыдущей главе, здесь все решает кинетика реакций, а не химическое равновесие. Возможно, так обстояло дело и при образовании полосчатых железорудных формаций.

## 4. ДАННЫЕ ГЕОХИМИИ

Я уже заметил во введении к этой главе, что для нашей проблемы плодотворным может стать изучение геохимических данных о содержании различных элементов в земной коре в целом.



Фиг. 80. Обзор основных петрологических теорий [31].

Серым показан материал, который, согласно данной теории, должен рассматриваться как ювенильный; белым — материал, участвовавший в круговоротах. Вверху перечислены породы (в первой строке — не содержащие  $\text{CaCO}_3$ , во второй — с  $\text{CaCO}_3$ ). В конце прошлого и первой половине этого столетия господствовала (главным образом благодаря трудам немецкого петролога Розенбуша) классическая теория магматизма. Современные петрологи склоняются к трансформизму или даже к неогеттонистским идеям.

Все подобные сводки имеют один недостаток — в них допускаются экстраполяция данных, полученных при изучении верхних слоев коры, на всю земную кору. Прямым анализом доступно вещество коры лишь на глубину не более нескольких километров, куда проникают шахты и нефтяные скважины. Правда, во вскрытых эрозией ядрах бывших горных цепей можно встретить породы коры, залегающие некогда на глубине около 30 км. Чтобы по этим скудным данным составить представление о составе земной коры в

целом, приходится применять далеко идущую экстраполяцию. Так, поскольку в наше время кора под океанами сильно отличается от материковой и по строению и по составу, мы получим разные данные о составе коры в зависимости от того, будем ли мы исходить из представления о подвижности материков или об относительной неизменности их расположения, другими словами, станем ли мы на сторону «фиксистов» или «мобилистов». «Старая» геология пропитана духом фиксизма, но в последние десятилетия на первый план выходит мобилизм. На оценку состава коры не может не повлиять и интерпретация происхождения вулканических пород, таких, как граниты. Раньше считалось, что они ведут свое происхождение от мантии, на которой лежит кора, получающая, таким образом, постоянный приток вещества из глубины. В противовес этой магматической теории выдвинута метаморфистская теория происхождения гранитов: по мнению некоторых ученых, граниты — это подвергшиеся ультраметаморфизму части древнейшей коры, местами плавившейся и превращавшейся в мигму. По этой теории, вещество коры не связано с мантией, а «циркулирует» в верхних слоях земного шара (фиг. 80). В последние десятилетия вторая теория завоевала немало сторонников [31].

Итак, геохимия не может дать однозначные ответы на наши настоящие вопросы. К тому же большинство геохимических построений опирается на фиксистские и магматистские концепции. Впрочем, один случай представляет собой счастливое исключение. Речь идет об элементах, составляющих гидросферу и атмосферу, элементах, для которых Руби создал термин «избыток летучих» [34, 35]. По Руби, который исходил из фиксистских (и магматистских) соображений, главные порообразующие элементы (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K и др.), имеющиеся сейчас на Земле в осадочных породах и в морской воде, судя по их общим запасам, вполне могут происходить из первичных горных пород, выветрившихся за геологическое время. Мобилистский (или мигматистский) подход вряд ли изменит что-либо в этом балансе. Но ни та ни другая теория не позволяет понять, откуда взялись летучие вещества ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , Cl, N, S и многие другие), которых в гидросфере и атмосфере явно больше, чем могло дать одно выветривание горных пород. К этим «лишним» количествам летучих веществ и относится термин «избыток летучих». Их общее количество оценивается в табл. 20.

Возможны два объяснения наличия в атмосфере и гидросфере избытка летучих. Либо океанские воды и весь избыток летучих океана и атмосферы представляют собой наследие древнейшей горячей атмосферы, образовавшейся после охлаждения гидросферы и атмосферу, либо все эти вещества выделились за геологическое время из недр Земли при обезгаживании. Данные геохимии говорят, что исходная горячая атмосфера с соответствующим составом была бы совершенно нестабильной. Кроме того, от тех времен со-

Таблица 20

Избыток летучих в современной атмосфере и гидросфере, а также в захороненных осадочных породах ( $10^{20}$ г) [34]

H <sub>2</sub> O	16 600
Общий углерод в форме CO <sub>2</sub> <sup>1</sup>	910
Cl	300
N	42
S	22
H	10
B, Br, Ag, F и т.д.	4

<sup>1</sup> Данные по «общему углероду» — сумма 248 «лишних» единиц C и 506 «лишних» единиц O.

хранились бы в осадочных породах минералы, отличные от тех, которые нам знакомы. Поэтому приходится отдать предпочтение второй гипотезе, тем более что она лучше согласуется с современными астрономическими представлениями (гл. V).

Для нашей проблемы важнее всего знать глобальные запасы O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в сравнении с количеством углерода, связанного в осадочных породах. Если, как мы предполагаем, весь свободный кислород современной атмосферы имеет биологическое происхождение и возник в процессе фотосинтеза, то куда же делся углерод, фиксирующийся при этом? Конечно же, он перешел во вновь строящиеся при фотосинтезе растительные ткани, а после отмирания растений он мог отложиться в осадочных породах. Здесь из него могли возникнуть горючие ископаемые (каустобиолиты), например уголь и нефть. В основном они состоят из биогенного углерода.

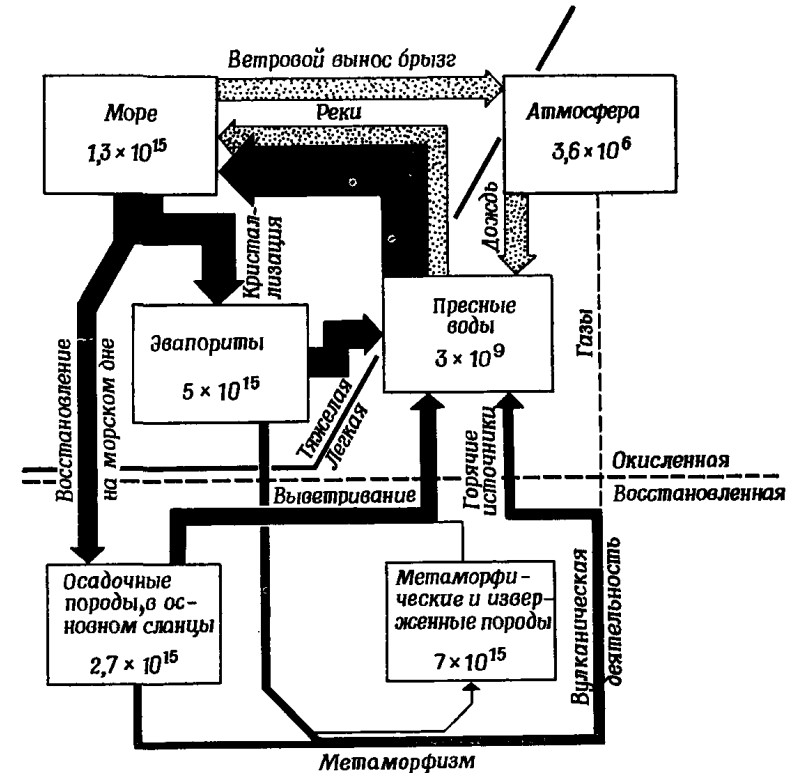
Сравнивая данные по Земле в целом, мы видим, что сейчас в атмосфере и гидросфере, вместе взятых, содержится гораздо больше O<sub>2</sub>, чем CO<sub>2</sub>. Общий запас свободного кислорода (он содержится главным образом в атмосфере) оценивается примерно в  $60 \cdot 10^{18}$  моль, а запас CO<sub>2</sub> (находящийся в основном в гидросфере) составляет лишь около  $3 \cdot 10^{18}$  моль [38]. Чтобы мог возникнуть весь свободный кислород Земли, из недр за геологическое время должны были выделиться значительные количества CO<sub>2</sub>. Это вполне возможно: в вулканических газах очень много двуокси углерода.

Запасы ископаемых каустобиолитов оцениваются в  $248 \cdot 10^{20}$  г C, или  $20 \cdot 10^{20}$  г-атомов C. По сравнению с запасом кислорода в атмосфере ( $60 \cdot 10^{10}$  моль) это очень много. Видимо, большая часть кислорода, связанная ранее с «избыточным» углеродом, пошла на окисление первичных породообразующих минералов земной коры.

Трудности, с которыми приходится сталкиваться при составлении более достоверного геохимического баланса, мы рассмотрим сейчас на примере круговорота серы.

## 5. КРУГОВОРОТ СЕРЫ

Круговорот серы может послужить примером более детально изученного геохимического баланса одного элемента. На фиг. 81 показано, что сера в больших количествах встречается и на поверхности Земли, и в земной коре как в окисленной (сульфаты), так и в восстановленной (сульфиды) форме. Геохимики смогли понять



Фиг. 81. Геохимический цикл серы [20]. Массы указаны в метрических тоннах.

Прерывистая линия делит схему на две части: выше линии — сера в основном в окисленном до сульфата состоянии; ниже — в виде сульфидов. Ломаная сплошная линия также делит схему на две части: слева от нее — сера обогащена тяжелым изотопом (<sup>34</sup>S); справа и ниже — сера обогащена легким изотопом (<sup>32</sup>S).

круговорот серы благодаря тому факту, что сера имеет два стабильных изотопа — обычный <sup>32</sup>S и более тяжелый <sup>34</sup>S (около 4,2% количества первого изотопа). В природе нередко происходит фракционирование этих изотопов (абиогенным или биогенным путем), поэтому удастся проследить пути «легкой» и «тяжелой» серы.

В своей окисленной форме сера присутствует главным образом в морской воде и осаждается в виде гипса, образуя так называемые

эвапориты, или пласты соли. В тонкозернистых отложениях типа черных сланцев сульфаты восстановлены биогенным путем до сульфидов (главные восстановители — бактерии *Desulphovibrio desulphuricans* и другие, сходные с ними). Кроме того, в изверженных и метаморфических породах, а также в рудных жилах встречаются первичные сульфиды. Запасы серы в реках, пресноводных озерах и атмосфере незначительны по сравнению с содержанием ее в море и в горных породах.

Хотя оценки количеств восстановленной и окисленной серы, участвующих в ее круговороте, хорошо обоснованы, сравнивая эти оценки с величинами для свободного кислорода и двуокси углерода, мы замечаем некое несоответствие. В сульфидах содержится в общей сложности  $9,7 \cdot 10^{15}$  т серы ( $9,7 \cdot 10^{21}$  г), что приблизительно соответствует  $30\,000 \cdot 10^{18}$  г-атомов. В сульфатах содержится  $6,3 \cdot 10^{15}$  т серы ( $6,3 \cdot 10^{21}$  г); это примерно  $20\,000 \cdot 10^{18}$  г-атомов. Если считать, что первично вся сера была в восстановленной форме и что в окислении участвовал лишь биогенный атмосферный кислород, то только за счет этого окисления в земной коре должно быть отложено  $20\,000 \cdot 10^{18}$  г-атомов углерода. Это плохо согласуется с величиной  $2000 \cdot 10^{18}$  г-атомов углерода (см. предыдущий раздел).

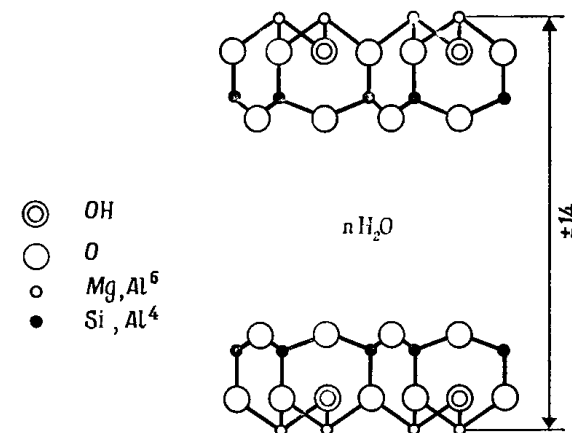
Очевидно, здесь есть какая-то ошибка, а может быть и не одна. Во-первых, я думаю, что оценка общего количества углерода в коре сильно занижена, ведь учтены только запасы горючих ископаемых, но не рассеянный в породах углерод. Однако общее количество этого рассеянного углерода в осадочных породах типа черных сланцев или полосчатых кремнистых сланцев докембрия оценить трудно. Во-вторых (и здесь количественная оценка, по-видимому, совсем невозможна), не исключено, что часть серы была уже окислена в самые ранние периоды геологической истории. Как мы узнаем из следующих глав, в те времена кислород поступал в атмосферу в результате неорганического фотоллиза воды, а углерод при этом, разумеется, не откладывался. Хотя содержание кислорода в атмосфере оставалось ниже «уровня Юри» (0,001 его современного содержания; см. фиг. 99), окисление, как упорно подчеркивают Беркнер и Маршалл [5, 6], должно было идти весьма активно, так как озон мог возникать на самой поверхности Земли или вблизи нее.

Возможны и другие объяснения. Я не буду их здесь рассматривать; надеюсь, читатель теперь видит, с какими трудностями связана интерпретация данных геохимии.

## 6. РОЛЬ ГЛИН

Глина — одна из самых распространенных пород, часто встречающаяся и на поверхности Земли, и в осадочных толщах. Насколько можно судить по древнейшим осадочным породам, отложенным

в раннем докембрии, глины были так же широко распространены и тогда. Глины — крайне тонкозернистые породы. Входящие в их состав минералы объединяются в группу так называемых *глинистых минералов*, изучение которых стало возможным лишь после разработки методов рентгеноструктурного анализа. Глинистые минералы сходны между собой по строению и составу. Они состоят



Фиг. 82. Схематическое сечение кристаллической решетки монтмориллонита, одного из глинистых минералов наиболее простого строения [9].

Силикатные слои разделены непрочно связанными с минералом молекулами воды. Из-за изменения числа молекул воды глины набухают при намокании и уменьшаются в объеме, высыхая. Максимальное расстояние между силикатными слоями — около 1,4 нм. Глины, вероятно, играли важную роль в процессе возникновения жизни. Отдельные кристаллы очень малы и обладают пластинчатой структурой, вследствие чего у них очень велико отношение поверхности к массе. Поэтому они могли адсорбировать большие количества различных соединений «первичного бульона», что отмечено еще в 1951 году Берналом. Другое важное свойство глин — это способность обмениваться катионами с окружающей пресной или морской водой, способствуя сохранению постоянства состава воды.

из силикатов алюминия и других катионов и содержат много воды. Глинистые минералы обладают ярко выраженной пластинчатой структурой, напоминающей строение слюд, но здесь отдельные кристаллы гораздо мельче, а химический состав гораздо более изменчив.

Кристаллическая решетка глинистых минералов состоит из правильных, тонких, параллельных, лежащих стопкой слоев прочно связанных ионов. В промежутках между слоями располагаются катионы и гидроксильные группы. Расстояние между параллельными слоями может изменяться в зависимости от количества катионов и гидроксильных групп. В случае монтмориллонита (фиг 82) в промежутки между отдельными пластинками могут включаться молекулы воды. Поэтому глины при намокании набухают, а высыхая, уменьшаются в объеме.

## 7. СОСТАВ МОРСКИХ ВОД

Мы так много говорим о «первичном бульоне», который в умах очень многих авторов тесно связан с океаном, что было бы уместно рассмотреть здесь свойства морской воды. В наши дни общий объем океанов составляет  $1,37 \cdot 10^9$  км<sup>3</sup>, или  $1,37 \cdot 10^{21}$  л. Каков был их объем раньше, неизвестно. Если не принимать во внимание местные отклонения, обусловленные испарением или поступлением пресной речной воды, состав морской воды во всем мире поразительно постоянен. Основные ее компоненты перечислены в табл. 21. Соленость моря равна 3,5%, pH  $8,2 \pm 0,2$ , а окислительно-восстановительный потенциал  $12,5 \pm 0,2$ .

Таблица 21

Концентрации основных компонентов нормальной морской воды [19]

Компоненты	Концентрация, ммоль/л	Компоненты	Концентрация, ммоль/л
Na <sup>+</sup>	480,80	Cl <sup>-</sup>	560,70
Mg <sup>2+</sup>	54,78	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	28,84
Ca <sup>2+</sup>	10,46	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,38
K <sup>+</sup>	10,18	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,27
Str <sup>2+</sup>	0,10	Br <sup>-</sup>	0,85

Раннее соленость морской воды объясняли таким образом: вначале океаны состояли из пресных водных масс, постепенно осоловившихся из-за поступления с речным стоком растворенных веществ. Заметим, кстати, что на этой концепции была основана одна из самых первых попыток оценки возраста Земли. Зная современный вынос растворенных веществ с суши и современный объем и соленость океана, можно рассчитать, когда началось накопление солей в морской воде<sup>1</sup>. Но этот метод столь же несостоятелен, сколь прост на первый взгляд: ведь мы не знаем, сколько растворенных веществ несли древние реки, каков был объем древних океанов, сколько солей попало в известняки и эвапориты и сколько вернулось в круговорот при позднейшей повторной эрозии.

Лишь в 50-х годах XX в. теория постоянно осоложняющегося океана была серьезно пересмотрена. По различным соображениям было принято, что время существования отдельных ионов в океане мало по сравнению с геологической историей. Другими словами, соленость морской воды — результат не накопления, а постоянной

<sup>1</sup> Впервые этот принцип применил ученик Ньютона Эдмунд Галлей (1656—1742). Он оценил возраст Земли примерно в 10 000 лет.— *Прим. перев.*

смены ионов. Кроме того, установилось мнение, что поразительное постоянство pH морской воды на всем земном шаре объясняется буферным действием карбонатной системы, т. е. взаимодействием между Ca CO<sub>3</sub>, Ca<sup>2+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

В 1961 г. шведский химик Силлен выступил с возражениями против этой теории [45]. Он разработал непротиворечивую модель морской воды, используя константы химической активности основных компонентов морской воды и правило фаз Гиббса. Модель Силлена, прекрасно согласующаяся с современным составом морской воды, активно защищалась им в серии статей, нередко с весьма эмоциональными названиями, например «Как морская вода приобрела свой нынешний состав». Эта теория не претерпела значительных изменений, так что, кроме самой первой статьи (1961 г.), с ней можно ознакомиться и по статьям 1967 года [50, 51].

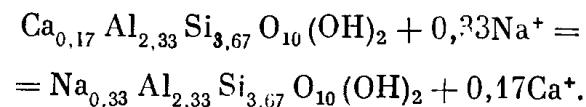
Кратко эта теория сводится к следующему. В ней учитываются лишь 8 компонентов морской воды: H<sub>2</sub>O, HCl, SiO<sub>2</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>, NaOH, KOH, MgO и CaO. В равновесии должны находиться 7 фаз: 1) водный раствор с составом, близким к составу морской воды, 2) кварц, 3—6) глинистые минералы каолинит, гидрослюда (или иллит), хлорит и монтмориллонит и 7) филлипсит или другой цеолит. Состав водного раствора и всех твердых веществ при данном давлении, температуре и концентрации ионов Cl<sup>-</sup> остается постоянным. Добавление CO<sub>2</sub> приведет к осаждению известняка CaCO<sub>3</sub>; добавление FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — к осаждению глауконита и гетита, но состав раствора, т. е. состав морской воды, почти не изменится.

По Силлену, состав морской воды забуферен не карбонатной системой, а тем, что он, как химик, называет «тонкозернистыми алюмосиликатами». Геолог назовет эти вещества глинистыми минералами. Геохимики и минералоги, занимающиеся глинами, подтвердили мнение Силлена [19, 26, 27, 29]. Мы покажем, как действует этот буферный механизм, на простом примере. На самом деле глинистые минералы устроены гораздо сложнее, чем изображено на упрощенной схеме строения монтмориллонита (фиг. 82). В кристаллической решетке глинистых минералов могут чередоваться не два, а три слоя, причем относительное число катионов в каждом из них может значительно варьировать. Глинистые минералы из рек и озер явно отличаются по своему составу от глинистых минералов океанского дна. Почти все речные и озерные воды, особенно соприкасающиеся в обширных бассейнах рек с мергелями и известняками, насыщены кальцием. Эта так называемая жесткая вода выщелачивает из кристаллической решетки глинистых минералов натрий и магний. Минералы, таким образом, распадаются. Попадая в морскую воду, которая из-за высокого содержания Na может считаться щелочной, они «восстанавливаются», т. е. натрий и магний опять входят в кристаллическую решетку. Именно из-за этой способности глинистых минералов терять и присоединять не-

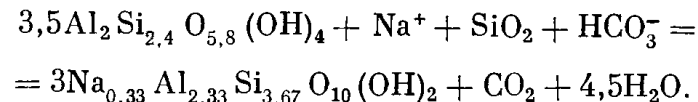
которые катионы в зависимости от состава воды они и обладают буферным действием.

Схема реакций разрушенных глинистых минералов с морской водой такова. Вначале происходит интенсивный обмен катионами. Кальций, обычно преобладающий в глинистых минералах речного происхождения над другими катионами, замещается  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{K}^+$ . Кроме того, восстанавливаются иллит и хлорит, в которых из катионов оставался только алюминий. В их кристаллические решетки включается калий или магний (или оба эти катиона). Наконец, считается возможной и третья реакция — образование новых, так называемых *аутигенных* глинистых минералов при соединении веществ, растворенных в пресной и морской воде [19].

Например, реакция между кальциевым речным и натриевым океаническим монтмориллонитом протекает согласно следующему уравнению:



Реакция восстановления (воссоединения) распавшихся алюмосиликатов идет следующим образом:

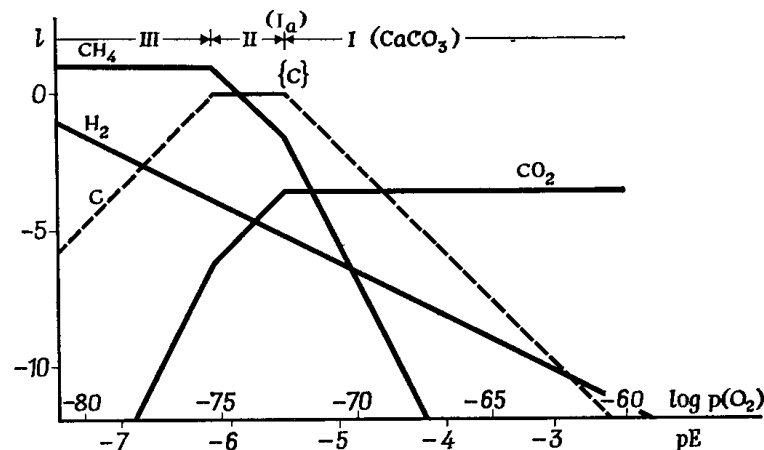


## 8. СИЛЛЕН; «МИФ О ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКОМ БУЛЬОНЕ»

Рассмотренная модель устойчивого химизма океанских вод не изменяется при уменьшении парциального давления кислорода [19]. Значит, химизм морской воды сам по себе не может служить основой для реконструкции состава древней атмосферы. Однако, зная реакционную способность отдельных компонентов силленовской модели, мы можем попытаться рассчитать, при какой концентрации свободного кислорода станет невозможным существование в океане свободных «органических» молекул, иными словами, при каком содержании кислорода в атмосфере молекулы типа  $\text{CH}_4$  в океане окисляются.

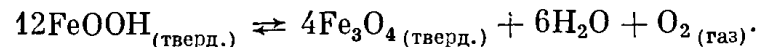
Необходимые расчеты выполнил сам Силлен, распространив свои выводы о равновесии между твердой, жидкой и газообразной фазами на равновесие соединений углерода и морской воды. Расчеты показали, что  $\text{CH}_4$ , например, будет иметь «разумную химическую активность» (на языке химиков это означает — сможет существовать) только при крайне низких давлениях кислорода (фиг. 83). Согласно этим расчетам,  $\text{CH}_4$  мог бы присутствовать в морской воде в значительных количествах только при  $\log p(\text{O}_2) =$

$= -75$ . В наше время в атмосфере содержится  $6 \cdot 10^{23}$  молей свободного кислорода, т. е. парциальное давление кислорода  $p(\text{O}_2)$  составляет 0,21 атм. Умножив число молей на число Авогадро, получим число молекул свободного кислорода на Земле:  $3,6 \cdot 10^{43}$ . Парциальное давление, соответствующее  $\log p(\text{O}_2) = -75$ , означает  $6/10^{23}$  частей молекулы кислорода на всей Земле. Такую атмосферу, конечно, можно назвать бескислородной.



Фиг. 83. Зависимость логарифмов активности ( $l$ ) для  $\text{C}_{\text{тверд.}}$ ,  $\text{CH}_{4\text{газ}}$ ,  $\text{CO}_{2\text{газ}}$  и  $\text{H}_{2\text{газ}}$  от  $\log p(\text{O}_2)$  и  $pE$  в силленовской модели морской воды [47]. Можно выделить следующие области: I — присутствует  $\text{CaCO}_{3\text{тверд.}}$ ; Ia — переходная между I и II, присутствуют и  $\text{CaCO}_{3\text{тверд.}}$  и  $\text{C}_{\text{тверд.}}$ ; II — присутствует  $\text{C}_{\text{тверд.}}$ ; III — нет ни  $\text{CaCO}_3$ , ни C. Показана только восстановительная часть области I. В современных условиях  $\log p(\text{O}_2)$  равен  $7 \cdot 10^{-1}$ , а  $pE = \pm 12,5$ .  $\text{CH}_4$  имеет нулевую химическую активность (т. е. может существовать) только при падении парциального давления кислорода ниже  $\log p(\text{O}_2) = -75$ .

Таковы расчеты химика. Они основаны на экстраполяции констант равновесия и активности, найденных в растворах с поддающейся измерению концентрацией исследуемых ионов. Такая экстраполяция формально допустима, но для нашей проблемы она не имеет смысла. Конечно, химическое равновесие в реакциях с участием свободного кислорода еще недостаточно изучено. Так, Силлен [47] разбирает равновесие между гематитом и магнетитом:



В зависимости от активности участвующих в реакции веществ равновесие может быть достигнуто при парциальных давлениях кислорода от  $p(\text{O}_2) = 10^{-1,1}$  (что близко к современному значению  $p(\text{O}_2) = (10^{-0,7})$  до  $p(\text{O}_2) = 10^{-11,7}$ . Конечно, неясные исходные данные будут еще уточняться.

Но даже независимо от этой неопределенности приходится признать, что такая экстраполяция равновесных реакций совершенно

бессмысленна. Задолго до того, как будут достигнуты эти низкие концентрации, на первый план выступит кинетика, а настоящее равновесие не достигается. Другими словами, как уже было отмечено, настоящего равновесия между литосферой и бескислородной первичной атмосферой в целом не было. Как мы уже говорили, состав осадочных пород, формировавшихся в ранние периоды геологической истории, не зависел от равновесий (или зависел не только от них). Главным фактором была кинетика процессов, т. е. определяющую роль играла скорость окисления, выветривания, переноса и осаждения. Впрочем, все вышесказанное отнюдь не обесценивает работу Силлена, с интересом принятую и поддержанную всеми геохимиками, интересующимися этим предметом. Я только предостерегаю от слишком прямолинейного распространения этих вполне разумных выводов на другие проблемы.

Как станет ясно из следующих двух глав, вопрос о том, что именно играет преобладающую роль — кинетика или равновесие, для нас особенно важен при рассмотрении ситуации, при которой содержание свободного кислорода составляет от 0,001 до 0,1 его содержания в современной атмосфере; это соответствует парциальным давлениям примерно от 0,0002 до 0,02 атм, т. е.  $p(\text{O}_2)$  от  $7 \cdot 10^{-4}$  до  $7 \cdot 10^{-3}$ . Вопрос о возможности образования океанического «первичного бульона» решается, видимо, скоростью диффузии молекул кислорода в морской воде, которая и определяла возможность существования соединений углерода в первобытном океане. Но мы до сих пор не знаем, каково относительное значение кинетики и равновесия при этих уровнях содержания кислорода.

Чтобы придать смысл результатам своих расчетов, Силлен предложил несколько согласующихся с ними гипотез. Две из них мы рассмотрим. Первая состоит в том, что жизнь могла начаться с появления «органических» соединений, синтезированных в равновесных реакциях, протекавших в необычных условиях, например в очень кислых вулканических водах, или в смеси веществ, адсорбированных на глинах первобытных озер и лагун, или в сильно выпаренных растворах. В таких частично изолированных системах отпадают ограничения, связанные с количеством компонентов и другие, свойственные системе в целом. Другая гипотеза такова: «органические» вещества могли возникать в неравновесных реакциях, например в результате неорганического фотосинтеза под действием ультрафиолета, создававших эти вещества быстрее, чем они разрушались в других реакциях.

Мы уже говорили и будем говорить еще о первом предложенном здесь способе уйти от строгих ограничений, накладываемых константами равновесия. Пример подобных процессов мы видим в наши дни в лагунах, где вследствие испарения происходит отложение гипса и соли, хотя соленость океанской воды неизменна (3,5%). Из гл. X мы уже знаем, что такие «необычные» условия

среды были, очевидно, более распространены в спокойные геосинклинальные периоды, когда материки были нивелированы эрозией и окружены мелководными шельфовыми морями. Вот почему я, как геолог, предпочитаю думать, что если уж выбирать наиболее вероятную среду возникновения жизни из предлагаемых Силленом «необычных» сред, то это должны были быть именно подобные районы, а не кислые вулканические воды. К тому же в озерах и лагунах имеются пласты глин, на которых могли идти процессы адсорбции. Таким образом, берналовское «возникновение жизни на берегах океанов» [7] (гл. X, разд. 4) превращается скорее в «возникновение жизни в озерах и лагунах». Итак, рассмотренные выше равновесные реакции указывают, что «бульон» был, вероятнее всего, «озерным» или «лагунным», а не океаническим.

Вторая гипотеза (т. е. формирование «органических» веществ в неравновесных реакциях) кажется мне не менее важной, чем первая. Она означает, что преджизнь могла сохраняться, не будучи в равновесии со своей средой. Конечно, жизнь тоже не находится в равновесии с окружающей средой, но это неравновесное состояние поддерживается биохимическими реакциями в клетке, отделенной от внешнего мира полупроницаемыми мембранами. Преджизнь, не имея таких мембран, могла существовать лишь потому, что скорость образования свойственных ей соединений была выше, чем скорость их распада. Это вполне возможно: во-первых, от Солнца шел мощный поток квантов света, а во-вторых, окисление возникших за счет этой энергии веществ в бескислородной атмосфере было затруднено. Как видите, здесь мы вновь приходим от равновесных реакций к относительным скоростям синтеза и распада, а это уже область кинетики.

Подведем итог. В условиях равновесия «первичный бульон» не мог образоваться в обычных океанских водах, даже если океан соприкасался с бескислородной атмосферой. Но этот «бульон» мог возникать в необычных условиях вроде тех, которые создаются в озерах и лагунах. Впрочем, и здесь он, по-видимому, не находился в состоянии равновесия со средой. Следовательно, изучая проблему происхождения жизни, нельзя целиком полагаться на расчеты химического равновесия.

#### 9. СООТНОШЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В БИОГЕННЫХ И АБИОГЕННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

В гл. III мы уже говорили о том, что многие элементы фактически представляют собой смесь химически неразличимых изотопов, различающихся только по физическим свойствам, например по атомной массе. Тогда мы уделили основное внимание нестабильным изотопам, которые используются при определениях абсолют-



ного возраста в качестве геологических часов. Но стабильных изотопов существует гораздо больше, и сейчас мы поговорим о них.

Из многих проблем, связанных со стабильными изотопами, мы займемся вопросом об установлении биогенного или абиогенного происхождения некоторых веществ. Специалистов, занимающихся этой проблемой, интересуют в основном три элемента: углерод (С), кислород (О) и сера (S). Полный обзор литературы до 1959 года по изотопному составу этих, а также других элементов, важных для изотопной геологии, можно найти у Ранкамы [33]; с тех пор появились еще некоторые работы по сере [12, 20]. Я ограничусь здесь рассмотрением изотопов углерода, поскольку они особенно важны для нашей проблемы и, кроме того, на их примере мы можем ознакомиться с трудностями, встающими при работе со стабильными изотопами других элементов.

В атмосфере содержится четыре разные двуокиси углерода, различающиеся по изотопному составу:  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ,  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  и  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ . Наиболее распространены первые три типа молекул, причем  $^{12}\text{C}$  преобладает над  $^{13}\text{C}$ . Это видно из приводимых ниже данных, характеризующих соотношение фракций природной двуокиси углерода различного изотопного состава [33]:

Молекула	Приведенная толщина слоя, см <sup>1</sup>
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	320
$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	1,54
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$	0,67

В настоящее время в процессе фотосинтеза, осуществляемого зелеными растениями, достигается очень точное фракционирование изотопов углерода. Отношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  в них составляет от 90,0 до 92,9‰ отношения, определенного для так называемого «чикагского стандарта» — углеродистого вещества ископаемого белемнита<sup>2</sup>. В небиогенном углероде это отношение варьирует от 88,0 до 90,2‰. Как возникает такое различие в изотопном составе углерода, мы можем представить себе только в самых общих чертах. Фотосинтез представляет собой последовательность кинетических процессов, а не равновесных реакций. Значит, в каждой из последовательных реакций определяющую роль играет кинетика, а легкий изотоп реагирует в целом быстрее, чем тяжелый. С другой

<sup>1</sup> При нормальной температуре и давлении.

<sup>2</sup> Результаты определений изотопного состава выражают обычно относительно какого-либо условного стандарта. В качестве стандарта выбирают углеродсодержащее вещество, которое, во-первых, обладает «устоявшимся» изотопным составом (достаточно долго хранилось, например известняк или ископаемые скелеты животных) и, во-вторых, имеется в достаточных для работы количествах. Чикагский стандарт был принят группой ученых, работавшей в Чикаго. — *Прим. перев.*

стороны, метаболизм зеленых растений состоит не только из фотосинтеза, но и из других процессов, например дыхания, причем некоторые из них представляют собой равновесные реакции, а известно, что в реакциях ассоциации — диссоциации в соединениях с прочной химической связью преимущественно накапливается тяжелый изотоп. Разумно предположить, что характерное отклонение изотопного состава биогенного углерода и вариации этого состава в современных зеленых растениях объясняются разными причинами: отклонение от обычного отношения  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  возникает главным образом в процессе фотосинтеза, а разброс этого отклонения связан с другими метаболическими процессами.

Возможно, это объяснение неверно. Но так или иначе, в ископаемых соединениях углерода также обнаружен «биогенный тип» отклонения изотопного состава. В углероде из угля или графита всегда относительно больше  $^{12}\text{C}$ , чем в углероде из изверженных пород. Возможно, во втором случае связывание углерода в большей мере зависело от равновесных процессов, что и привело к обогащению  $^{13}\text{C}$ .

Заметим, что изотопный состав углерода угля и графита из осадочных пород раннего и среднего докембрия близок к изотопному составу растений нашей эпохи. Из этого делается вывод, что, во-первых, весь этот углерод имеет биогенную природу и, во-вторых, что жизнь существовала на Земле в период отложения самых древних осадочных пород, известных науке.

Однако такой вывод надо признать если не совершенно ошибочным, то, во всяком случае, необоснованным. Сходство изотопного состава говорит только о сходной степени фракционированности изотопов, т. е. о принципиальном сходстве процессов образования анализируемых веществ. Можно не сомневаться в том, что в неорганическом фотосинтезе, происходившем в условиях бескислородной атмосферы, кинетика играла не меньшую роль, чем в фотосинтезе органическом, протекающем в современных условиях. Итак, мы пришли к отрицательному заключению: сходство соотношения стабильных изотопов углерода в современных зеленых растениях и в биогенных отложениях с изотопным составом углерода древнейших осадочных пород еще не доказывает, что эти породы образовались биогенным путем. Это справедливо и для соотношения стабильных изотопов других элементов.

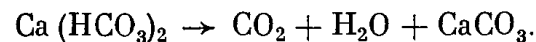
#### 10. МЕТАБОЛИЗМ ОРГАНИЗМОВ, СЕКРЕТИРУЮЩИХ КАРБОНАТ КАЛЬЦИЯ

Как мы знаем (гл. XII, разд. 8), организмы, образующие известняк, возникли в глубокой древности. Их метаболизм должен был отличаться от метаболизма современных известковых водорослей. Содержание кислорода в земной атмосфере 2,7 млрд. лет назад

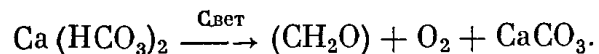
составляло в лучшем случае 1% его содержания в современной атмосфере, и метаболизм живого, разумеется, был мало похож на современный. Но эти отличия не должны были сильно сказываться на способности к отложению углекислого кальция. Биогенные известняки, описанные Мак-Грегором, могли быть созданы и примитивными фотосинтезирующими организмами вроде современных зеленых водорослей, и организмами с метаболизмом, сходным по типу с брожением, которых мы отнесли бы сегодня к анаэробам. Хотя я не могу обсуждать здесь этот аспект проблемы подробно, краткое рассмотрение способов биогенного образования известняка было бы полезно. Я воспользовался здесь сведениями, любезно предоставленными мне проф. К. Ван-Нилем (личное сообщение, 1967).

Отложение извести может быть результатом как неорганических, так и органических процессов. Например, кальцитовые отложения в сталактитовых пещерах — это абиогенные образования, а *травертин*, встречающийся в жарких странах в местах выхода подземных вод, — это пример современных биогенных известковых отложений.

Кальцитовые отложения сталактитовых пещер встречаются в виде натечных образований, покрывающих дно пещер, а также в виде сталактитов и сталагмитов. Все эти образования возникли при частичном выделении  $\text{CO}_2$  из обогащенных  $\text{CaCO}_3$  грунтовых вод, циркулирующих в породах, в которых образовалась пещера, и капающих с ее потолка. Этот процесс происходит следующим образом:



Если такие воды выходят на поверхность, то в них в противоположность темным пещерам обильно развиваются водоросли. В процессе фотосинтеза они потребляют  $\text{CO}_2$  из воды, и при этом осаждается  $\text{CaCO}_3$ :

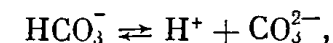
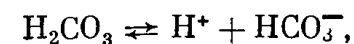
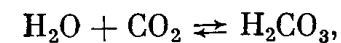


В этом уравнении, как и в других уравнениях, описывающих фотосинтез, символ  $(\text{CH}_2\text{O})$  означает синтезируемое организмами органическое вещество. Травертин, широко используемый как строительный и облицовочный камень (например, в Италии), широко распространен в странах Средиземноморья, где известняк является материнской породой почв. Травертин нередок и вокруг горячих источников; прекрасный пример — местность у Мамонтовых горячих источников в Йеллоустонском парке (США). Травертин приурочен к районам, где богатые карбонатом кальция грунтовые воды изливаются на поверхность.

Конечно, наряду с биогенным отложением известняка, связанным с фотосинтезом, происходит и неорганическое образование известняка при испарении родниковой воды. Но в освещенных солнцем местах его роль совершенно незначительна в сравнении с деятельностью водорослей. Абиогенный известняк возникает главным образом там, где нет солнечного света, например в пещерах.

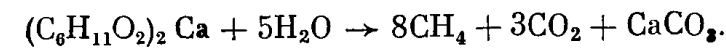
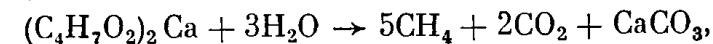
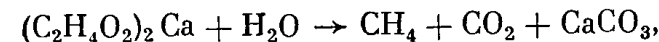
Но вот что интересно (я, как дилетант в биологии, был этим сильно удивлен): биогенный известняк может возникать также в результате деятельности некоторых бактерий, способных размножаться в бескислородной среде. Они относятся к хемо- и фотоорганотрофным микроорганизмам и фотолитотрофным зеленым и пурпурным серным бактериям (гл. VIII, разд. 7). Эти (или другие, со сходным метаболизмом) организмы могли играть важную роль в отложении известняков в условиях первичной бескислородной атмосферы. Ввиду того что, как уже говорилось, ранняя жизнь могла долго сосуществовать с преджизнью, к этим группам надо добавить еще фото«органотрофов».

В общем можно сказать, что такие организмы вызывают осаждение  $\text{CaCO}_3$ , повышая щелочность среды. В результате происходит смещение равновесия в сторону  $\text{CO}_3^{2-}$ :



А если концентрация  $\text{CO}_3^{2-}$  в среде с ионами кальция превышает произведение растворимости  $\text{CaCO}_3$  (около  $1 \cdot 10^{-8}$  М), то в осадок выпадает карбонат кальция. Примеры таких анаэробных процессов в современном живом мире — метановое брожение, восстановление микроорганизмами сульфатов и нитратов и бактериальный фотосинтез. Разумно заключить, что эти или сходные процессы метаболизма были одним из самых ранних проявлений жизни на Земле. Возможно, в результате этих процессов и возникли биогенные известняки раннего и среднего докембрия.

При метановом брожении [4, 40, 52] соли органических соединений, особенно соли жирных кислот, окисляются; одновременно идет восстановление  $\text{CO}_2$  до  $\text{CH}_4$ . Показано [52], что сбраживание ацетата, бутирата и капроата кальция протекает согласно уравнениям:

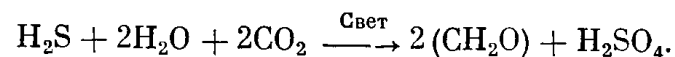
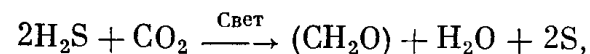


Поскольку среди продуктов этих реакций имеется  $\text{CO}_2$ , ионы  $\text{Ca}$ , казалось бы, могут оставаться в растворе в виде бикарбоната. Но образующийся одновременно метан, нерастворимый в воде, улетучивается в атмосферу, захватывая с собой и  $\text{CO}_2$ . Поэтому колбы, в которых идет такое брожение, вскоре покрываются изнутри слоем извести.

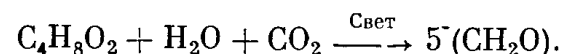
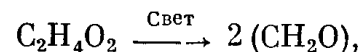
При восстановлении сульфата до сульфида одновременно идет окисление какого-либо вещества [32]. В этом случае возрастание щелочности объясняется тем, что серная кислота гораздо сильнее  $\text{H}_2\text{S}$ . Подобным же образом при восстановлении нитрата сильная азотная кислота превращается в неокисленные продукты —  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ; здесь также параллельно идет окисление субстрата [2,8].

Теперь познакомимся с деятельностью современных фотосинтезирующих бактерий. Они представлены тремя группами: 1) анаэробные зеленые серобактерии (*Chlorobacteria*), 2) анаэробные пурпурные, или красные, серобактерии (*Thiorhodaceae*) и 3) факультативно аэробные красные и коричневые пелсерные бактерии (*Athiorhodaceae*). Для всех этих групп бактерий характерны две выдающиеся черты. Во-первых, в отсутствие  $\text{O}_2$  их рост зависит от притока лучистой энергии, причем наиболее эффективен участок спектра с длинами волн от 730 до 1000 нм. Во-вторых, они не продуцируют кислорода.

Первые две группы являются фотолитотрофами (гл. VIII, разд. 7). Они окисляют неорганические соединения серы, например  $\text{H}_2\text{S}$ , элементарную серу или тиосульфаты до сульфатов; одновременно идет ассимиляция (т. е. восстановление)  $\text{CO}_2$  [24, 54]. Этот процесс схематически может быть выражен уравнениями



*Athiorhodacea* — фотоорганотрофы; обычно они используют органические вещества, главным образом жирные кислоты, превращая их в вещество своих клеток. Если субстрат реакции более восстановлен, чем  $(\text{CH}_2\text{O})$ , то одновременно идет ассимиляция  $\text{CO}_2$  [55]. Так, утилизация уксусной и масляной кислот может быть описана следующими суммарными уравнениями:



Все эти процессы ведут к увеличению рН вследствие того, что кислые вещества, в том числе  $\text{CO}_2$ , превращаются в нейтральное ве-

щество клетки. А при возрастании рН в любой среде, содержащей кальций, начинается осаждение  $\text{CaCO}_3$ .

Подводя итог, мы можем выделить среди современных организмов, метаболизм которых приводит к осаждению извести, две группы. Первая — это зеленые водоросли, эукариоты, живущие в аэробных, кислородсодержащих средах. Вторая группа — анаэробные прокариоты, способные к брожению и фотосинтезу. Хотя в условиях современной атмосферы водоросли являются самыми важными поставщиками известняка, разумно предположить, что на заре геологической истории отложение известняка было в основном результатом жизнедеятельности организмов, сходных с современными, живущими за счет брожения или анаэробного фотосинтеза. Эти древние формы ранней жизни развивались, конечно, в местах, защищенных от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца; они свободно контактировали с гидросферой и атмосферой, но, несмотря на это, жили в отсутствие кислорода.

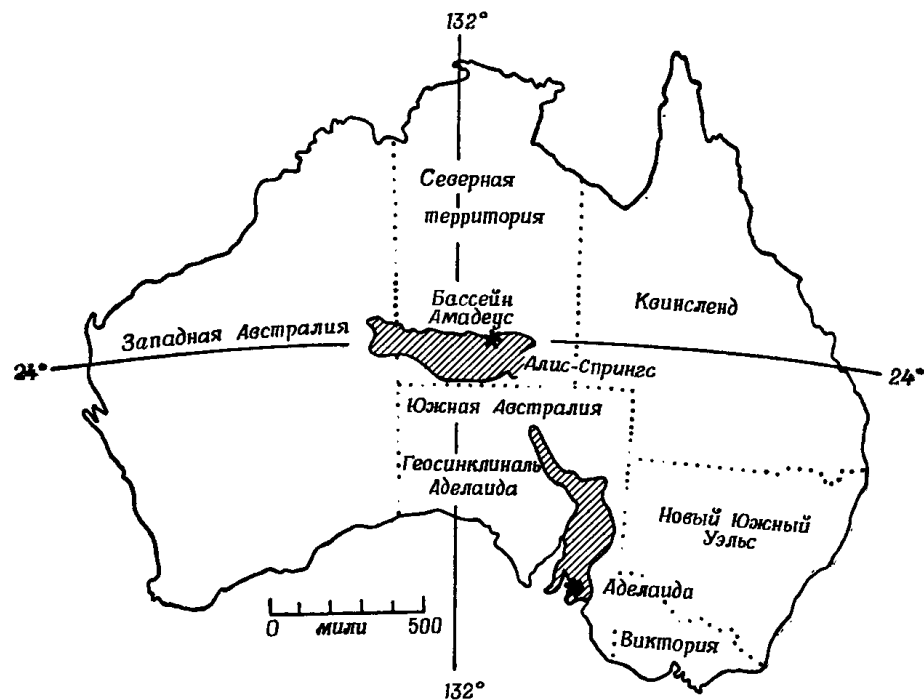
Ван-Ниль, исходя из теоретических соображений, постулировал, что самые ранние организмы, участвовавшие в отложении известняка, не были способны к фотосинтезу [56]. Затем их сменили микробы с бактериальным типом фотосинтеза, представлявшие собой логически необходимую эволюционную стадию перехода к фотосинтезу, свойственному зеленым растениям. Но, конечно, делая такие выводы, мы всегда должны помнить об опасностях увлечения сравнительной биохимией (см. гл. IX, разд. 5).

#### 11. ПРОЦЕССЫ ФОССИЛИЗАЦИИ. КАК ОТЛИЧИТЬ ПРОКАРИОТИЧЕСКИЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОРГАНИЗМЫ ОТ ЭУКАРИОТИЧЕСКИХ

Замечательные успехи, сделанные за последние годы в «охоте» за ископаемыми докембрия, иногда приводят к недооценке трудностей, связанных с различением ископаемых эукариотов и прокариотов. Более того, в литературе нередко встречается совершенно неверное утверждение, будто эти ископаемые можно считать «биологически или органически сохранными». Фоссилизация в подавляющем большинстве случаев — это замещение органического вещества пороодообразующими минералами. Такое замещение менее всего сказывается на твердых частях организма — на раковинах, скелетах, зубах, которые уже при жизни организма состояли главным образом из минеральных веществ — кальцита, кремнезема или фосфата. Но и эти части подвергаются перекристаллизации, а нередко — частичному или полному замещению. Мягкие части сами по себе сохраняются только при крайне редком стечении обстоятельств, например при погребении в асфальтовой луже или под толщей льда. Даже в угольных болотах молекулы исходного органического вещества прежде всего распадались, и органи-

ка сохраняется здесь в форме заново полимеризованных гуминовых кислот.

При *силицификации* (а большинство докембрийских ископаемых сохранилось именно благодаря этому процессу) происходит



Фиг. 84. Карта Австралии [41].

Показаны два бассейна осадконакопления, в которых найдены ископаемые остатки позднего докембрия. Формация Биттер-Спрингс находится в бассейне Амадеус, ископаемые остатки найдены к востоку от Алис-Спрингс. Гораздо более молодая фауна Эдианары, описанная в гл. XII, разд. 5, обнаружена в южной части бассейна Аделаида.

полное замещение. Чтобы получить представление о том, как силицификация изменила даже сравнительно молодые ископаемые остатки фанерозоя, достаточно сравнить фото 39 и 40. Первая фотография — снимок живой радиолярии, вторая — тонкого шлифа кремнистого сланца из мезозоя. Мы видим, что при фоссилизации мезозойских радиолярий сохранились только прочные раковины, а тонкие лучи исчезли. Все содержимое раковин, да, видимо, и они сами полностью перекристаллизованы.

У докембрийских организмов не было твердых раковин. И все же в некоторых исключительных случаях морфология этих организмов сохранялась при постепенном замещении органических молекул молекулами кремнезема. Это случалось потому, что остатки биологического вещества переместились к наружной границе бывшего организма, причем исходное органическое вещество

трансформировалось. Большая часть его превратилась в кероген, и осталось совсем немного разрушенного исходного материала. Поэтому нельзя отрицать, что «биологический материал» в этих ископаемых так или иначе сохранился. Но неверно, что, подвергшись фоссилизации, эти организмы «биологически сохранились».

Итак, при фоссилизации внутреннее строение клетки почти всегда пропадает. Все содержимое клетки теряет свою сложную структуру и замещается другими веществами. Этот процесс настолько обычен даже в более молодых осадочных породах, что находки ископаемых остатков с сохранившимся внутренним строением клеток чрезвычайно редки. Как правило, по ископаемым остаткам нельзя судить, были ли фоссилизированные организмы прокариотами или эукариотами.

Возможно, новая волна интереса к ископаемым остаткам докембрия принесет новые сведения, которые позволят нам приблизиться к решению этой проблемы. Первый шаг уже сделал Шопфом, изучавшим формацию Биттер-Спрингс в центральной Австралии (фиг. 84) [41]. В углистых кремнистых сланцах этой формации найдена богатая микрофлора, которую мы не будем рассматривать подробно, поскольку в эволюционном отношении она стоит на том же уровне, что и флора, описанная Пфлюгом из формации Белт в Северной Америке (гл. XII, разд. 6). Но сохранность австралийских находок настолько хороша, что в некоторых случаях удается различить внутренние клеточные структуры, которые можно интерпретировать как остатки ядер (фото 41). Если такая интерпретация верна, то эти ископаемые представляют собой остатки эукариотических клеток. Более того, среди ископаемых остатков другого вида, обнаруженных в той же породе, можно найти ряд форм, как будто бы представляющих собой разные стадии онтогенеза особей одного и того же вида. Если это действительно так, то эти стадии можно расположить в ряд, напоминающий последовательность процесса митотического деления, известного сейчас только у эукариотов (фото 42). Хотя это второе предположение менее убедительно, чем первое, однако, вместе взятые, они, видимо, служат веским доказательством существования эукариотических организмов в период образования формации Биттер-Спрингс.

Возраст этой формации не определен с достаточной точностью, но он должен составлять около 1 млрд. лет. Не удивительно, что в то время уже существовали эукариоты, так что сама по себе эта находка не имеет большого значения для нашей проблемы. Но она позволяет надеяться, что дальнейшие палеонтологические изыскания, возможно, когда-нибудь помогут нам выяснить, когда впервые появились эукариотические клетки. Для этого, конечно, понадобится кропотливая работа с исключительно хорошо сохранившимся материалом.

Важно подчеркнуть, что если в ископаемой клетке не удастся различить внутренней структуры, то это еще не доказывает, что она принадлежала прокариотическому организму. Поэтому утверждения вроде «столько-то миллиардов лет назад жизнь была еще прокариотической» необоснованны. В устах крупного палеонтолога такие заявления звучат очень уверенно, вводя в заблуждение неспециалистов. Единственное основание их состоит в том, что в раннем и среднем докембрии пока обнаружены лишь организмы, не обладающие различимой внутренней структурой клеток. Но в действительности неизвестно, были ли они прокариотами или это просто результат разрушения клеточных органелл при фоссилизации.

Точно так же мы пока не можем ответить на вопрос, когда же на Земле появились первые эукариоты. Только наличие в ископаемой клетке фоссилизированных органелл доказывает, что нам встретился эукариотический организм. К сожалению, такая сохранность — результат чрезвычайно редкого стечения обстоятельств, и потому утверждения вроде «возраст первых докембрийских эукариотических организмов составляет столько-то миллиардов лет» также следует признать чересчур смелыми. Пока мы знаем лишь один случай обнаружения эукариотических клеток из докембрия — рассмотренные нами находки Шопфа, и еще рано говорить о стратиграфическом положении этих ископаемых остатков.

## 12. ВОДРОСЛИ; БОТАНИЧЕСКАЯ И ПАЛЕОБОТАНИЧЕСКАЯ НОМЕНКЛАТУРА

Кроме того, неспециалиста может ввести в заблуждение номенклатура водорослей. Дело в том, что систематика высших растений и животных основана на совершенно иных принципах, чем систематика некоторых низших растений (в том числе водорослей), а также палеоботаническая систематика.

Систематика высших растений и животных основана, насколько это возможно, на принципе генетического родства. Два вида высших растений или животных, очень сходные на первый взгляд, могут быть отнесены к совершенно разным таксонам, если у них найдены достаточные различия в анатомии или в жизненном цикле или любые другие различия, доказывающие, что эти виды генетически не родственны друг другу. Этот принцип классификации живых существ восходит по сути к английскому натуралисту Джону Рею (1627—1705), который уже в 1693 году отнес дельфина и летучую мышь к млекопитающим, а не к рыбам и птицам соответственно.

Правила ботанической систематики отличаются от зоологических: они допускают в некоторых случаях классификацию, осно-

ванную лишь на внешнем сходстве. Более всего это относится к палеоботанике, а также к вымершим и современным водорослям. Эти организмы делятся на так называемые «группы форм», основанные только на морфологии. Дело в том, что для этих организмов мы еще не в состоянии установить филогенетическую классификацию. Поэтому приходится пока довольствоваться хотя бы классификацией, основанной на внешнем виде организмов.

Все это, конечно, строго сформулировано в международном кодексе правил ботанической номенклатуры, но неспециалиста такое положение вещей может совершенно запутать. Все мы, как правило, воспитаны на филогенетической систематике высших растений и животных, и, встречая выражение «родственные виды», мы думаем, что речь идет о видах, которые, различаясь в той или иной степени по внешнему виду, имеют сходное строение и близких предков. Мы не назовем летучую мышь «видом, родственным птицам» или дельфина «родственным рыбам». Но палеоботаническая систематика допускает подобные группировки.

Так, если выдающийся палеоботаник проф. Э. Баргхоорн сообщает, что ископаемое из формации Ганфлинт *Animikiea septata* ([3]; см. гл. XII, разд. 13) «по своему облику, размеру и форме похоже на современные роды *Oscillatoria* и *Lyngbya*», то это утверждение с точки зрения палеоботанической систематики вполне корректно. Но неискушенного читателя эти слова вводят в заблуждение: он не знает, что их надо понимать только в самом буквальном смысле, а именно что древнее ископаемое по своей морфологии, по внешнему виду напоминает современные водоросли. В это утверждение не вложено никакого филогенетического смысла — это дозволено правилами палеоботанической систематики. Но поскольку случилось так, что оба упомянутые здесь рода принадлежат к сине-зеленым водорослям, неботаник получает впечатление, что и ископаемая форма относится к сине-зеленым водорослям. Читая, что ископаемая форма *Gunflintia minuta* Barghoorn «напоминает по строению некоторые сине-зеленые водоросли и железобактерии», неспециалист поневоле приходит к неверным умозаключениям, так как он не знает, что «строение» в этом контексте означает всего лишь внешнюю форму.

В микробиологии выводы, делаемые по внешнему сходству, могут гораздо дальше отстоять от действительности, чем в систематике высших растений и животных, так как у микроорганизмов процессы метаболизма очень разнообразны (гл. VIII, разд. 7). Если применить принципы систематики микроорганизмов к высшим растениям и животным, то нам пришлось бы не только отнести дельфина к рыбам, а летучую мышь к птицам, но и объединить палочников и листовидок<sup>1</sup> с деревьями, на которых они питаются.

<sup>1</sup> Насекомые отряда привиденьевых, обладающие совершенной мимикрией. — *Прим. перев.*

И не просто объединить — нам пришлось бы считать, что эти виды насекомых крайне близки к соответствующим растениям — ведь сходство так велико!

При «расследовании» обстоятельств происхождения жизни на Земле нас, конечно, интересует не внешнее, а действительное, т. е. функциональное и генетическое, сходство. Приведенные выше цитаты из палеоботанических работ вполне корректны с точки зрения систематики, но читателю-неспециалисту приходится напоминать, что они не говорят о родстве между рассматриваемыми формами.

### 13. ОРГАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭНДОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Тема этого раздела является предметом споров, и здесь невозможно обсудить эти споры подробнее. Мы хотим поговорить о том, могли ли эндогенные геологические процессы влиять на органическую эволюцию или нет. В названии раздела проблема сформулирована несколько шире, чем обычная постановка вопроса, которая сводится к следующему: связаны ли так называемые «большие вымирания» фауны фанерозоя с эндогенными процессами типа горообразований или такой связи нет. Оглядывая всю историю жизни, знакомясь с ее эволюцией и с «переломными» моментами, мы можем задать вопрос, совпадают ли по времени ключевые события этой истории — например, первое появление самой жизни, или первое появление эукариотов, или животных и т. д. — с эндогенными геологическими процессами или такого совпадения нет.

В отношении фанерозоя вопрос этот, как уже сказано, остается спорным. Существует некая зыбкая корреляция между временем появления и исчезновения некоторых групп животных и периодами горообразования, но строгой временной связи между этими событиями нет. Такое положение дел напоминает мне утверждение крестьянина, что смена погоды связана с фазами луны. Но если начать его расспрашивать, то окажется, что он не может сказать, как же именно связана с лунной погодой — какая фаза предвещает хорошую или плохую погоду или, быть может, перемена погоды происходит через несколько дней после наступления очередной фазы луны.

Я думаю, что нередко представление о «больших вымираниях» основывается на излишнем упрощении, излишней схематизации истории живого мира. Что касается излишнего упрощения, вспомним, как геологи умещают историю целой эры, а то и всего фанерозоя на односторонней диаграмме (см., например, [30]). Периоды ускоренной эволюции (а мы знаем, что такое ускорение бывало и на стадии развития, и на стадии угасания некоторых групп животных) изображаются нередко короткой черточкой, а ведь на самом деле такой период мог продолжаться десяток миллионов лет,

а то и дольше. Знакомясь подробнее с историей группы, мы видим, что «переворот» на самом деле был постепенным, и все же неверное представление о внезапных «кризисах» глубоко внедрилось в наши умы благодаря такому упрощенному представлению событий.

Чрезмерная схематизация объясняется тем, что при установлении основных временных границ в геологии, границ между системами или границ, делящих систему на две или три части, использовались сравнительно узкие группы ископаемых остатков (например, кораллы, плеченогие, аммониты), которые были хорошо представлены в той или иной области и достаточно изучены к тому времени, когда устанавливались основные стратиграфические подразделения, а эволюция других важных групп ископаемых не принималась во внимание. Временные пределы существования той или иной группы были тогда известны недостаточно точно, а для многих групп это положение не изменилось и по сию пору. Этому есть две причины: во-первых, какие-то группы могли быть неполно представлены в изучаемой области; во-вторых, соотнести местную стратиграфию с другими районами, где данные группы представлены полнее, не всегда возможно. Практически все границы между системами фанерозоя, а также многие границы, делящие каждую систему на нижнюю, среднюю и верхнюю части, стали в последние десятилетия предметом споров на палеонтологических симпозиумах — и общее согласие так до сих пор и не достигнуто.

Из-за этой неуверенности границы таких групп, чтобы не ошибиться, распространяют на всю систему или несколько систем, в которых однажды найдены их представители. А это ведет к неверному представлению, будто все эти не родственные между собой организмы жили в точности в период образования данной системы, а «смена фауны» происходила в конце образования этой или следующей системы.

Ярчайший тому пример — фауна пермских отложений с острова Тимор<sup>1</sup>. Здесь найдено два района, богатых ископаемыми. Морские фауны этих районов крайне разнообразны, и обе очень строго приурочены к своим участкам. Почти нет видов, которые встречались бы в обеих местностях. Поскольку оба местообитания представляли собой экологически сходные коралловые рифы, остается предположить, что они различаются только возрастом. Фауна одного местообитания вымерла и была полностью заменена другой еще до образования второго танатоценоза. Следовательно, обе фауны просуществовали лишь часть пермского периода. Но поскольку они исключают друг друга и не похожи на другие извест-

<sup>1</sup> Остров в Индонезии, самый крупный в группе Малых Зондских островов. — *Прим. перев.*

ные пермские фауны (например, из Канзаса или с Сардинии), мы не можем понять, какая из них древнее, какая моложе. Здесь не помогает и региональная геология: эти пермские танатоценозы заключены в различные тектонические образования, сформировавшиеся во время альпийского орогенеза, и на основании стратиграфии определить относительный возраст фаун нельзя.

Хотя, как видно из этого описания, мы совершенно точно знаем, что ни одна из двух фаун не просуществовала весь пермский период, во всех учебниках сотни родов и видов с острова Тимор названы «пермскими» и отмечается, что время их существования занимает весь пермский период. Вот чем объясняется «большое вымирание» в конце пермского периода, один из самых выдающихся «переворотов» в истории фанерозоя! Ведь представление о нем опирается в основном на тиморские находки. Как видим, факты, как будто бы указывающие на существование в фанерозое «переломов в развитии фауны», нуждаются в критической переоценке.

Конечно, обсуждение проблемы в целом еще далеко не закончено, и я знаю, что у меня найдется немало противников, горячо защищающих строгую корреляцию «больших вымираний» и некоторых эндогенных процессов. Что любопытно — органическую эволюцию, постепенное развитие фауны, обычно не связывают с такими процессами. Но для нас гораздо важнее этот вопрос, ведь в основном нас интересует возникновение жизни и ее развитие, а не история какой-то одной группы животных, переживающей расцвет в то время, как другие группы вымирают.

Перечисляя примеры «положительных» событий в истории живого мира (в противоположность «большим вымираниям»), мы можем назвать появление твердых наружных скелетов в самом начале фанерозоя. Это произошло в спокойный геосинклинальный период, когда не было никаких горообразовательных переворотов. Геологическая история разворачивалась в то время так равномерно, что во многих местах Земли трудно провести грань между докембрием и кембрием в регулярной последовательности согласно залегающих пластов осадочных пород. Другие важнейшие этапы эволюционного развития животного мира в фанерозое, например появление первых амфибий, первых млекопитающих, многих важных групп аммонитов и двустворчатых моллюсков и многие другие, также связаны с более спокойными периодами геологической истории и не могут быть соотнесены с эндогенными процессами, скажем с главными фазами горообразования. Итак, если говорить о фанерозое, то мы можем сделать вывод, что, хотя многие геологи и настаивают на корреляции между «большими вымираниями» и главными периодами горообразования, о такой корреляции между эндогенными процессами и эволюционными приобретениями живого не может быть и речи.

«Но если это так, — может спросить читатель, — то почему тогда развитие жизни в докембрии так явно приурочено к границе между средним и поздним докембрием? Ведь эта граница, в понимании Голдича [14], да и автора этой книги, проведена на основании датировок изверженных пород, т. е. связана с крупным горообразованием». Ответ прост: потому, что мы еще мало знаем о докембрии.

Как мы видели, стратиграфия докембрия еще находится в зачаточном состоянии. Ее разработке до сих пор мешают трудности соотнесения старых, неверно проведенных стратиграфических границ, основанных на определениях относительного возраста, с новыми, проводимыми на основании данных об абсолютном возрасте. Пока положение дел не улучшится, обсуждая такие глобальные проблемы, как наша, мы можем говорить только о самых крупных подразделениях докембрия. Специалист по региональной геологии, изучающий ограниченный участок какого-то одного древнего щита, может использовать литостратиграфическое деление и выделять в докембрии, например, «гуронский период». Но он не может быть уверен в том, что его «гуронский период» охватывает тот же промежуток времени, что и «гуронский период» другого геолога, изучающего другой древний щит или даже другую часть того же древнего щита. Скорее всего эти периоды не совпадут.

Итак, мы используем подразделение докембрия, основанное на абсолютных датировках, т. е. на последовательности главных периодов складчатости, только потому, что пока это единственная хроностратиграфия, пригодная для всех древних щитов. По моему глубокому убеждению, дальнейшие исследования покажут, что основные эволюционные достижения живого имели место в спокойные геосинклинальные периоды. Вероятно, в течение всей истории жизни, как и в фанерозое, эти достижения не были приурочены к главным орогенезам, но распределялись более или менее равномерно, вне связи с очередными горообразованиями. Но чтобы строго доказать это, нам еще многого недостает.

#### 14. ПОСТОЯНСТВО ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В этой главе мы должны рассмотреть еще один вопрос. Речь идет об устойчивости температуры земной поверхности вот уже примерно в течение 3 млрд. лет. Этот вопрос не так уж важен в связи с проблемой происхождения жизни, но такое постоянство температуры сделало возможным сохранение и дальнейшее развитие жизни.

Ведь если в геологической истории был период, когда вся жизнь на Земле подверглась истреблению и перестал производиться биогенный кислород, то свободный кислород, накопившийся к

тому времени в атмосфере, должен был быстро израсходоваться на окисление минералов горных пород. Атмосфера вернулась бы в свое примитивное состояние, и потребовалось бы повторение всех ранних процессов неорганического фотосинтеза и биопоэза. Но ведь результат разнообразных процессов отбора, действовавших на протяжении стадии биопоэза и дальнейшей эволюции жизни, зависит от множества не связанных между собой факторов, например от мутаций и факторов среды, так что наверняка повторение всех этих процессов привело бы уже к другому результату. Даже если бы развился похожий тип химизма жизни, то морфология представителей второго цикла жизни на Земле наверняка отличалась бы от «первой попытки». Поскольку до сих пор мы не находим свидетельств такого повторения, можно утверждать, что в течение последних 3 млрд. лет или около того температура поверхности Земли оставалась благоприятной для жизни.

Примерно 3 млрд. лет жизнь имеет в своей основе белок, а мы знаем, что это «деликатное» соединение. Белок не вынес бы геологически длительных периодов замерзания или нагрева. Значит, за все эти 3 млрд. лет температура Земли могла отклоняться от среднего значения не более чем на несколько десятков градусов в ту или другую сторону. Иными словами, на протяжении всей геологической истории эта температура сохраняла удивительное постоянство.

Тут, видимо, требуется сделать оговорку для читателя-специалиста, который знает по обычной геологической литературе, что в прошлом отмечены значительные вариации температуры, приводившие, например, к ледниковым периодам. Действительно, оледенения бывали в геологической истории. Последнее из них случилось, по геологическим меркам, совсем недавно — примерно 50 000 лет назад. Более того, мы с вами, вероятно, живем не в послеледниковый период, а в межледниковье, хотя, кстати говоря, человек может вольно или невольно предотвратить наступление очередного ледникового периода, влияя на климат своей технической деятельностью. Известны и более ранние ледниковые периоды, например в позднем каменноугольном периоде и в перми, 250—200 млн. лет назад, а также в позднем докембрии, около 600 млн. лет назад. Кроме ледниковых периодов, имелись, по-видимому, и теплые периоды, но их свидетельства труднее обнаружить. Вероятно, один из таких теплых периодов был в перми, когда после очередного оледенения на всем земном шаре образовалось много эвапоритовых отложений.

Итак, на протяжении геологической истории ледниковые и теплые периоды сменяли друг друга. Конечно, они были связаны со значительными колебаниями климата, но ведь эти колебания никогда не распространялись на всю Землю, а затрагивали лишь определенные зоны. Так, во время последнего оледенения не

исчез ни тропический влажный лес, ни коралловые рифы — просто сдвинулись их южные и северные границы. Но ни в один геологический период поверхность всей Земли не подвергалась замораживанию или чрезмерному нагреву. Таким образом, несмотря на то что в истории Земли случались ледниковые и, по-видимому, теплые периоды, никогда не бывало так, чтобы вся Земля стала непригодной для жизни.

Такое поразительное постоянство температуры земной поверхности объясняется, вероятно, в основном парниковым эффектом, обусловленным современной атмосферой. Этот эффект «амортизирует» колебания независимых факторов, совместно определяющих температуру поверхности Земли. Наиболее важные из этих переменных — солнечная радиация, тепловой поток из недр и аккумуляция тепла атмосферой.

Солнечная радиация — главный источник тепла для земной поверхности. По современным представлениям, за последние несколько миллиардов лет ее интенсивность не менялась. По-видимому, мы достаточно хорошо понимаем простые ядерные реакции, разогревающие Солнце, и можем довольно уверенно экстраполировать их назад, в геологическое прошлое. Если не принимать во внимание небольшие колебания активности типа цикла солнечных пятен и т. п., то вряд ли можно сомневаться в том, что за несколько миллиардов лет геологической истории температура Солнца не менялась<sup>1</sup>.

Тепловой поток из недр еще мало изучен. Многие считают, что в ранние периоды геологической истории он мог быть гораздо сильнее, так как в то время на Земле было больше радиоактивных элементов, которые с тех пор распались. Но вряд ли этот приток тепла был настолько велик, что мог препятствовать существованию белковой жизни.

Аккумуляция тепла атмосферой — крайне сложный процесс со множеством обратных связей, препятствующих остыванию или нагреву при изменениях в поступлении тепла. Например, любое повышение температуры земной поверхности в результате усиления солнечной радиации или потока тепла из недр вызовет усиленное испарение, а значит, и усиленное образование облаков. При этом увеличится отражательная способность атмосферы, так называемое *альbedo* Земли, и уменьшится поступление тепла от Солнца на земную поверхность. При этом отмечаются также более сложные явления, такие, как сдвиг *тропопаузы*, т. е. границы между нижней частью атмосферы — тропосферой и вышележащим слоем — стратосферой. Все эти процессы будут сглаживать эффект увеличения притока тепла от Солнца или из недр Земли.

<sup>1</sup> Более подробное обсуждение этого вопроса читатель найдет в гл. XVII, разд. 6, где рассматривается возможность жизни на других планетах.



Итак, механизм аккумуляции тепла атмосферой с его разнообразными обратными связями может эффективно сглаживать довольно значительные колебания притока тепла. Поэтому наша Земля с ее атмосферой — очень хорошая оранжерея, и это обстоятельство, конечно, сыграло важную роль в возникновении и дальнейшем развитии жизни на Земле. Поскольку свойства атмосферы, играющие важную роль в определении парникового эффекта, обусловлены главным образом присутствием в ней водяных паров, которые, конечно, имелись и в первичной атмосфере, можно считать, что этот эффект проявлялся уже на заре геологической истории.

#### Список литературы

1. Allen D. E., Gillard R. D., Stereoselective effects in peptide complexes, Chem. Commun., 1967, 1091—1092 (1967).
2. Allen M. B., van Niel C. B., Experiments on bacterial denitrification, J. Bacteriol., 64, 397—413 (1952).
3. Barghoorn E. S., Tyler S. A., Microorganisms from the Gunflint chert, Science, 147, 563—577 (1965).
4. Barker H. A., Bacterial Fermentations. CIBA Lectures in Microbial Biochemistry, Wiley, New York, N. Y., 95, 1956.
5. Berkner L. V., Marshall L. C., On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere, J. Atmospheric Sci., 22, 225—261 (1965).
6. Berkner L. V., Marshall L. C., Limitation on oxygen concentration in a primitive planetary atmosphere, J. Atmospheric Sci., 23, 133—143 (1966).
7. Bernal J. D., The Physical Basis of Life, Routledge and Paul, London, 80, 1951.
8. Beijerinck M. W., Minkman D. C. J., Bildung und Verbrauch von Stickstoffoxydul durch Bakterien, Zentr. Bakteriolog. Parasitenk., 25, 30—63 (1910).
9. Bijvoet J. M., Kolkmeijer N. H., Mac Gillavry C. H., Röntgenanalyse van Kristallen, Centen, Amsterdam, 300 pp., 1948.
10. Calvin M., Chemical Evolution, Clarendon, Oxford, 278, 1969. (М. Кальвин, Химическая эволюция, изд-во «Мир», М., 1971.)
11. Cloud P. E., Pre-Metazoans and the origin of Metazoa. In: E. T. Drake (Editor), Evolution and Environment, Yale Univ. Press, New Haven, Conn., 1—72, 1968.
12. Dechow E., Jensen M. L., Sulfur isotopes of some Central African sulphide deposits, Econ. Geol., 60, 894—941 (1965).
13. Garay A. S., Origin and role of optical isomery in life, Nature, 219, 338—340 (1968).
14. Goldich S. S., Geochronology in the Lake Superior region, Can. J. Earth Sci., 5, 715—724 (1968).
15. Goldich S. S., Nier A. O., Baadsgaard H., Hoffman J. H., Krueger H., The Precambrian geology and geochronology of Minnesota, Minnesota Geol. Surv. Bull., 41, 193 (1961).
16. Govett G. J. S., Origin of banded iron formations, Geol. Soc. Am. Bull., 77, 1191—1212 (1966).
17. Gratzner W. B., Cowburn D. A., Optical activity of biopolymers, Nature, 222, 426—431 (1969).
18. Havinga E., Spontaneous generation of optically active substances, Biochim. Biophys. Acta, 13, 171—174 (1954).

19. Holland H. D., The history of ocean water and its effect on the chemistry of the atmosphere, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 53, 1173—1183 (1965).
20. Holser W. T., Kaplan I. R., Isotope geochemistry of sedimentary sulphates, Chem. Geol., 1, 93—135 (1966).
21. Клабуновский Е. И., Absolute asymmetric synthesis and asymmetric catalysis. In: Опарин А. И. (ред.), Origin of Life on Earth, Pergamon, London, 158—168, 1959.
22. Kroepelin H., Racemisation of amino acids on silicates. In: P. A. Schenk and I. Havenaar (Editors), Advances in Organic Geochemistry 1968, Pergamon, London, 535—542, 1969.
23. Kvenvolden K. A., Peterson E., Pollock G. E., Optical configuration of amino acids in Precambrian Fig Tree chert, Nature, 221, 141—143 (1969).
24. Larsen H., On the microbiology and biochemistry of the photosynthetic green sulfur bacteria, Kgl. Norske Videnskab. Selskab. Skrifter, 1, 1—205 (1952).
25. Lepp H., Goldich S. S., Origin of Precambrian iron formations, Econ. Geol., 59, 1025—1060 (1964).
26. Mackenzie F. T., Garrels R. M., Chemical mass balance between oceans and rivers, Am. J. Sci., 264, 507—525 (1966).
27. Mackenzie F. T., Garrels R. M., Bricker O. W., Bickley F., Silica in sea water: Control by silica minerals, Science, 155, 1404—1405 (1967).
28. Maclean I., Eglinton G., Dourachi-Zadeh K., Ackman R. G., Hooper S. N., Correlation of stereoisomerism in present day and geologically ancient fatty acids, Nature, 218, 1019—1023 (1968).
29. Millot G., Lucas J., Paquet H., Évolution géochimique par dégradation et aggradation des minéraux argileux dans l'hydrosphère, Geol. Rundschau, 55, 1—20 (1966).
30. Newell N., Revolutions in the history of life. In: C. C. Albritton (Editor), Uniformity and Simplicity — Geol. Soc. Am., Spec. Papers, 89, 63—92 (1967).
31. Nieuwenkamp W., Geschichtliche Entwicklung der heutigen petrogenetischen Vorstellungen, Geol. Rundschau, 55, 460—477 (1966).
32. Postgate J. R., Campbell L. L., Classification on *Desulphovibrio* species, the nonsporulating sulfate-reducing bacteria, Bacteriol. Rev., 30, 732—738 (1966).
33. Rankama K., Progress in Isotope Geology, Interscience, New York, N. Y., 705, 1963.
34. Rubey W. W., Geologic history of sea water, Bull. Geol. Soc. Am., 62, 1111—1147 (1951).
35. Rubey W. W., Development of the hydrosphere and the atmosphere, with special reference to probable composition of the early atmosphere, Geol. Soc. Am., Spec. Papers, 62, 631—650 (1955).
36. Rutten M. G., Remarks on the genesis of flints, Am. J. Sci., 255, 432—439 (1956).
37. Rutten M. G., Origin of life on earth, its evolution and actualism, Evolution, 11, 56—59 (1957).
38. Rutten M. G., Geologic data on atmospheric history, Palaeogeography, Palaeoclimatol., Palaeoecol., 2, 47—57 (1966).
39. Schelman J. A., Symmetry rules for optical rotation, Account Chem. Res., 1, 144—151 (1968).
40. Schnellen C. G. T. P., Onderzoekingen over de Methaangisting. Thesis, Tech. Univ., Delft, 137, 1947.
41. Schopf J. W., Microflora of the Butter Springs Formation, Late Precambrian, Central Australia, J. Paleontol., 42, 651—688 (1968).
42. Schwarzbach M., Das Klima der Vorzeit, 2nd ed., Enke, Stuttgart, 275, 1961.
43. Schwarzbach M., Climates of the Past, Pergamon, London, 328 pp., 1963.

44. *Schwarzbach M.*, Neuere Eiszeithypothesen, Eiszeitalter Gegenwart, 19, 250—261 (1968).
45. *Sillén L. G.*, The physical chemistry of sea water, Oceanography, Am. Assoc. Advan. Sci., 549—581, 1961.
46. *Sillén L. G.*, How has sea water got its present composition? Svensk Kemisk Tidsk., 75, 161—177 (1963).
47. *Sillén L. G.*, Oxidation state of the earth's ocean and atmosphere, I. A model calculation on earlier states. The myth of the «prebiotic soup», Arkiv. Kemi, 24, 431—456 (1965).
48. *Sillén L. G.*, Oxidation state of the earth's ocean and atmosphere, II. The behaviour of Fe, S and Mn in earlier states. Regulating mechanisms for O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>, Arkiv Kemi, 25, 159—167 (1966).
49. *Sillén L. G.*, Regulation of O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in the atmosphere: thoughts of a laboratory chemist, Tellus, 18, 198—206 (1966).
50. *Sillén L. G.*, Gibbs phase rule and marine sediments, Advan. Chem. Ser., 67, 57—69 (1967).
51. *Sillén L. G.*, The ocean as a chemical system, Science, 156, 1189—1197 (1967).
52. *Söhngen N. L.*, Het ontstaan en het verdwijnen van waterstof onder den invloed van het organische leven. Thesis, Tech. Univ., Delft, 137 pp., 1906.
53. *Герентьев А. П., Клабуновский Е. И.*, The role of dissimetry in the origin of living material. In: Опарин А. И. (ред.), Origin of Life on Earth, Pergamon, London, pp. 95—105, 1959.
54. *Van Niel C. B.*, On the morphology and the physiology of the purple and green sulfur bacteria, Arch. Mikrobiol., 3, 1—112 (1931).
55. *Van Niel C. B.*, The culture, general physiology, morphology and classification of the non-sulphur purple and brown bacteria, Bacteriol. Rev., 8, 1—118 (1944).
56. *Van Niel C. B.*, Evolution as viewed by the microbiologist. In: A. J. Kluyver and C. B. Van Niel (Editors), The microbe's contribution to biology, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 155—176, 1956. (А. Клюйвер, К. Ван-Ниль, Вклад микробов в биологию, ИЛ, М., 1959.)
57. *Van Niel C. B.*, A brief survey of the photosynthetic bacteria In: H. Gest, A. San Pietro and L. Vernon (Editors), Bacterial photosynthesis, Antioch Press, Yellow Springs, Ohio, 459—475, 1963.
58. *Wald G.*, The origin of optical activity, Ann. N. Y. Acad. Sci., 69, 352—368 (1957).

## ДВЕ АТМОСФЕРЫ: БЕСКИСЛОРОДНАЯ И КИСЛОРОДНАЯ (ДОАКТУАЛИСТИЧЕСКАЯ И АКТУАЛИСТИЧЕСКАЯ)

### 1. ПЕРВИЧНАЯ БЕСКИСЛОРОДНАЯ И СОВРЕМЕННАЯ КИСЛОРОДНАЯ АТМОСФЕРА

Из предыдущих глав мы узнали, что, по мнению биологов, существование примитивной бескислородной атмосферы было непременным условием возникновения жизни. Более того, данные астрономии также свидетельствуют о том, что древняя атмосфера Земли имела восстановительный характер. Наконец, из гл. XIII мы узнали, что и геологические данные указывают на существование в прошлом бескислородной атмосферы.

Мы смогли приблизительно оценить возраст нашей современной атмосферы. Бескислородная атмосфера просуществовала примерно до периода, удаленного от нас на 1,8 млрд. лет, а кислородная атмосфера сформировалась около 1,4 млрд. лет назад. Значит, за промежуток времени между этими двумя датами произошел переход от бескислородной к кислородной атмосфере. Мы видели также, что Земля — единственная планета Солнечной системы, в атмосфере которой имеется значительное количество свободного кислорода. Мы приняли, что кислород этот имеет биогенное происхождение: он создан (и продолжает создаваться) организмами, способными к органическому фотосинтезу, например зелеными растениями. Далее, мы узнали, что жизнь существует на нашей планете уже гораздо более 1,8 млрд. лет, а значит, она присутствовала уже в условиях бескислородной атмосферы. Более того, судя по молекулярным ископаемым, уже тогда были организмы, способные проводить органический фотосинтез.

В данной главе мы несколько подробнее познакомимся со свойствами обеих атмосфер. Я счел полезным перечислить вновь основные сведения о них в начале этой главы. Нужно еще раз подчеркнуть, что первичная атмосфера сильно отличалась от современной. Во многих отношениях они так же различны, как день и ночь. Многое из того, что было возможно тогда, невозможно теперь, и наоборот.

Как уже говорилось, этот контраст между двумя атмосферами подчеркивался всеми учеными, настаивающими на естественном происхождении жизни. Но в своих работах эти ученые часто недостаточно строго употребляют термины, так что резкая грань между двумя атмосферами смазывается. При описании процессов, протекающих в условиях бескислородной атмосферы, часто упот-

реблялись термины, имеющие смысл только для современных условий. В гл. VIII мы видели, что термины «аэробный» и «анаэробный» в применении к первичной атмосфере означают часто «кислородный» и «бескислородный». В той же главе говорилось и о важности того факта, что некоторые вещества под действием ультрафиолета разлагаются и, таким образом, нуждаются в защите от него.

## 2. ДОАКТУАЛИСТИЧЕСКИЕ И АКТУАЛИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСЛОВИЯ

Чтобы подчеркнуть это различие между первичной и современной атмосферами, я называю первичную атмосферу *доактуалистической*, а современную *актуалистической*.

Я понимаю, что такое предложение может быть неверно понято. В самом деле, и в условиях первичной атмосферы, конечно, действовали те же законы природы, которые действуют и сейчас, т. е., если угодно, и тогда действовал принцип униформизма. Применение этого принципа существенно важно для всех биохимических теорий и экспериментов, рассмотренных в предыдущих главах.

Химические связи веществ «первичного бульона» имели совершенно ту же природу, что и химические связи в веществах, синтезируемых сейчас неорганическим путем в лаборатории или живыми существами. Однако хотя принцип униформизма действовал на этом фундаментальном уровне и в примитивных условиях, результаты протекавших тогда процессов не только отличались от современных, но часто были прямо противоположны им. Многие современные процессы были тогда невозможны — и наоборот. Поэтому мне кажется, что термин «доактуалистический» вполне оправдан.

Как мы знаем, различия в составе между первичной и современной атмосферами повлияли и на некоторые экзогенные геологические процессы, а именно на те из них, которые протекали в тесном контакте с атмосферой и гидросферой. Поэтому справедливо будет сказать, что необычные докембрийские отложения, например золото-урановые рифы и полосчатые железорудные формации (гл. XIII), созданы доактуалистическими процессами.

Итак, экзогенные процессы, происходившие в контакте с атмосферой или гидросферой более 1,8 млрд. лет назад, можно назвать доактуалистическими. Этот термин неприложим к эндогенным процессам, не подверженным влиянию атмосферы. Насколько мы знаем, эндогенные процессы, в частности орогенические циклы, оставались в основных своих чертах неизменными со времен формирования древнейших известных нам пород земной коры, т. е.

уже 3,3 млрд. лет. Следовательно, мы можем сказать, что в ранний период истории развития земной коры (от 3,3 млрд. до 1,8 млрд. лет назад) на поверхности коры преобладали доактуалистические, а в коре — актуалистические условия и процессы.

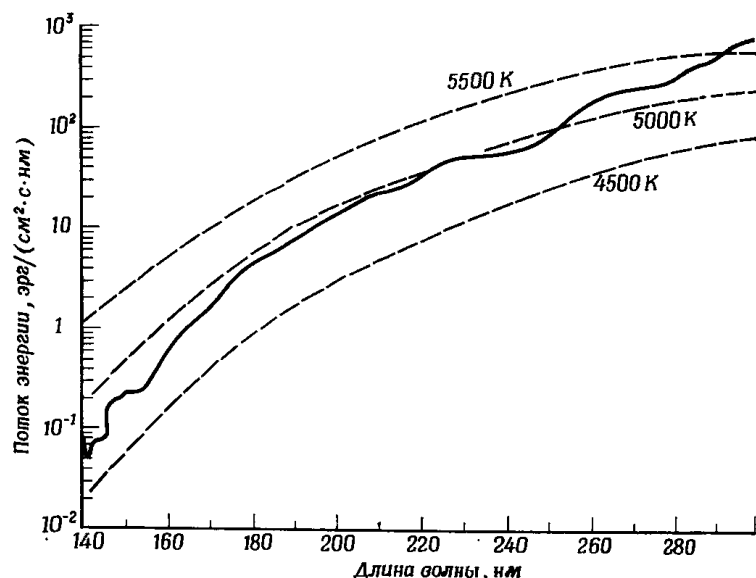
## 3. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА

В гл. IV уже было показано в общих чертах, что ультрафиолетовое солнечное излучение могло проходить через первичную бескислородную атмосферу и достигать поверхности Земли. Обладая сравнительно высокой энергией, это излучение вызывало самые разные химические реакции, теперь уже не протекающие в естественных условиях (фиг. 14). Беркнер и Маршалл [1, 2] разработали данный вопрос более подробно. Этот и следующий разделы основаны на их работах, значительно углубивших наше понимание процессов, шедших в условиях примитивной атмосферы. Указанные авторы собрали все новейшие сведения по солнечной радиации, по составу атмосферы и по поглощению света разными газами атмосферы. Были привлечены данные самых разных наук — от ядерной физики до спутниковой метеорологии. Беркнер и Маршалл изучали влияние атмосфер различного состава на прохождение коротковолновой части солнечного ультрафиолетового излучения.

Как известно, в состав солнечного света входят электромагнитные волны разной длины. Мы можем видеть свет с длиной волны от немногим менее 400 нм (фиолетовый свет) до немногим более 800 нм (красный свет). Со своей точки зрения мы называем этот диапазон видимым участком спектра. Но если бы даже наши глаза вдруг смогли воспринимать более широкий участок спектра, солнечный свет ненамного изменился бы для нас, поскольку почти все остальное поглощает современная атмосфера. Через нее проходят еще только волны, соответствующие небольшому участку спектра после фиолетового — ультрафиолетовое излучение — и несколько более широкому участку после красного — инфракрасное излучение. Современная атмосфера фактически непрозрачна для большей части солнечного излучения, она поглощает почти всю его энергию, оставляя «окно» лишь для видимой части спектра. Как мы увидим, непрозрачность атмосферы для дальнего ультрафиолета зависит главным образом от наличия в ней свободного кислорода ( $O_2$ ) и озона ( $O_3$ ).

В своих работах Беркнер и Маршалл [1, 2] уделили больше всего внимания не инфракрасному свету, а именно ультрафиолетовой части спектра. Дело в том, что чем меньше длина волны, тем большую энергию несет излучение (фиг. 14). А чем выше энергия излучения, тем больше вероятность того, что под его воздействием

будут происходить неорганические фотохимические реакции распада и синтеза. Верхний предел длин волн, вызывающих такие реакции, лежит гораздо ниже верхнего предела длин волн того ультрафиолета, который может проходить через современную атмосферу. Нас интересует именно наиболее активное ультрафиолетовое солнечное излучение (дальний ультрафиолет) с длиной волны не более 250 нм. Как мы увидим, расчеты Беркнера и Маршалла относятся в основном к этому жесткому ультрафиолету.



Фиг. 85. Интенсивность солнечного излучения (т. е. его энергия на верхней границе земной атмосферы) в области спектра от 140 до 300 нм [1]. Для более коротких длин волн интенсивность даже ниже; она колеблется от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  эрг/(см<sup>2</sup> · с · Å), иначе говоря, от 0,01 до 0,001 эрг в 1 с на 1 см<sup>2</sup> для длины волны 0,1 нм.

Однако энергия, которая поступает с солнечным излучением на поверхность Земли, зависит не только от пропускания атмосферы, но и от того, насколько интенсивно излучает Солнце в том или ином участке спектра. Эта интенсивность для длин волн меньше 100 нм быстро падает (фиг. 85). К тому же длины волн меньше 180 нм гораздо сильнее поглощаются различными газами. Значит, свет с длиной волны менее 160 нм всегда приносил на Землю очень немного энергии. Итак, для нас особенно важен участок спектра от 160 до 250 нм, так как именно за счет энергии этого излучения шли процессы неорганического фотосинтеза в условиях первичной атмосферы.

#### 4. ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выясняя вопрос о том, как солнечный свет проникал через первичную атмосферу, надо сначала решить, какую модель этой атмосферы мы будем рассматривать. Основываясь на астрономических данных, приведенных в гл. V, можно думать, что первичная атмосфера содержала H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Ar, CH<sub>4</sub> и следы других газов наряду с небольшими количествами O<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>. Практически поглощение H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar и CH<sub>4</sub> в участке спектра от 160 до 250 нм столь незначительно, что им можно пренебречь. Следовательно, мы можем ограничиться изучением влияния водяных паров (H<sub>2</sub>O), двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>) и озона (O<sub>3</sub>). Чтобы рассчитать прохождение солнечного излучения через атмосферу известного состава, надо сначала узнать энергию излучения на разных длинах волн (фиг. 85). Надо знать коэффициенты поглощения в этих длинах волн и, кроме того, каково содержание разных газов в атмосфере, которую должно пройти излучение. Практически две последние величины всегда рассчитывают отдельно для разных газов, составляющих атмосферу, а данные для атмосферы в целом получают простым сложением.

Коэффициент поглощения газом ( $k$ ) характеризует ослабление излучения, прошедшего через слой данного газа толщиной в 1 см при температуре газа 0°С и давлении 1 атм (это так называемые нормальные условия, см. ниже). Интенсивность излучения, прошедшего через слой газа толщиной  $x$  см при нормальных условиях, выражается формулой

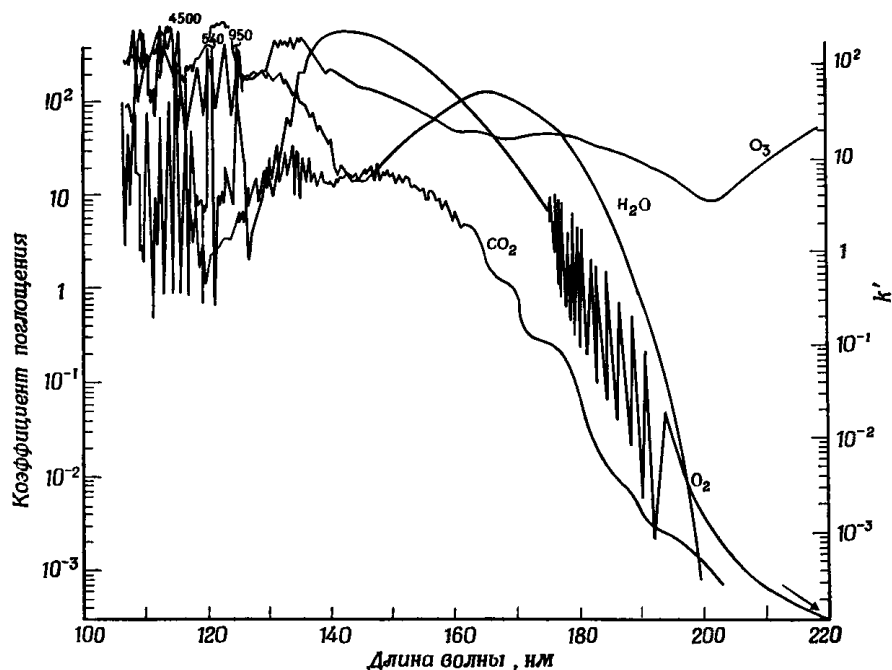
$$I_x = I_0 e^{-kx},$$

в которой  $I_0$  — начальная интенсивность, а  $I_x$  — интенсивность излучения после того, как оно прошло через газ.

Количество определенного газа в атмосфере, через которое проходит солнечное излучение, прежде чем попасть на поверхность Земли, выражается обычно двумя способами — в абсолютных и относительных величинах. По абсолютной шкале это количество выражается в сантиметрах, для чего рассчитывается высота столба данного газа при давлении 1 атм и температуре 0°С (высота однородной атмосферы). Эти условия называются нормальными. Количество газа, через которое должно пройти излучение при этих условиях, можно выразить *длиной пути* через эту воображаемую толщу газа; ее обозначают буквой  $x$  и измеряют в сантиметрах. Количество газа можно выражать в относительных величинах по отношению к содержанию этого газа в атмосфере.

Коэффициенты поглощения четырех интересующих нас газов в спектральном интервале 160—250 нм приведены на фиг. 86. Для длин волн более 160—200 нм коэффициент поглощения водяных паров, кислорода и двуокиси углерода резко падает. Значит, излу-

чение с длиной волны более 200 нм легче проходит через эти газы. Озон ведет себя иначе: его коэффициент поглощения  $k$  колеблется от 1 до 100 на всем участке спектра до 300 нм. Роль атмосферного озона в поглощении ультрафиолетового солнечного излучения ясна из графиков, приведенных на фиг. 86 и 87.



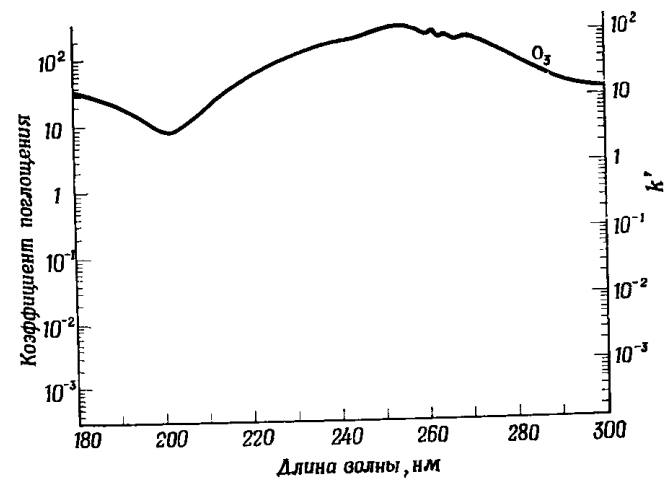
Фиг. 86. Коэффициенты поглощения для четырех атмосферных газов, играющих важную роль в поглощении солнечного ультрафиолета с длиной волны от 100 до 220 нм [1].

Определение коэффициента поглощения  $k$  приводится на стр. 329. Справа на оси ординат отложены значения  $R$  ( $\text{см}^{-1}$ ) (коэффициент, рассчитанный не для полного поглощения, а для поглощения до величины 1 эрг/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) для спектрального интервала шириной 5 нм (см. следующий раздел).

Займемся теперь второй переменной величиной, от которой зависит прохождение солнечного излучения через атмосферу. Прежде всего следует отметить, что разные атмосферные газы обладают сильно различающимся распределением по высоте. Обычно газ распределяется по вертикали экспоненциально, причем наивысшая его концентрация наблюдается у поверхности Земли, а с высотой она снижается. Но из четырех интересующих нас газов только два —  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  — следуют такому обычному экспоненциальному распределению. Распределение  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O}_3$  необычно.

На распределение водяных паров влияет так называемая «холодная ловушка» в тропосфере, на высоте около 10 км. Там, при температуре ниже  $-40^\circ \text{C}$ , весь водяной пар замерзает, и выше

этой области воды практически нет. На фиг. 92 показано, что приведенные к нормальным условиям водяные пары атмосферы дали бы длину пути более 10 м, и лишь 1 см этого пути приходится на воду из слоев атмосферы, лежащих выше 12 км. Из разд. 6 этой главы мы узнаем, что эта особенность играет важную роль,



Фиг. 87. Коэффициент поглощения озона в области 180—300 нм (ср. фиг. 86) [1].

определяя максимальное количество свободного кислорода, которое может возникнуть неорганическим путем при фотолизе воды.

Озон тоже распределен в атмосфере необычным образом. В наше время он образуется в верхних слоях атмосферы из кислорода, подвергающегося действию солнечного излучения. Оно разбивает молекулы кислорода на более активные отдельные атомы, часть которых соединяется в трехатомные молекулы озона. Конвекционные токи атмосферы несут этот газ вниз. Но экспоненциальное распределение озона не может установиться, так как озон, едва достигнув поверхности Земли, реагирует с минералами и органическими веществами, окисляя их. Окислительный потенциал озона намного выше, чем у кислорода, и он практически мгновенно исчезает с поверхности Земли.

Таким образом,  $\text{O}_3$  сейчас распределен в атмосфере почти равномерно. В бескислородной атмосфере дело обстояло иначе. Ведь излучение, за счет которого сейчас образуется озон в верхних слоях атмосферы, тогда доходило до поверхности гидросферы и литосферы. Значит, весь озон возникал здесь. Он тут же связывался, окисляя различные вещества. Таким образом, в бескислородной атмосфере должен был существовать сравнительно тонкий слой озона вблизи поверхности Земли. Конечно, образующееся количе-

ство озона зависит от того, сколько свободного кислорода имеется в верхних слоях атмосферы, и эта зависимость была принята во внимание Беркнером и Маршаллом при расчетах. Их результаты приведены на фиг. 94.

### 5. ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Теперь мы можем заняться вопросом, какая часть солнечного излучения поглотилась бы атмосферами разного состава. Кривые, к которым мы обратимся, показывают количество интересующего нас атмосферного газа (выраженное или в длине пути при нормальных условиях, или в долях содержания в атмосфере, PAL, или обоими способами сразу), которое, присутствуя в атмосфере, могло бы поглотить излучение данной длины волны до некоторого определенного уровня.

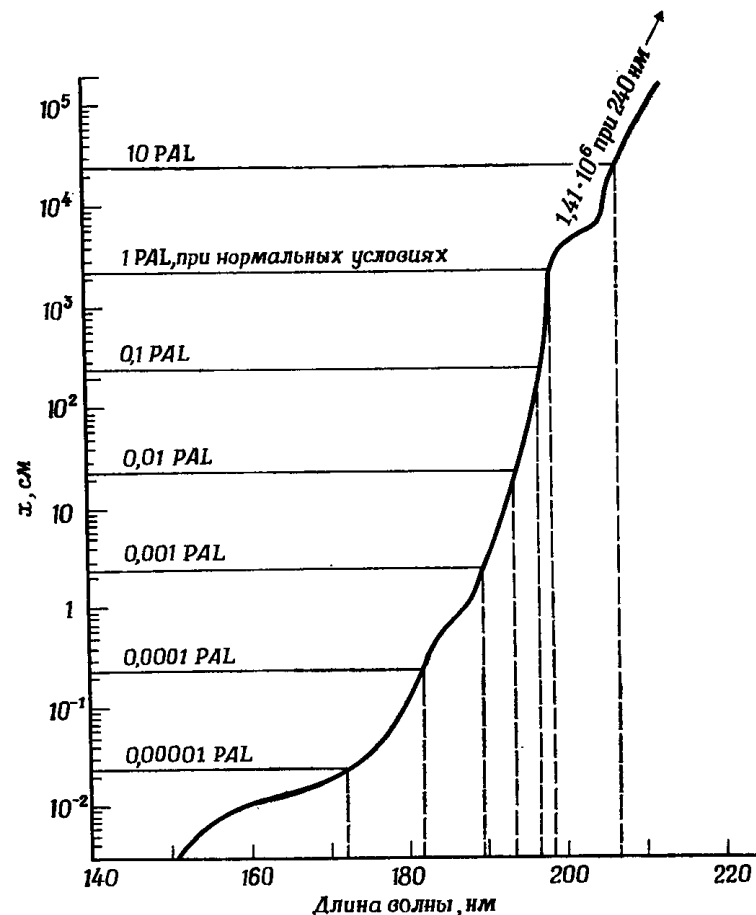
Теоретически солнечное излучение никогда не поглощается полностью ни в атмосфере, ни в гидросфере. Всегда какая-то часть излучения проходит. Но поскольку поглощение — процесс «экспоненциальный», это количество быстро снижается до столь незначительной величины, что ею можно пренебречь. Поэтому надо условиться, какое поглощение излучения мы будем считать «полным». Беркнер и Маршалл во всех своих расчетах принимали пороговое значение потока энергии, соответствующее полному поглощению, равным  $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  для 5 нм (когда энергия в спектральном интервале шириной 5 нм поглощается в такой степени, что за 1 с через  $1 \text{ см}^2$  проходит всего 1 эрг). При таком поглощении (экстинкция) Солнце было бы всего лишь в 50 раз ярче полной Луны. Ниже этого уровня никакие неорганические фотохимические реакции практически не идут.

Если оставить в стороне довольно регулярное возрастание потока энергии с увеличением длины волны солнечного излучения (фиг. 85), то кривые, указывающие количество газа, необходимое для поглощения определенной длины волны до принятого нами уровня, являются как бы зеркальным отражением кривых коэффициентов поглощения для разных длин волн. Ведь чем меньше коэффициент поглощения, тем более прозрачен газ для излучения данной длины волны и, следовательно, тем толще будет слой газа, необходимый для ослабления этого света до принятого уровня.

Изменения в количестве водяных паров и двуокиси углерода слабо влияют на поглощение ультрафиолетового излучения. Решающую роль играют здесь кислород и его производное — озон.

График, приведенный на фиг. 88, показывает, что при современном содержании в атмосфере водяных паров они эффективно поглощают солнечный ультрафиолет с длиной волны менее 200 нм. Но даже при десятикратном увеличении их содержания они сла-

бо поглощают излучение с большой длиной волны. Поскольку водяные пары находятся в равновесии с жидкой водой Мирового океана, а верхний предел их распространения ограничен «холодной ловушкой» в тропосфере, можно думать, что их содержание в атмосфере никогда не подвергалось значительным колебаниям.

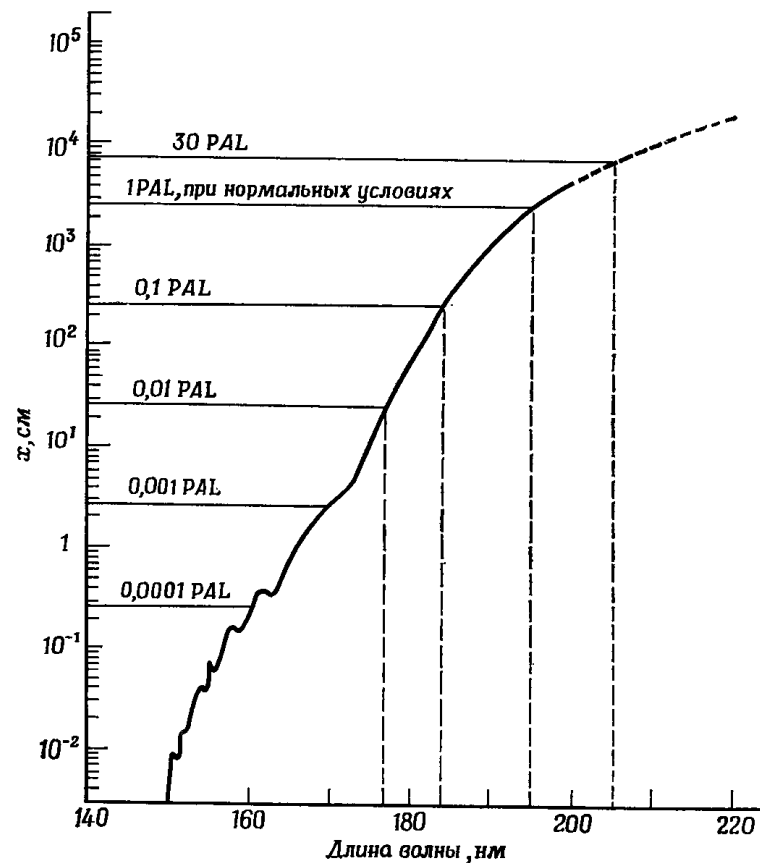


Фиг. 88. Толщина слоя воды, необходимого для поглощения солнечного ультрафиолета разной длины волны до уровня  $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при ширине полосы 5 нм [1]. Количество воды выражено в сантиметрах длины пути при нормальных условиях (x) (см. стр. 329).

Водяные пары никогда не могли играть главной роли в экранировании солнечного ультрафиолета с длиной волны более 200 нм.

Примерно то же можно сказать и о двуокиси углерода. График, приведенный на фиг. 89, показывает, что при современном содержании  $\text{CO}_2$  в атмосфере этот газ задерживает только излучение с длиной волны менее 190 нм. При содержании в 30 раз выше совре-

менного двуокись углерода задерживала бы волны длиной до 205 нм. Однако крайне маловероятно, чтобы в земной атмосфере когда-либо имелось столько двуокиси углерода. В противоположность кислороду основной запас двуокиси углерода содержится не

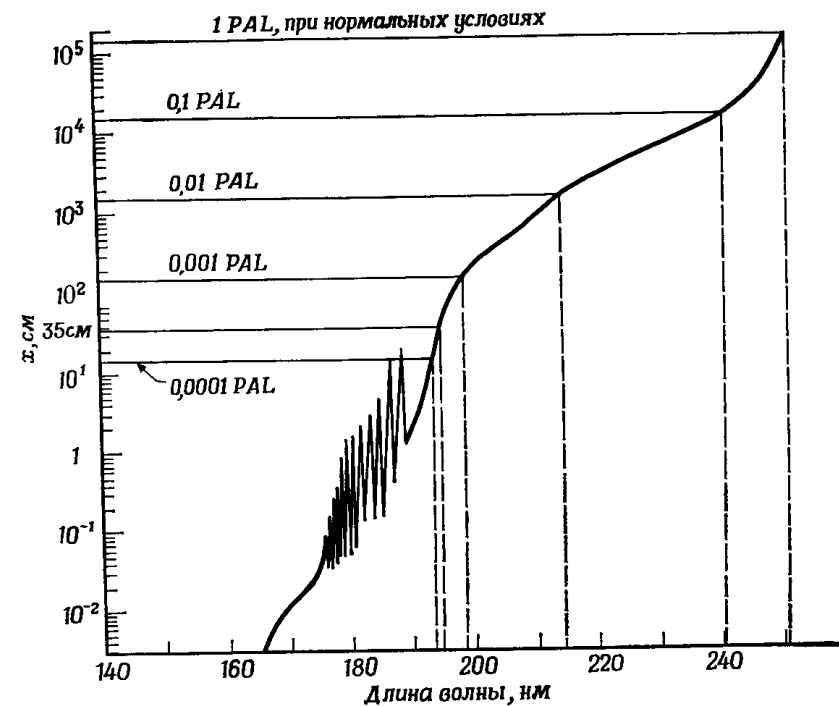


Фиг. 89. Толщина слоя  $\text{CO}_2$ , необходимого для поглощения солнечного ультрафиолета до уровня  $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при ширине полосы 5 нм (ср. фиг. 88) [1].

в атмосфере, а в океанских водах. Океан поэтому представляет собой прекрасный «буфер», регулирующий содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Процесс осаждения карбонатов служит «мусорщиком», удаляя из атмосферы лишнюю двуокись углерода.

Как уже говорилось, с кислородом и озоном дело обстоит совершенно иначе. Мы уже несколько раз подчеркивали важную роль такого фактора, как увеличение содержания кислорода в атмосфере для защиты от солнечного ультрафиолета, но мы ограничивались общим, чисто качественным подходом. Из работ Беркнера и Маршалла [1, 2], содержащих солидный фактический ма-

териал, мы можем извлечь и численные данные, позволяющие перевести наши умозаключения на количественную основу. Это настолько важно, что я считаю необходимым поговорить подробнее о физике явлений поглощения света в атмосфере.



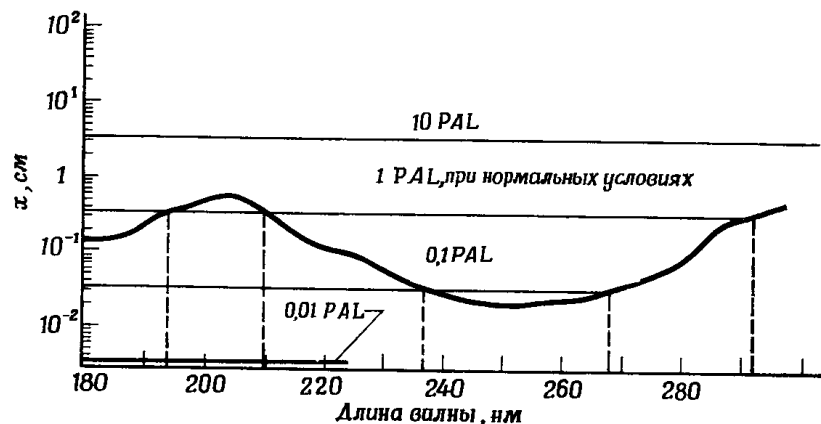
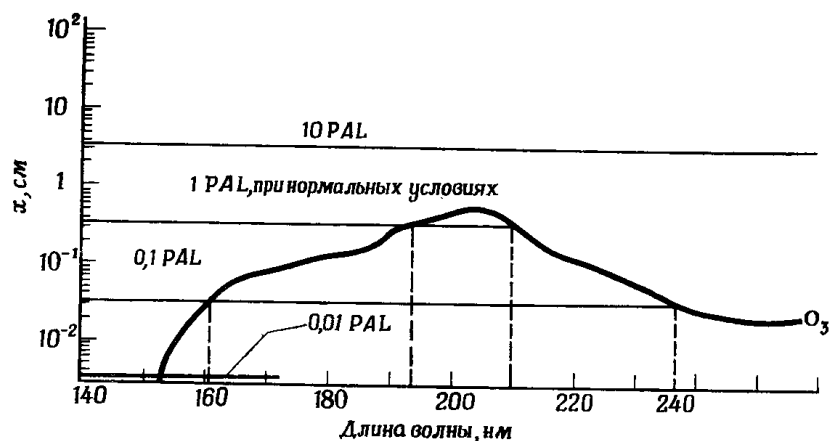
Фиг. 90. Толщина слоя  $\text{O}_2$ , необходимого для поглощения солнечного ультрафиолета до уровня  $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при ширине полосы 5 нм [1].

График, приведенный на фиг. 90, показывает, что, не считая системы полос Шумана — Рунге вблизи 180 и 190 нм, обусловленной атомным резонансом, рост содержания кислорода в атмосфере сопровождается монотонным увеличением поглощения жесткого ультрафиолета. Этот эффект при современном содержании кислорода в атмосфере распространяется на область до 250 нм, а далее главную роль в поглощении начинает играть озон. Итак, кислород сильно влияет на состав солнечного излучения, которое доходит до поверхности Земли.

Действие озона дополняет действие кислорода (фиг. 91). Различие в кривых их коэффициентов поглощения отражает радикальное различие в кривых толщины слоя этих газов, необходимой для ослабления до порогового значения.

Напомним, что содержание озона прямо зависит от содержания кислорода. Таким образом, атмосфера, бедная кислородом, не мо-

жет быть насыщена озоном. Хотя константы, определяющие образование озона, известны пока не слишком хорошо, можно оценить количество озона, которое будет присутствовать в атмосфере при разных уровнях содержания кислорода.



Фиг. 91. Толщина слоя  $O_3$ , необходимого для поглощения солнечного ультрафиолета до уровня 1 эрг/(см<sup>2</sup>·с) при ширине полосы 5 нм [1].

Сравнивая фиг. 91 с табл. 22, мы замечаем, что уже при содержании кислорода, равном 0,1 его содержания в современной атмосфере, уровень озона, видимо, был лишь ненамного ниже того, что мы наблюдаем сейчас. Поскольку озон даже при таком низком содержании кислорода экранирует ультрафиолет с длиной волны около 250 нм, кислород и озон вместе эффективно поглощали все жесткое ультрафиолетовое излучение уже в те времена, когда содержание кислорода в атмосфере составляло 0,1 его содержания в современной атмосфере (см. также фиг. 94).

Таблица 22

Оценки длины пути в  $O_3$  при различном содержании  $O_2$ 

Содержание $O_2$ в долях современного содержания (PAL) при нормальных условиях	Приближенная высота однородной атмосферы из $O_2$ . $10^5$ см	Среднее содержание $O_3$ в столбе атмосферы (при нормальных условиях), $10^{-8}$ %	Приближенная длина пути в $O_3$ при нормальных условиях, см
10,0	65	7	0,5
1,0	47	7	0,33
0,1	28	7	0,2
0,01	12	4	0,05
0,005	12	1,6	0,02
0,001	12	0,4	0,005

#### 6. АВТОМАТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЙ СОДЕРЖАНИЕ В АТМОСФЕРЕ КИСЛОРОДА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ФОТОДИССОЦИАЦИИ ВОДЫ, НА УРОВНЕ 0,001 ЕГО СОВРЕМЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Теперь мы можем решить самый существенный вопрос истории атмосферы. Вот он: не мог ли весь свободный кислород нашей атмосферы возникнуть в результате неорганического процесса — фотодиссоциации паров воды при облучении их ультрафиолетом Солнца? Раньше происхождение свободного кислорода именно так и объясняли, и теория допускала такое объяснение. На Земле с тех пор, как она охладилась, всегда, по-видимому, было много воды, а ведь, как известно, водяные пары под действием жесткого ультрафиолета диссоциируют.

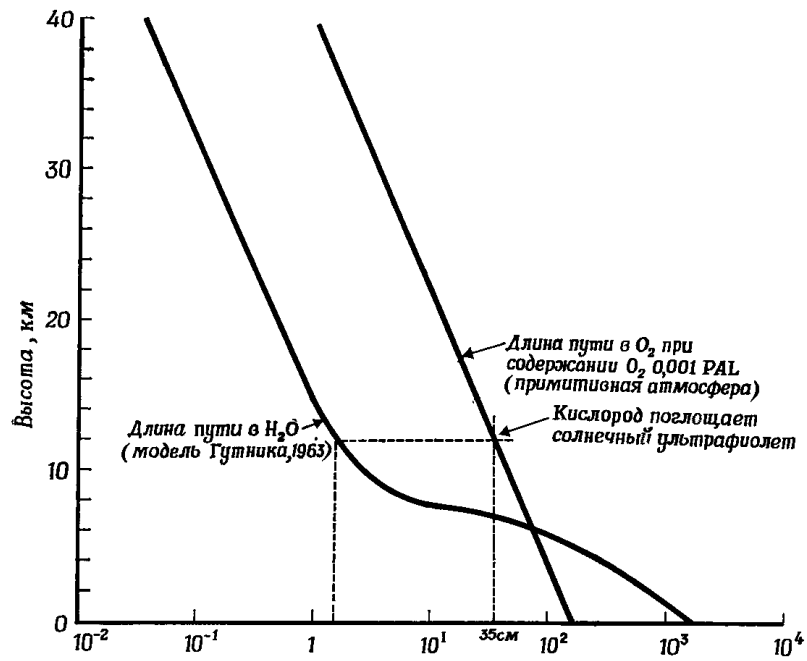
Но количество образующегося таким образом кислорода, как показал Г. Юри, строго ограничено. Регулирующий механизм связан с различиями в вертикальном распределении водяных паров и кислорода. Как мы видели, водяные пары задерживаются в «холодной ловушке», а кислород распределен по экспоненциальному закону. Значит, кислород заходит в атмосфере гораздо выше, чем вода. Кроме того, ультрафиолет тех длин волн, которые способны разлагать воду, поглощается кислородом. Значит, кислород должен эффективно защищать водяные пары от дальнейшего воздействия ультрафиолетового излучения, от дальнейшей диссоциации.

Расчеты показывают, что содержание кислорода, продуцируемого при неорганической фотодиссоциации воды, не может подняться выше 0,001 его современного содержания в атмосфере [2].

Фотодиссоциация воды происходит за счет энергии, которую передают молекуле воды кванты света, поглощаемые ею. Значит, этот процесс должен вызываться светом тех длин волн, которые сильно поглощаются водяными парами. Фиг. 86 показывает, что



наиболее высокие коэффициенты поглощения наблюдаются для длин волн от 150 до 200 нм. На том же графике мы можем видеть, что и  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  тоже сильно поглощают в этой области. На фиг. 92



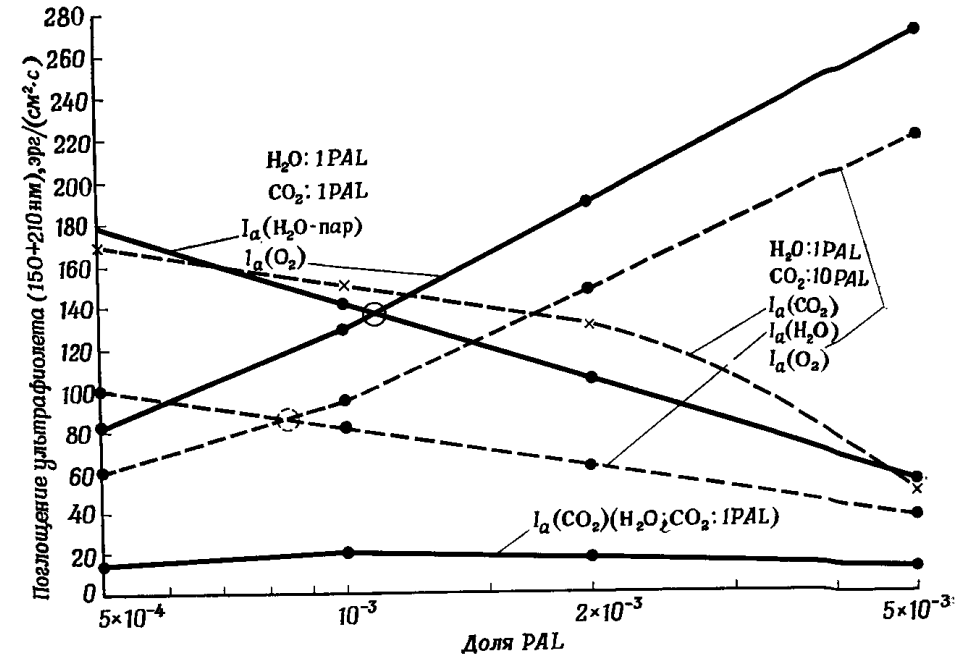
Фиг. 92. Интегрированные длины путей в водяном паре (при современном его содержании в атмосфере) и в кислороде (при 0,001 его современного содержания) [1].

При таком содержании кислорода водяные пары защищены от диссоциирующего действия ультрафиолета при длине пути 35 см (в нормальных условиях). Этот защитный эффект достигается уже на высоте 12 км от поверхности Земли, т. е. выше зоны «холодной ловушки», в которой задерживается почти вся парообразная вода. Не забудьте, что длины пути отложены по логарифмической шкале, поэтому длина пути при перемещении по графику влево резко уменьшается. Влияние двуокиси углерода близко к действию кислорода, но, как показано на фиг. 93, оно менее значительно, так как содержание этого газа в атмосфере меньше.

показано, что солнечные лучи должны преимущественно поглощаться именно кислородом и двуокисью углерода. Если в атмосфере присутствует достаточное количество этих газов, то они распределяются по вертикали экспоненциально, экранируя жесткое излучение выше «холодной ловушки», в которой остается вода.

На фиг. 93 представлены суммарные графики поглощения света с длиной волны от 150 до 180 нм для двух моделей ранней атмосферы с различным содержанием кислорода. Содержание водяных паров принято в обоих случаях одинаковым, так как вода на Земле была одинаково широко распространена в течение всей геологической истории. В одной модели содержание  $\text{CO}_2$  также принято равным современному, а в другой — в десять раз выше.

Поглощение мало зависит от содержания  $\text{CO}_2$ , так как этого газа в атмосфере немного. Основная роль здесь принадлежит  $\text{O}_2$ . Можно, не боясь ошибиться, сказать, что автоматический регулирующий механизм действует при содержании кислорода в атмосфере, составляющем 0,001 современного.



Фиг. 93. Автоматический механизм регуляции неорганического производства кислорода в первичной атмосфере [2].

Рассмотрены два варианта первичной атмосферы, в обоих содержание воды принято равным современному. Содержание  $\text{CO}_2$  в одном варианте также равно современному (сплошные кривые), а в другом — в 10 раз выше (прерывистые кривые). Кривые описывают поглощение до величины  $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при ширине полосы 5 нм всего солнечного ультрафиолета с длинами волн от 150 до 180 нм. При содержании  $\text{O}_2$  в атмосфере ниже 0,001 современного поглощение излучения водой превышает поглощение кислородом. Но при более высоком содержании кислорода его роль сильно возрастает. Тогда водяной пар защищен от солнечного ультрафиолета и диссоциация воды прекращается. Порог срабатывания саморегулирующего механизма, ограничивающего производство  $\text{O}_2$  неорганическим путем, лежит там, где пересекаются кривые поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O}_2$ .

Беркнер и Маршалл [2] совершенно правильно подчеркнули, что этот очень важный механизм не позволяет никакому неорганическому процессу поднять содержание кислорода выше 0,001 современного. Следовательно, содержание кислорода могло повыситься только тремя способами: 1) за счет некоего неизвестного внеземного воздействия, 2) за счет вмешательства сверхъестественных сил и 3) в результате биогенного образования свободного кислорода. Из следующих разделов мы узнаем, как современная

земная атмосфера могла развиваться благодаря биогенной продукции кислорода.

Здесь следует обратить внимание еще на одну деталь. Описанный автоматический механизм в любой атмосфере зависит только от присутствия водяных паров. Уровень содержания кислорода, при котором этот механизм действует, может слегка изменяться в зависимости от колебаний содержания  $\text{CO}_2$ , однако это изменение незначительно. Следовательно, данный механизм должен был действовать не только в примитивной земной атмосфере, но и в любой другой примитивной атмосфере. Он является общим для всех примитивных планетных атмосфер.

Самое важное в предложенной Юри модели автоматического механизма ограничения уровня кислорода в атмосфере состоит в том, что кислород любого происхождения всегда будет подниматься выше, чем вода, остающаяся в «холодной ловушке». Следовательно, за счет высвобождения кислорода при органическом фотосинтезе содержание кислорода в атмосфере также вначале не сможет повыситься. Фотосинтез и фотодиссоциация — неаддитивные процессы. Появление в атмосфере кислорода, высвободившегося при фотосинтезе, должно привести к уменьшению скорости неорганической фотодиссоциации воды.

Только когда фотосинтез стал настолько распространенным, что только за его счет, без помощи других процессов содержание кислорода в атмосфере смогло подняться выше 0,001 его современного уровня, «барьер Юри» был преодолен.

#### 7. ВТОРОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЙ СОДЕРЖАНИЕ СВОБОДНОГО КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ НА УРОВНЕ 0,01 ЕГО СОВРЕМЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ. ТОЧКА ПАСТЕРА (ПЕРЕХОД ОТ БРОЖЕНИЯ К ДЫХАНИЮ)

В гл. VIII, разд. 5 и 6 мы уже обсуждали переход от брожения к дыханию в метаболизме некоторых групп современных микроорганизмов. Здесь мы поговорим о влиянии этого перехода на процесс превращения бескислородной атмосферы в кислородную. Важен тот факт, что эффект Пастера отмечается у самых разных, не родственных между собой видов современных микроорганизмов (*факультативных анаэробов*) при одном и том же уровне содержания свободного кислорода. Поскольку этот эффект не приурочен к какой-то одной группе микроорганизмов, мы можем считать, что в его основе лежит какой-то пока не известный физико-химический порог (или несколько порогов) и что этот механизм действовал и в далеком прошлом. В таком случае лучше говорить не о факультативном анаэробозе, а о *факультативном дыхании*.

Мы уже видели, что при содержании кислорода в атмосфере, равном 0,01 современного, должен действовать механизм обратной

связи: при превышении этого уровня за счет фотосинтетической активности организмы с факультативным дыханием начинают потреблять кислород, а как только количество кислорода падает ниже этого уровня, переключаются на брожение (эффект Пастера). Теперь мы можем дать предварительное определение бескислородной атмосферы: это атмосфера, в которой содержание кислорода составляет не более 1% его современного уровня.

Полезно напомнить, что пока мы не можем по древним осадочным породам определить содержание кислорода в примитивной атмосфере. Только экстраполяция в прошлое эффекта Пастера, известного у современных микроорганизмов, позволяет продвигаться в этом направлении. Если дальнейшие исследования покажут, что точка Пастера находится несколько ниже или выше принимаемого сейчас уровня, то наше определение придется соответственно изменить. Можно было бы сформулировать вполне «надежное» определение, которое, по-видимому, устоит перед новыми открытиями микробиологов: бескислородной называется атмосфера, в которой содержание кислорода не превышает того уровня, при котором срабатывает эффект Пастера. Но коль скоро мы хотим сопоставить данные микробиологии с данными атмосферной физики, нам следует отдать предпочтение первому определению: в нем указана конкретная цифра.

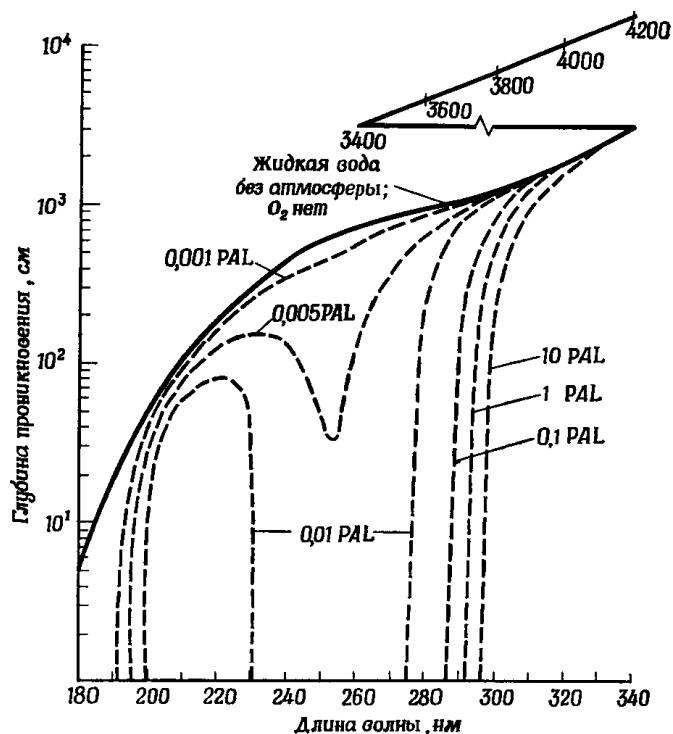
Очевидно, точка Пастера была превзойдена тогда, когда интенсивность органического фотосинтеза увеличилась до такой степени, что кислород стал производиться быстрее, чем он потреблялся в процессах дыхания (а также в процессах окисления поверхностных минералов и других). Вероятно, это произошло тогда, когда развился новый, более эффективный способ фотосинтеза, например когда фотолитотрофный тип метаболизма взял верх над примитивным фото«органотрофным» или когда появилась эукариотическая клетка (гл. VIII, разд. 8; см. также [7]), обладающая специализированными органеллами для фотосинтеза. Однако пока все эти догадки остаются беспочвенными, так как для обоснованных выводов у нас нет данных.

#### 8. ПРОНИКНОВЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА В ВОДУ

Узнав, как солнечный ультрафиолет проходит через атмосферу различного состава, мы должны теперь рассмотреть его проникновение в воду. Ведь ранняя жизнь не могла существовать на суше в непосредственном контакте с атмосферой, через которую свободно проходили смертоносные ультрафиолетовые лучи. Ранняя жизнь, конечно, была защищена от этого излучения или горными породами, или почвой, или водой озер и морей.

Уже тонкого слоя горной породы или почвы достаточно для защиты от коротковолнового ультрафиолета, однако передвижение

по порам в толще песка или глины или из одной естественной пещеры в другую весьма затруднительно. В крупных водоемах передвижение организмов требует значительно меньших усилий.



Фиг. 94. Глубина проникновения солнечного ультрафиолета в жидкую воду в различных атмосферах (с содержанием свободного кислорода 0,001; 0,01; 0,1; 1 и 10 PAL) [1].

Если бы в атмосфере не происходило поглощения, то ультрафиолет с длиной волны 180 нм проникал в воду менее чем на 1 см, свет с длиной волны около 280 нм — почти на 10 м, а красный свет конца видимой части спектра — примерно на 100 м. В примитивной атмосфере, в которой содержание O<sub>2</sub> поддерживается за счет автоматического регуляторного механизма Юри на уровне около 0,001 современного, картина мало изменится. Но уже при содержании кислорода 0,01 современного должны произойти большие изменения. Смертоносное излучение с длинами волн от 230 до 275 нм задерживается уже в атмосфере, а ультрафиолет с меньшей длиной волны проникает в воду всего на 1 м. При содержании кислорода в 10 раз ниже современного уровня все летальное излучение с длиной волны менее 290 нм поглощается в атмосфере и жизнь может выйти на сушу.

Поскольку эволюция хотя бы на некоторых этапах предполагает достаточно хорошее сообщение между разными популяциями и биотопами и поскольку на заре развития жизни для защиты от ультрафиолета требовался значительный слой воды, можно предположить, что главную роль в развитии жизни сыграли именно обширные водоемы. В этом разделе мы рассмотрим ограничения,

накладывавшиеся на раннюю жизнь проникновением ультрафиолета через атмосферу и верхние слои гидросферы. На графике, приведенном на фиг. 94, показано проникновение солнечного ультрафиолета разной длины волны в жидкую воду при разных уровнях содержания кислорода в атмосфере.

Сравнивая фиг. 94 с графиками, приведенными в предыдущем разделе, мы видим, что наш новый график охватывает более широкий участок спектра. Дело в том, что в предыдущих разделах мы интересовались главным образом неорганическими фотохимическими реакциями синтеза «органических» соединений. Такие реакции протекают под действием света с длиной волны до 210 нм. Теперь же нас интересует летальное действие солнечного ультрафиолета на живое вещество, т. е. речь идет уже не о возможности синтеза, а о возможности избежать распада. Живые клетки сильнее всего поглощают ультрафиолет с длиной волны от 240 до 280 нм. Облучение таким светом может быть смертельным даже при энергии ниже установленного нами предела поглощения, т. е. ниже 1 эрг на 1 см<sup>2</sup> в спектральном интервале шириной 5 нм. Вот почему сейчас мы будем говорить об ультрафиолете с несколько большей длиной волны.

На фиг. 94 показано общее поглощение ультрафиолета водой, кислородом и озоном. В чисто теоретическом случае облучения водоема, не защищенного никакой атмосферой, проникновение ультрафиолетового солнечного излучения в воду описывается гладкой кривой (сплошная линия на фиг. 94). Вода практически непрозрачна для жесткого ультрафиолета: свет с длиной волны 180 нм пройдет в воде меньше 1 см. Свет с длиной волны около 280 нм пройдет уже около 10 м, прежде чем поглотится; красные же лучи видимого спектра проникают до глубины 100 м.

В случае примитивной атмосферы, в которой содержание кислорода не превышает 0,001 его современного уровня, положение изменится слабо.

При содержании кислорода до 0,01 современной кривая поглощения имеет уже совсем иной характер. Это связано не с каким-либо изменением свойств самой воды и даже не с действием кислорода, как могло бы показаться, судя по графику, приведенному на фиг. 90, а с тем, что при таком содержании кислорода вступает в игру озон, образующийся в атмосфере из кислорода.

Сильное поглощение озоном ультрафиолета с длиной волны от 240 до 270 нм (фиг. 91) приводит к ослаблению этих волн уже в атмосфере. Становится также значительным поглощение в атмосфере более коротковолнового излучения, и теперь для полного поглощения солнечного ультрафиолета достаточно слоя воды толщиной всего 1 м.

При повышении содержания кислорода в атмосфере до 0,1 современного совместное действие кислорода и озона распространя-

ется до длин волн около 290 нм. Это означает, что весь смертоносный ультрафиолет поглощается в атмосфере. Жизнь уже не нуждается в подводном убежище и может выйти на сушу.

### 9. ОГРАНИЧЕННОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАННЕЙ ЖИЗНИ

Теперь на основе всего того, что было сказано в предыдущих разделах, мы попытаемся составить представление о том, в каких средах могла существовать ранняя жизнь. Мы видим, что местообитания ранней жизни резко ограничивались тогда двумя факторами. Первый — смертоносное ультрафиолетовое излучение, проникавшее через атмосферу и делавшее сушу непригодной для жизни. Второй — низкий уровень развития самой жизни, которая была не в состоянии извлекать максимум возможного из окружающей среды.

Займемся сначала вторым фактором. Даже при несовместимых с жизнью условиях на суше жизнь могла найти самые разнообразные возможности в воде. Среди водных форм можно выделить три большие экологические группы: 1) *нектонные*, или активно плавающие животные; 2) *планктонные*, или дрейфующие формы; 3) *бентосные*, или обитающие на дне организмы.

Во времена ранней жизни, в раннем и среднем докембрии, активно плавающих животных еще не было, так что нектон отпадает. Кроме того, водные организмы не поднимались тогда выше 10 м, ведь только на такой глубине они могли найти защиту от летального действия ультрафиолета. Современные организмы умеют оставаться на нужной глубине, регулируя свою удельную массу. Легко себе представить современные планктонные организмы, всегда живущие глубже, скажем, десяти метров. Они управляют глубиной погружения, изменяя удельную массу одной или нескольких органелл, из-за чего меняется удельная масса всей клетки. В прокариотических клетках органелл нет, поэтому способность изменять свою удельную массу свойственна только эукариотам. Поскольку ранняя жизнь была прокариотической, первобытные организмы не имели возможности управлять глубиной своего погружения. Но в таком случае планктонные организмы постоянно находились бы под угрозой гибели от излучения: волны или течения могли бы выносить их в верхние слои воды. Значит, планктона тогда тоже еще не было.

Следовательно, ранняя жизнь была представлена бентосными организмами. Глубины менее 10 м были ей недоступны. С другой стороны, она не могла заходить глубже 50 м, так как ниже этого уровня видимый солнечный свет настолько ослаблен, что органический фотосинтез не может идти здесь достаточно активно. Схема, приведенная на фиг. 95, показывает, что в те далекие времена область распространения жизни была ограничена дном озер и мо-

рей на глубинах примерно от 10 до 50 м. В океанах жизнь могла существовать только в узкой прибрежной зоне. Но в больших озерах жизнь вполне могла распространиться и по всему дну (если только глубина озера не превышала 50 м). Поэтому Беркнер и Маршалл [1], обратившие внимание на эти ограничивающие факторы внешней среды, считают, что ранняя жизнь должна была возникнуть в больших озерах.

### 10. РАСШИРЕНИЕ ЗОНЫ ОБИТАНИЯ РАННЕЙ ЖИЗНИ ПО МЕРЕ РОСТА СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ

Графики, приведенные на фиг. 94, показывают, как с накоплением кислорода в атмосфере для ранней жизни открывались все новые и новые местообитания. Видимо, важнейшие сдвиги происходили при повышении содержания  $O_2$  до 0,01 и 0,1 его содержания в современной атмосфере.

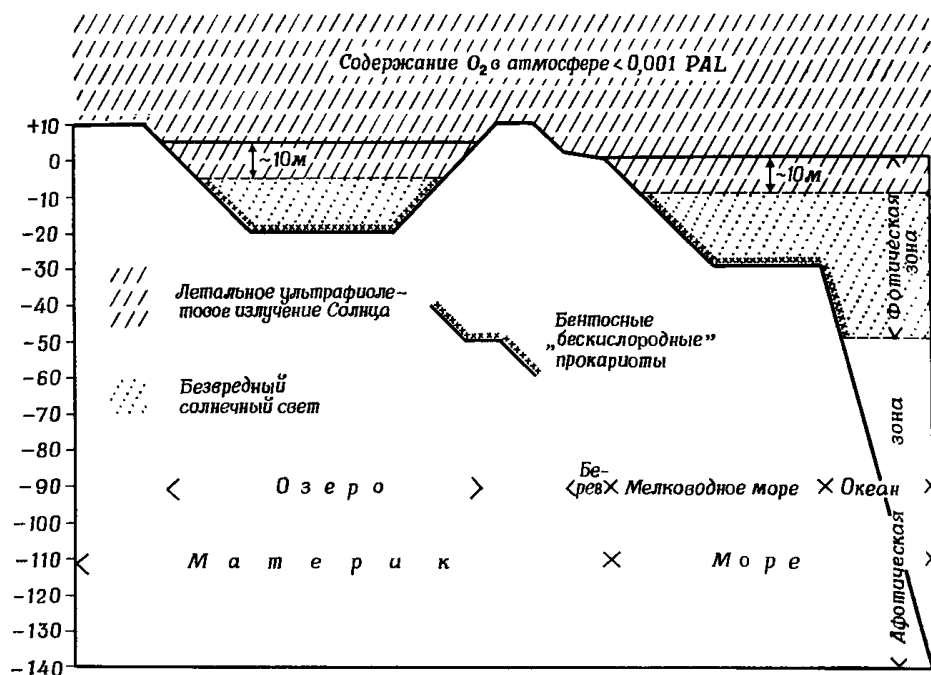
При содержании  $O_2$ , равном примерно 0,01 современного, атмосфера уже поглощала значительную, причем самую опасную для жизни, часть ультрафиолетового солнечного излучения. Остальная часть ультрафиолетового спектра проникала в воду не более чем на 1 м. Беркнер и Маршалл [1] полагают, что в это время уже могли появиться планктонные организмы. Даже если они выносились в верхний, метровый слой воды, то это грозило всего лишь временным воздействием ультрафиолета, поскольку волны и течения довольно быстро вновь уносят организмы из этого сравнительно тонкого слоя. Учитывая, что кратковременное облучение не смертельно, считают, что жизнь уже тогда могла «завоевать море». Еще неизвестно, какую дозу ультрафиолета могли выносить эти организмы и при каком уровне содержания кислорода произошло расширение владений жизни — точно при 0,01 современного или чуть выше или ниже.

Это «завоевание моря при достижении критического уровня содержания  $O_2$ , соответствующего 0,01 современного», Беркнер и Маршалл связывают с началом кембрия [1]. Первое массовое появление ископаемых остатков в геологической летописи, о котором так много говорится почти во всех учебниках геологии, заставляет указанных авторов говорить о «взрыве жизни», связанном с завоеванием жизнью новых местообитаний. Подробнее мы обсудим этот вопрос в разд. 4 следующей главы.

Следует обратить внимание еще на один аспект накопления кислорода в атмосфере. В условиях равновесия между водой и атмосферой растворимость  $O_2$  в воде тем меньше, чем выше температура и соленость воды. При прочих равных условиях пресная вода содержит примерно на 25% больше кислорода, чем океанская. Следовательно, когда содержание кислорода в атмосфере уже достигло точки Пастера (гл. VIII, разд. 5), пресноводные озера быст-

рее «догнали» атмосферу, тогда как в океане содержание  $O_2$  еще могло оставаться ниже этой точки.

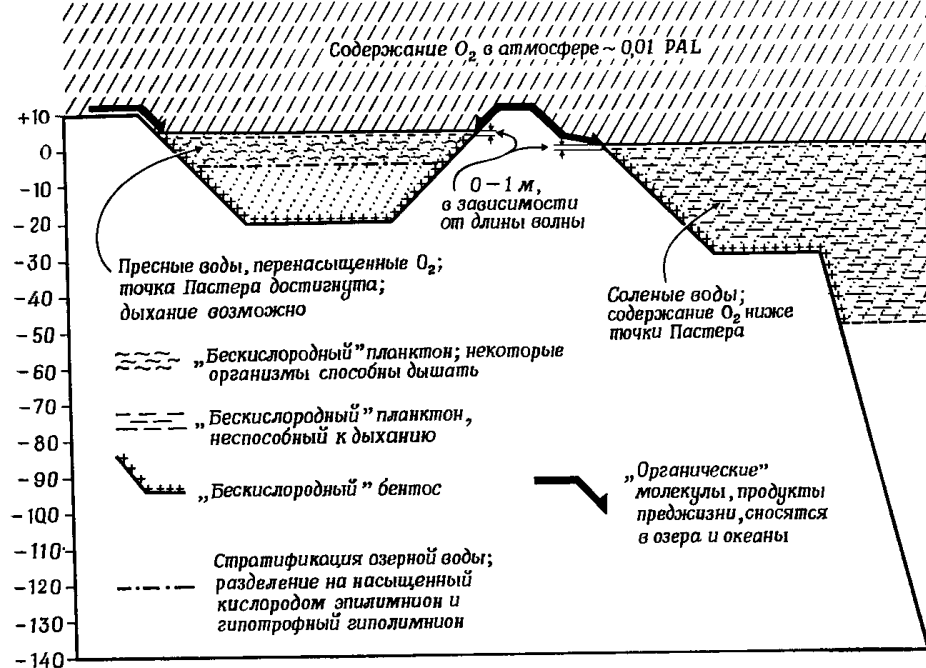
Другой порог был перейден, когда содержание кислорода в атмосфере поднялось примерно до 0,1 современного. Как явствует из данных, приведенных на фиг. 94, при этом весь смертельный для жизни ультрафиолет поглощается в атмосфере. Теперь жизнь



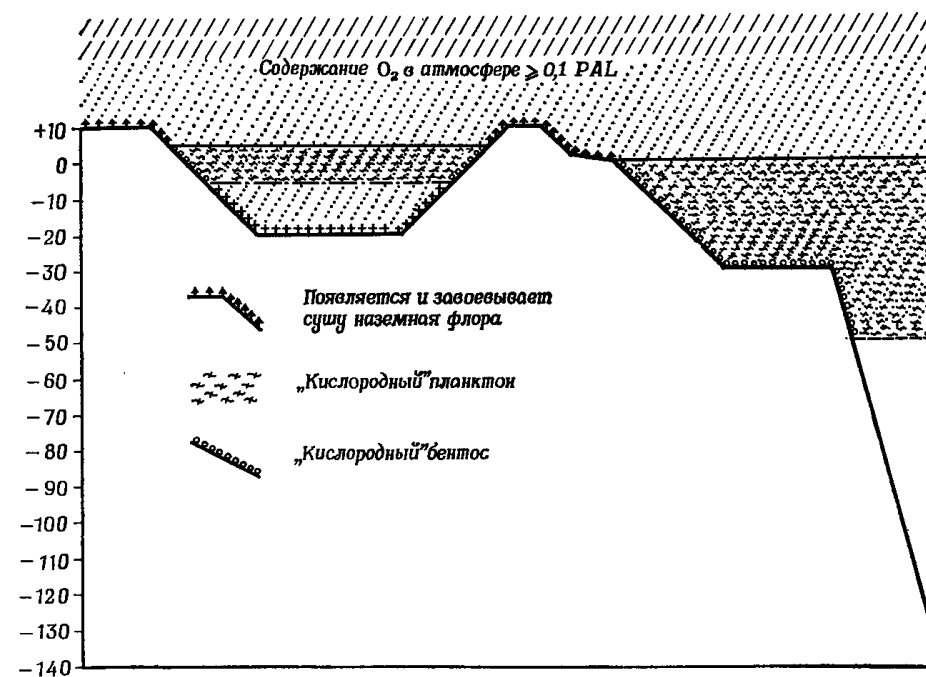
Фиг. 95. Схема распространения жизни в условиях примитивной атмосферы, в которой содержание  $O_2$  составляло 0,001 современного или ниже.

могла расстаться с защитным слоем воды и распространиться на сушу, придя в непосредственный контакт с атмосферой. Беркнер и Маршалл связывают это «завоевание суши при достижении критического уровня содержания  $O_2$ , соответствующего 0,1 современного» с началом силура, когда первые главные группы наземной флоры оставили свои следы в геологической летописи.

На фиг. 95—97 представлены схемы распределения ранней жизни при разных критических значениях содержания кислорода в атмосфере. Частично эти рисунки основаны на личном сообщении Беркнера и Маршалла (1966), но они были затем пересмотрены и изменены, так что эти авторы совершенно не отвечают за ошибочные представления, которые, возможно, встретятся в этих схемах. Они представляют собой попытку наглядно изобразить в самом общем виде расширение ареала и увеличение разнообразия



Фиг. 96. Схема распространения жизни в условиях примитивной атмосферы с содержанием кислорода примерно 0,01 современного (расшифровка некоторых обозначений дана на фиг. 95).



Фиг. 97. Схема распространения жизни в условиях примитивной атмосферы с содержанием  $O_2$  0,1 современного и выше (расшифровка некоторых обозначений дана на фиг. 95 и 96).

биотопов ранней жизни. Пока мы оставим в стороне вопрос о том, с какими геологическими периодами надо связывать этапы этого развития. Об этом мы поговорим в следующей главе.

На фиг. 95 представлена ранняя стадия развития атмосферы. Как и на двух следующих рисунках, мы видим здесь участок материка с большим неглубоким озером и прилегающим к матерiku морем. В море можно выделить две зоны: мелководное шельфовое море, лежащее на материковом плато (глубина принимается здесь равной 30 м), и гораздо более глубокое открытое море. Летальное ультрафиолетовое излучение Солнца не только свободно проходило через примитивную атмосферу, в которой содержание  $O_2$  составляло около 0,001 современного, но и проникало в воду на глубину 10 м. В этой области ничем не защищенная жизнь не могла существовать. Не было и планктонных организмов, так как примитивные прокариотические клетки еще не умели держаться подальше от опасных верхних слоев воды, регулируя глубину погружения.

Значит, могла развиваться только донная, прокариотическая, бескислородная жизнь. Как и в наши дни, этот бентос мог заселять дно озер и морей не глубже того предела, куда доходит безвредное излучение Солнца, несущее необходимую для жизни энергию. Если принять определение поглощения света, предложенное Беркнером и Маршаллом ( $1 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$  в спектральном интервале шириной 5 нм), то красные солнечные лучи проникают на глубину 100 м; однако и в современных океанах на глубинах более 50 м биомасса резко снижается. Поэтому мы возьмем эту глубину в качестве границы между фотической и афотической зонами. Впрочем, можно было бы принять за такую границу и стометровую глубину — это не внесло бы принципиальных изменений в нашу схему. На фиг. 96 изображена картина распространения жизни при содержании  $O_2$  около 0,01 современного уровня. Большая часть смертоносной ультрафиолетовой радиации все еще проходила через атмосферу (см. фиг. 94). Но в воду она проникала не глубже чем на 1 м, и в морях и озерах стало возможным развитие планктона.

Однако при таком уровне содержания кислорода в атмосфере должен был существовать резкий контраст между положением в озерах и в океане. Ввиду того что в пресной озерной воде кислород растворяется лучше, чем в соленой океанской, озера сравнительно сильнее насыщены кислородом, и, как мы видели, точка Пастера достигается в озерах уже при таком содержании кислорода в атмосфере, при котором в океане этого еще не происходит. Мы не знаем, при каком содержании кислорода в атмосфере должно проявиться это различие между озерами и океанами, но, видимо, этот уровень соответствует примерно 0,01 современного содержания  $O_2$ . Именно эта стадия в развитии атмосферы и гидросферы изоб-

ражена на фиг. 96. Теперь в верхних слоях озер уже может развиваться, пусть и в бескислородной атмосфере, аэробный и хотя бы частично способный к дыханию планктон. Бентос со сходным метаболизмом уже может занять более близкие к поверхности участки дна. Но из-за стратификации, свойственной большинству озер (гл. XIII, разд. 13), глубже лежащие слои водоема не получают постоянного притока кислорода. В результате этой местной нехватки кислорода здесь создаются гипертрофные условия. Поэтому на дне глубоких озер должна развиваться настоящая анаэробная жизнь (что наблюдается и в современных условиях). Конечно, как и теперь, некоторые из этих донных организмов — факультативные анаэробы, способные переходить к дыханию, когда сезонное перемешивание всей водной массы нарушает стратификацию и приводит всю толщу воды к равновесию с содержанием кислорода в атмосфере, составляющем в данном случае 0,01 современного.

Но в море точка Пастера к этому времени еще не достигнута. Там может возникнуть «бескислородный» и неспособный к дыханию планктон, а на дне будет по-прежнему жить примитивный «бескислородный» бентос, подобный тому, что изображен на предыдущей схеме. Однако этот бентос может теперь продвнуться на глубину около 1 м. Хотя в морях могут возникать застойные водные массы с гипертрофными условиями на дне, но это гораздо более редкое событие, чем в озерах с их обычной стратификацией. Оно связано с особым, нечасто встречающимся рельефом дна. Но на нашей схеме такая возможность не отражена; показано, что море хорошо аэрируется до нижней границы фотической зоны. Безжизненность моря глубже этой границы — тоже упрощение. Хорошо известно, что и на больших глубинах существует и бентос, и нектон<sup>1</sup>. Но численность, вернее биомасса, этих организмов настолько мала по сравнению с тем, что наблюдается в фотической зоне, что такое упрощение кажется оправданным.

На фиг. 97 изображена ситуация, когда содержание кислорода в атмосфере составляет 0,1 современной величины и выше; теперь положение дел уже сходно с современным. Жизнь завоевала сушу; в озерах и океанах появился «кислородный», способный к дыханию планктон.

## 11. КИСЛОРОД И ДВУОКИСЬ УГЛЕРОДА

Пока мы почти исключительно занимались кислородом, сравнивая его содержание в древней и современной атмосфере. Мы пришли к выводу, что весь кислород, содержащийся в нашей атмосфере, имеет биогенную природу, т. е. создан живыми организ-

<sup>1</sup> И планктон. — Прим. перев.

мами в процессе органического фотосинтеза. Теперь пора взглянуть на обратную сторону медали и заняться атмосферной двуокисью углерода.

Кислород и двуокись углерода сильно различаются по своим геохимическим свойствам. Полезно будет кратко повторить то, что мы уже знаем об этих веществах. Прежде всего большая часть свободного кислорода находится в атмосфере, тогда как двуокись углерода в основном присутствует в гидросфере, растворенная в морской воде. Кроме того, кислород, входящий в состав атмосферы, сравнительно независим от других атмосферных газов. Разумеется, он влияет на живые существа, на экзогенные геологические процессы, но изменения в содержании атмосферного кислорода не могут иметь значительных последствий для других составляющих атмосферы. Взаимоотношения двуокиси углерода с другими веществами более сложны. Снижение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере будет сначала компенсироваться высвобождением ее из океанов.

Эти равновесные реакции между атмосферой и океаном идут, с нашей точки зрения, вяло, занимая промежутки времени порядка тысячи лет. Но с точки зрения геологической истории эти реакции заканчиваются практически мгновенно. В океанских водах растворено во много раз больше двуокиси углерода, чем ее содержится в атмосфере, поэтому кратковременное снижение уровня  $\text{CO}_2$  в атмосфере не может иметь крупных геологических последствий. Оно будет восполнено  $\text{CO}_2$ , поступающей из океанов, и при такой незначительной потере океанский резервуар ничуть не оскудеет.

Содержание двуокиси углерода в океане может заметно измениться только при продолжительном снижении или повышении уровня этого газа в атмосфере. Тут проявится другое отличие геохимических свойств  $\text{CO}_2$  от свойств кислорода, а именно: двуокись углерода, растворенная в океанской воде, участвует в сложной системе реакций, в которой важную роль играют и другие соединения (гл. XIV, разд. 7). Сейчас на Земле так много свободного и связанного в окислах серы кислорода и так много углерода в ископаемых каустобиолитах (гл. XIV, разд. 4 и 5), что эти вещества не могли образоваться за счет  $\text{CO}_2$ , высвободившейся в результате геохимических реакций. Остается предположить, что в течение всей геологической истории происходило более или менее постоянное поступление  $\text{CO}_2$  в атмосферу и гидросферу из какого-то другого источника. Данные геохимии говорят, что содержание двуокиси углерода в океане никогда не могло более чем в 10 раз превышать современное, а некоторые геохимики считают, что и эта цифра преувеличена. В общем мы не вправе предположить, что в первичном океане и в примитивной атмосфере было чрезвычайно много двуокиси углерода, которая за геологическое время израсхо-

довалась в процессе органического фотосинтеза, образовав, наконец, современную кислородную атмосферу.

Нетрудно понять, откуда поступает двуокись углерода: этот газ представляет собой один из самых важных компонентов вулканических эксгаляций [8]. Таким образом, источником  $\text{CO}_2$  на протяжении миллиардов лет служило обезгаживание Земли. Но скорость производства  $\text{CO}_2$ , видимо, менялась со временем. Об этом пойдет речь в следующем разделе.

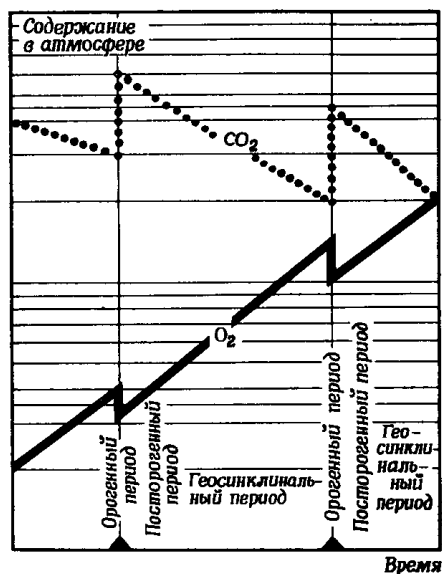
## 12. ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ КИСЛОРОДА И ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА НА ПРОТЯЖЕНИИ СМЕНЯЮЩИХ ДРУГ ДРУГА ОРОГЕНИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Из предыдущего раздела мы узнали, насколько различна роль кислорода и двуокиси углерода в истории атмосферы, в происхождении и эволюции жизни. В принципе атмосферный кислород образовался при потреблении организмами двуокиси углерода, так что история этих двух газов более или менее связана. Уровень содержания газа в атмосфере в любой данный момент — это результат равновесия между его поступлением и потреблением. Кислород появляется почти исключительно в результате органического фотосинтеза. Потребляется он в основном в двух процессах: один из них органический — дыхание, другой неорганический — окисление минералов, залегающих на поверхности. Двуокись углерода вносится в атмосферу главным образом за счет неорганического процесса — обезгаживания Земли, тогда как основной процесс потребления этого газа — органический фотосинтез.

Один из факторов, влияющих на скорость всех этих процессов, — изменения в скорости движений коры в различные периоды каждого орогенического цикла (гл. X, разд. 2). Хотя из-за недостатка данных нам приходится ограничиться чисто качественным подходом к вопросу, проблема эта заслуживает особого рассмотрения.

Займемся сначала кислородом. В геосинклинальный период любого орогенического цикла расход кислорода на окисление поверхности земной коры должен быть сравнительно невелик. Медленные движения коры выносят наверх лишь сравнительно небольшое количество веществ коры, к тому же большая часть этих веществ — горные породы верхних слоев коры, т. е. в основном осадочные породы, материал которых уже окислился во время цикла выветривание — перенос — осадкообразование. В орогенный и посторогенный периоды дело обстоит иначе. Вулканическая активность и усилившиеся движения коры выносят на поверхность гораздо более значительные массы вещества коры, причем часть этого материала поднята из глубоких, неокисленных слоев.

Значит, в геосинклинальный период потребляется меньше кислорода, чем в орогенный и посторогенный периоды. Недостаток данных мешает сказать, достаточно ли эти различия велики, чтобы повлиять на общий кислородный баланс, но если это так, то можно думать, что в каждый геосинклинальный период содержа-



Фиг. 98. Теоретическая схема влияния орогенического цикла на скорости продукции и потребления атмосферного кислорода и двуокиси углерода.

Здесь принято, что производство O<sub>2</sub> в каждом геосинклинальном периоде возрастает как следствие экспоненциального роста массы живых организмов. Но в орогенный и посторогенный периоды потребление кислорода должно быть очень интенсивным, перевешивая его производство; в результате его содержание в атмосфере снижается. Однако мы не знаем длительности орогенного и посторогенного периодов; поэтому на графике спад содержания O<sub>2</sub> изображен вертикальной линией. Ведь наш график имеет теоретический и схематический характер. Двуокись углерода регулярно потребляется в процессе органического фотосинтеза. Но в орогенный и посторогенный периоды поступление CO<sub>2</sub> сильно возрастает, так как усиливается вулканическая активность. Однако из-за недостатка данных все изменения в содержании CO<sub>2</sub> также изображены прямыми линиями. В схеме не учтены другие возможные факторы, влияющие на производство и потребление атмосферных газов. Эти факторы на протяжении какой-то части истории атмосферы могли полностью изменить картину потребления и накопления газов.

ние кислорода в атмосфере постепенно растет, а в орогенный и посторогенный периоды резко падает. График этих изменений количества кислорода в атмосфере в зависимости от скорости движений коры дан на фиг. 98. Возможно, конечно, что эти колебания гасятся за счет буферных механизмов вроде того, который вступает в действие вблизи точки Пастера (разд. 7 этой главы).

На содержание двуокиси углерода изменения скорости движения коры влияют обратным образом.

Мы можем предположить, что развитие жизни (если не было каких-то иных возмущающих воздействий) шло размеренным шагом вне зависимости от циклов горообразования. Ведь даже «более мощные движения коры» в орогенные периоды настолько медленны, что незаметны для живых организмов. И даже так называемые «большие вымирания» (гл. XIV, разд. 13), по-видимому, никак не сказывались на глобальной биомассе. Значит, изменения скорости движений коры не могли непосредственно влиять на скорость развития жизни. Следовательно, потребление CO<sub>2</sub> в органическом фотосинтезе — устойчивый процесс, не подверженный влиянию орогенических циклов.

В то же время поступление CO<sub>2</sub> из недр Земли тесно связано с процессами горообразования. В орогенный и посторогенный периоды вулканическая активность значительно усиливается, хотя количественно оценить это усиление мы также не можем. Но качественные данные, полученные из геологической летописи, позволяют предполагать, что оно очень велико. Видимо, верно будет считать, что обезгаживание Земли, при котором выделяется CO<sub>2</sub>, приурочено главным образом к сравнительно коротким орогенному и посторогенному периодам каждого орогенического цикла.

Если предположить, что эти колебания объема выделяющейся двуокиси углерода были достаточно сильными, то получится график, подобный тому, что изображен на фиг. 98. Содержание двуокиси углерода в атмосфере должно падать в геосинклинальный период и резко возрастать в орогенный и посторогенный периоды каждого орогенического цикла.

#### Список литературы

1. Berkner L. V., Marshall L. C., On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, 22, 225—261 (1965).
2. Berkner L. V., Marshall L. C., Limitation of oxygen concentration in a primitive planetary atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, 23, 133—143 (1966).
3. Ericsson E., Possible fluctuations in atmospheric carbon dioxide due to changes in the properties of the sea, *J. Geophys. Res.*, 13, 3871—3876 (1963).
4. Postma H., The exchange of oxygen and carbon dioxide between the ocean and the atmosphere, *Neth. J. Sea Res.*, 2, 258—283 (1964).
5. Rubey W. W., Development of the hydrosphere and atmosphere, with special reference to probable composition of the early atmosphere, *Geol. Soc. Am., Spec. Papers*, 62, 631—650 (1955).
6. Rutten M. G., Geologic data on atmospheric history, *Palaeogeography, Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 2, 47—57 (1966).
7. Sagan L., On the origin of mitosing cells, *J. Theoret. Biol.*, 14, 225—274 (1967).
8. White D. E., Waring G. A., Volcanic emanations. Data of geochemistry, 6th ed., *U. S. Geol. Surv., Profess. Papers*, 440-K, 29 (1963).



# ИСТОРИЯ АТМОСФЕРНОГО КИСЛОРОДА И ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

## 1. НАБРОСОК ИСТОРИИ АТМОСФЕРНОГО КИСЛОРОДА И ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

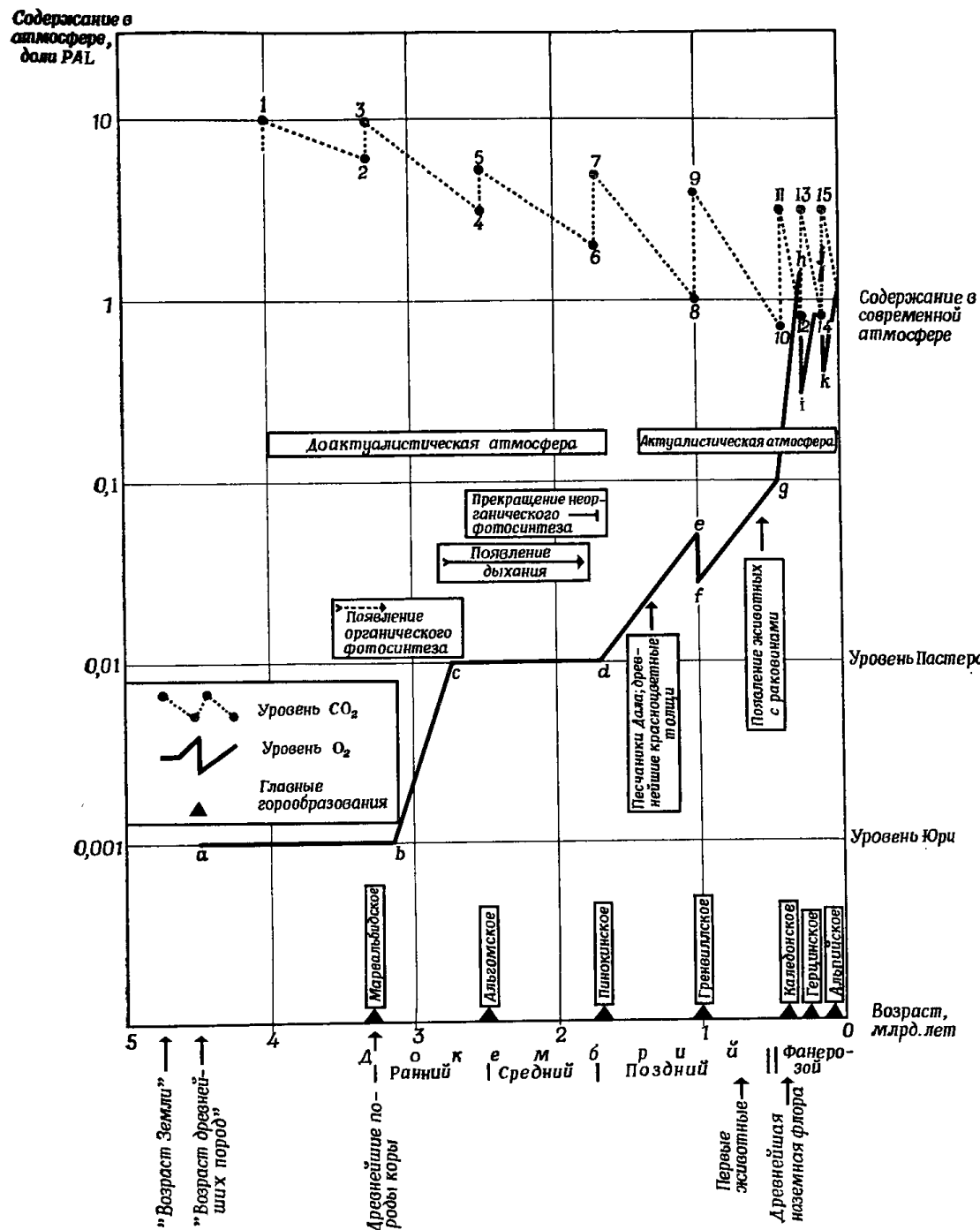
Теперь, основываясь на фактах, изложенных в предыдущих главах, можно попытаться дать краткий очерк истории появления и накопления кислорода и двуокиси углерода в атмосфере. Остальных газов атмосферы мы не коснемся, так как только эти два газа существенно важны для истории жизни. Количество водяных паров в атмосфере нашей планеты, очевидно, всегда было сравнительно неизменным (разд. 5 и 6 предыдущей главы), но данных о количестве  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в прошлом нам не хватает. Все же попытаемся представить себе историю этих двух газов. На фиг. 99 показан возможный ход изменений содержания  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  в долях PAL (PAL — содержание в современной атмосфере; см. разд. 5 предыдущей главы) с течением времени.

Поскольку мы считаем, что главные орогенические циклы играли важную роль в истории жизни, создавая условия, благоприятные для ее развития, и непосредственно влияя на производство и потребление кислорода и двуокиси углерода, на схеме отмечены главные горообразования (ср. фиг. 44). Как мы видели, в данных абсолютного возраста главных орогенных периодов еще много неточностей, и возможно, что наши представления об их возрасте в дальнейшем подвергнутся пересмотру. Но суть дела не в том, когда произошло то или иное горообразование, а в том, что орогенные и геосинклинальные периоды последовательных орогенических циклов ритмично сменяли друг друга.

«Возраст Земли» и «возраст древнейших горных пород» также указаны на фиг. 99. Как мы помним, эти данные получены не прямым измерением, а рассчитаны по изохронам радиогенных изотопов. Самая древняя датировка, полученная непосредственным радиометрическим анализом, — возраст древнейших пород коры (гл. III, разд. 14 и 16). Отмечена также основная стратиграфическая граница геологической истории — граница между докембрием и фанерозоем. Это, собственно говоря, возраст древнейшей материковой флоры высших растений (гл. XV, разд. 10).

## 2. ИСТОРИЯ АТМОСФЕРНОГО КИСЛОРОДА

Сначала мы рассмотрим историю атмосферного кислорода, так как об основных аспектах ее мы уже имеем кое-какие, впрочем довольно ненадежные, сведения. Мы знаем, что содержание кис-



Фиг. 99. Предполагаемая история атмосферного кислорода и двуокиси углерода (объяснение см. в тексте).

лорода, освобождаемого при неорганической фотодиссоциации воды, не могло подняться выше так называемого уровня Юри (гл. XV, разд. 6) — 0,35 см в нормальных условиях, т. е. менее 0,001 его содержания в современной атмосфере. Не боясь ошибиться, можно принять, что этот уровень был достигнут уже ко времени образования древнейших горных пород, т. е. 4,5 млрд. лет назад (пункт *a* на нашей диаграмме).

Через какое-то время, когда органический фотосинтез достиг такой степени развития, что за его счет кислород мог производиться быстрее, чем он терялся на окисление минералов земной коры, уровень Юри был превзойден. В предыдущей главе подчеркивалось, что потери на окисление минералов в орогенные периоды были выше, чем в геосинклинальные. Поэтому можно полагать, что уровень Юри был нарушен или перед мареальбидским горообразованием, или после него. Не имея данных о том, когда произошло это событие, я из осторожности принял, что оно произошло более чем 3 млрд. лет назад (точка *b*).

Фотосинтез должен был начаться еще до этого события, поскольку, как мы знаем, сначала за счет фотосинтеза образовывалась лишь часть всего кислорода, до того высвобождавшегося только в результате неорганической фотодиссоциации воды. Поглощение жесткого солнечного излучения в верхних слоях атмосферы, выше «холодной ловушки», где задерживаются пары воды, зависит от общего уровня содержания кислорода независимо от его происхождения. Но мы не имеем сведений ни о том, когда начался фотосинтез, ни о том, сколько времени продолжалось накопление биогенного кислорода, и цифры, указанные на нашей диаграмме, можно оспаривать.

Когда уровень Юри был превзойден, накопление кислорода в атмосфере пошло, очевидно, довольно быстро, так как кислород еще не расходовался на дыхание. Ранняя жизнь должна была развиваться без вмешательства каких-то не известных нам процессов по экспоненциальному закону, и поскольку интенсивность фотосинтеза при этом все время увеличивалась, возрастание содержания кислорода в атмосфере также должно было идти по экспоненте. На схеме этот процесс показан прямой линией (*b—c*). Угол ее наклона, говорящий о скорости накопления кислорода, в действительности может быть совсем другим — ведь он зависит от положения точек *b* и *c*, а оно не определено точно.

Другой важный момент в истории атмосферы — повышение содержания кислорода примерно до 0,01 современного, когда начинает действовать эффект Пастера и могут развиваться организмы с факультативным дыханием, способные переключаться с брожения на дыхание и обратно (гл. VIII, разд. 5 и гл. XV, разд. 7). Мы приняли, что первым свидетельством достижения этого уровня является железорудная формация Соуден, возраст которой оценивает-

ся «более чем в 2,7 млрд. лет» (табл. 18). Найденные в ней молекулярные ископаемые считаются остатками древних хлорофиллоподобных молекул, свидетельствующими о существовании в то время организмов, способных к фотосинтезу. Более того, существование полосчатых железорудных формаций указывает, по-видимому, на присутствие в современной им атмосфере небольшого количества кислорода (гл. XIII, разд. 12 и 13). Хотя достижение уровня соответствующего точке Пастера, мы отнесли примерно к периоду, отстоящему от нашего времени на 2,75 млрд. лет, что немногим больше минимального возраста железорудной формации Соуден, эта цифра опять-таки занижена. Ведь не исключено, что сама формация Соуден в действительности значительно древнее, а кроме того, как указывалось в гл. XIII, существуют и другие полосчатые железорудные формации, возраст которых составляет более 3 млрд. лет. Все же, поскольку пока нет доказательств существования жизни в тот период, я не решился отодвинуть достижение точки Пастера так далеко в прошлое. Впрочем, это изменение вызвало бы лишь сдвиг назад точки, соответствующей появлению органического фотосинтеза, и соответственно сдвиг линии *b—c*. Но общие представления о развитии кислородной атмосферы от этого не изменились бы.

Поразительный факт сосуществования в раннем и среднем докембрии неокисленных пиритовых песков (возникавших в посторогенные периоды) и частично окисленных полосчатых железорудных формаций (создававшихся в геосинклинальные периоды) позволяет утверждать, что в то время содержание кислорода в атмосфере было очень низким, так что эту атмосферу вполне можно назвать бескислородной. Очевидно, в течение всего этого периода уровень, соответствующий точке Пастера, не был превзойден (линия *c—d* на фиг. 99).

Но со временем и этот барьер был преодолен. Мы приняли, что это случилось после образования золото-урановых «риффов» формации Блайнд-Ривер, но до образования песчаников Дала, самых древних красноцветных толщ. Возраст отложений Блайнд-Ривер оценивается в 1,8 млрд. лет, а песчаников Дала — в 1,45 млрд. лет. На диаграмме принято, что это событие произошло после пинокинского орогенеза (точка *d* на фиг. 99). Как уже говорилось, достижение точки Пастера можно считать концом существования первичной бескислородной атмосферы, которую мы предварительно определили как атмосферу с содержанием свободного кислорода не выше 0,01 современного. При таком содержании  $O_2$  неорганический фотосинтез «органических» молекул становится невозможным и, таким образом, кончается сосуществование преджизни с ранней жизнью, продолжавшееся со времени появления ранней жизни (между точками *b* и *c*) до точки *e*, т. е. около 2 млрд. лет.

Дальнейшая эволюция содержания кислорода в атмосфере показана на фиг. 99 линией  $d-e-f-g-h$ . Принято, что чистый выход кислорода был в это время ниже, чем в более ранний период истории живого, когда кислород еще не расходовался на дыхание. Далее принято, что содержание кислорода в атмосфере временно снизилось в период гренвиллской складчатости, так как тогда на поверхность Земли были вынесены большие массы неокисленных горных пород и много кислорода ушло на их окисление. Это предположение не основано на прямых доказательствах, оно представляет собой просто одну из возможных моделей того, что происходило в тот период. Было ли такое снижение содержания кислорода на самом деле, мы не знаем.

В какой-то точке линии  $d-e-f-g-h$  содержание кислорода достигло такого уровня, что стало возможным появление животных. Мы знаем, что это произошло еще до начала кембрия (гл. XII, разд. 4), однако точных данных о возрасте древнейших ископаемых животных у нас нет. Вероятно, животные появились только в позднем докембрии; скорее всего они не могли существовать в бескислородной атмосфере. Но когда появились животные — до или после гренвиллского горообразования, — мы до сих пор не знаем.

Нетрудно представить себе, как содержание кислорода постепенно повысилось до 0,1 современного уровня. Тем самым была достигнута еще одна важная ступень в развитии атмосферы. При таком содержании кислорода дальний ультрафиолет поглощается атмосферой и жизнь может завоевать сушу (гл. XV, разд. 10). В это время появилась первая обильная наземная флора, найденная в силуре (0,44 млрд. лет назад) [1, 4, 3].

Надо полагать, что выход жизни на сушу повлек за собой повышение чистой продукции свободного кислорода. Поэтому участок кривой  $g-h$  изображен более крутым, чем участки  $d-e$  и  $f-g$ . Кислород быстро накапливался, так что его содержание стало превышать современный уровень, что доказывается рядом палеонтологических свидетельств, например существованием в верхнем каменноугольном периоде (около 0,3 млрд. лет назад) огромных насекомых. Очевидно, атмосфера была тогда богаче кислородом, чем сейчас. Затем содержание кислорода в атмосфере, видимо, колебалось в периоды герцинской и альпийской складчатости, оставаясь, впрочем, близким к современному уровню.

### 3. ИСТОРИЯ АТМОСФЕРНОЙ ДВУОКСИ УГЛЕРОДА

Восстановить историю двуокиси углерода еще труднее, чем историю атмосферного кислорода. Во-первых, здесь мы не находим регулирующих механизмов, какие известны для кислорода, и, следовательно, не можем представить себе, как изменялось содержа-

ние двуокиси углерода в атмосфере. Мы можем лишь набросать кривую этого изменения так, как она нам представляется. Спады и подъемы уровня содержания  $CO_2$  должны почти зеркально отражать изменения содержания кислорода (фиг. 98). Очевидно, содержание двуокиси углерода и в атмосфере, и в океанах должно было возрастать в орогенные периоды и снижаться в геосинклинальные периоды.

Сведений об абсолютных значениях уровня  $CO_2$  в различные эпохи мы не имеем, и цифра 10 PAL должна рассматриваться как весьма спорная. По мнению Л. Силлена (личное сообщение, 1967; гл. XIV, разд. 7), геохимические соображения не позволяют принять столь высокое содержание  $CO_2$ : в этом случае на морском дне откладывались бы иные минералы, чем те, что мы находим теперь в осадочных породах морского происхождения.

Далее, в каждый следующий геосинклинальный период снижение уровня  $CO_2$ , по-видимому, было более значительным, чем в предыдущий, так как биомасса фотосинтезирующих организмов неуклонно росла и с ней росло потребление двуокиси углерода. Поэтому наклон каждого последующего отрезка кривой (1—2, 3—4 и т. д.) сделан все более крутым. В то же время поступление двуокиси углерода из недр, как принято считать, было примерно одинаковым во все орогенные периоды. Ось ординат на фиг. 99 градуирована по логарифмической шкале, поэтому отрезки 2—3, 4—5 и т. д. имеют разную длину. Мы не можем хотя бы качественно оценить такие факторы, как размах вулканической активности и объем  $CO_2$ , выделившейся из недр за время какого-либо орогенического цикла. Поэтому поступление  $CO_2$  за один цикл условно принято равным 3PAL.

Самое существенное в истории атмосферной двуокиси углерода — то, что в конце каждого геосинклинального периода уровень  $CO_2$  был, по-видимому, минимальным. Поэтому можно предположить, что в какой-то момент длительного геосинклинального периода между гренвиллским и каледонским орогенезами уровень содержания двуокиси углерода опускался ниже современного. Это могло способствовать образованию фосфатных и известковых раковин у морских организмов, а появление таких раковин, как известно, относится к началу кембрия, т. е. к палеозою.

### 4. «ВЗРЫВ ЖИЗНИ» В НАЧАЛЕ КЕМБРИЯ

Рассмотрение истории атмосферной двуокиси углерода привело нас к так называемому «взрыву жизни», которое многие палеонтологи относят к началу кембрия. Беркнер и Маршалл [2] уделили много внимания этому «взрыву», с которым они связывают повышение содержания кислорода до 0,01 современного уровня, когда «жизнь смогла завоевать море».

На самом деле представление о «взрыве жизни» в начале кембрия основано на недоразумении. Начало кембрия не связано со «взрывом жизни» или хотя бы «взрывом животной жизни». Из гл. XII мы знаем, что уже в позднем докембрии существовали богатые и разнообразные фауны. Всюду, где они только могли сохраниться, мы находим их остатки. Так называемый «взрыв жизни» в начале кембрия в действительности не что иное, как «взрыв ископаемых». Просто именно в этот период некоторые группы животных приобрели способность выделять твердые раковины, которые сохраняются в ископаемом виде гораздо лучше, чем мягкие ткани животных. Вначале раковины были фосфатными, а затем появились еще более прочные известковые раковины моллюсков и плеченогих.

Упоминание о «взрыве жизни» в начале кембрия можно, кажется, найти в любом общем учебнике палеонтологии или исторической геологии. В таких руководствах обычно рассматриваются факты, относящиеся, собственно, не к истории жизни, а к истории ископаемых. Как удачно сказал голландский палеонтолог И. ван дер Влерк, внезапное появление с начала кембрия множества ископаемых остатков свидетельствует не о «взрыве жизни», а просто о том, что в это время у животных «вошли в моду» раковины.

Почти одновременное появление способности секретировать раковины у самых разных, не связанных между собой групп животных говорит о каком-то новом факторе среды, появившемся в начале кембрия. Если, как мы говорили в предыдущем разделе, содержание двуокиси углерода падало тогда ниже современного уровня, то должна была возрасти щелочность океанов и озер, а в этих условиях облегчается биохимическое образование фосфатов и карбонатов. Раз появившись, эта способность секретировать фосфаты и карбонаты легко смогла закрепиться и сохраниться и в изменившихся условиях, т. е. при повысившейся в результате последующего роста содержания  $\text{CO}_2$  кислотности. Современные пресноводные моллюски, обитающие в озерной воде с очень низким содержанием кальция, не только строят известковые раковины, но и защищают эти раковины от растворения толстым слоем рогового вещества — перистракумом.

Подведем итог: так называемый «взрыв жизни» в начале докембрия не что иное, как «взрыв ископаемых». Он не связан с историей атмосферного кислорода и объясняется, видимо, временным снижением содержания двуокиси углерода в течение длительного спокойного периода между гренвиллским и каледонским горообразованием.

Недавно совершенно иное объяснение внезапному появлению раковин выдвинул Тоув [5]. Он подчеркнул роль синтеза коллагена у древних животных. Коллаген — главный элемент плотной фиброзной соединительной ткани, составляющей опорную основу

мышц и органов у всех многоклеточных животных, а также основу раковин и скелетов. Синтез коллагена, этого уникального по строению и свойствам белка, молекула которого представляет собой тройную спираль и состоит из аминокислот глицина, пролина и оксипролина, может идти только в присутствии молекулярного кислорода.

В бедной кислородом атмосфере реакции присоединения кислорода, требующие от клетки больших энергетических затрат, будут прежде всего использоваться не для синтеза коллагена, а для жизненно важных процессов энергетического обмена. Поэтому в условиях бедной кислородом атмосферы коллаген будет синтезироваться только в тех случаях, когда он совершенно необходим организму: скажем, для укрепления целома, мускулатуры, для развития сегментации. Только при повышении содержания кислорода в атмосфере могут появиться раковины, кутикулы и панцири. Конечно, их роль весьма существенна, но все же их нельзя считать органами первостепенной важности, без которых невозможно само существование животных. Это скорее «физиологическая роскошь».

Итак, по мысли Тоува, «взрыв раковин» в начале кембрия связан не с временным снижением содержания  $\text{CO}_2$ , а с общим повышением содержания кислорода. Вполне возможно, что тут действовали оба фактора.

#### Список литературы

1. Axelrod D. I., Evolution of the psilophyte paleoflora, *Evolution*, 13, 264—275 (1959).
2. Berkner L. V., Marshall L. C., On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, 22, 225—261 (1965).
3. Chaloner W. G., An outline of Pre-Cambrian and Pre-Devonian microfossil records: Evidence of early land plants from microfossils (abstract), *Intern. Botan. Congr.*, 10th, Edinburgh, 1964, 16—17, 1964.
4. Stewart W. N., More about the origin of vascular plants, *Plant Sci. Bull.*, 6, 1—5 (1960).
5. Towe K. M., Oxygen-collagen priority and the early Metazoan record, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Wash., 65, 781—788 (1970).

## Глава XVII

## ЖИЗНЬ ВНЕ ЗЕМЛИ?

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Прежде чем подвести в последней главе итог всему сказанному, мы должны сделать краткое, отнюдь не исчерпывающее, но очень интересное отступление: мы рассмотрим образования, встречающиеся иногда в метеоритах и рассматриваемые некоторыми учеными как остатки живых существ. Интерес к этой проблеме возник сравнительно недавно, в 1961 году, когда появились работы Б. Надя и Дж. Клауса [7, 31]. Надя, химик-органик по профессии, извлек углеродные соединения из метеорита Orgueil и показал, что они, по крайней мере частично, сходны с органическими соединениями из современных живых существ. Чтобы проверить, не объясняется ли это загрязнением образца (метеорит хранится в музее уже целый век), Клаус, микробиолог по специальности, исследовал пробу с целью обнаружить остатки земных микроорганизмов. Он нашел лишь очень немного остатков современной жизни, но зато обнаружил в метеорите многочисленные микроскопические «организованные элементы», разнообразные по своей морфологии. По внешнему виду они напоминают некоторые ископаемые водоросли, но отличаются от всех известных нам современных организмов.

Эти факты заставляют предположить, что углеродсодержащие соединения и «организованные элементы» из метеорита Orgueil и сходных с ним метеоритов представляют собой fossilized остатки внеземной жизни. Но даже самые осторожные намеки на такую возможность (см., например, [9, 24, 32, 33]) сразу же были встречены резкой критикой (см., например, [1, 13]). Любопытно, что критики чаще всего подчеркивали возможность попадания в метеорит биогенных веществ земного происхождения, хотя исследователи метеоритов с самого начала помнили о такой возможности и фактически «организованные элементы» были найдены в ходе проверки проб на загрязненность. В настоящее время это возражение уже отброшено. Но, как мы узнаем из этой главы, до сих пор нет общего мнения о природе найденных соединений: не ясно, следует ли считать их биогенными или абиогенными.

## 2. МЕТЕОРИТЫ

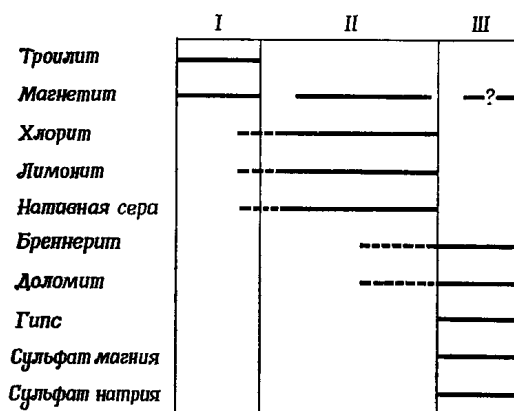
Прежде чем продолжить рассмотрение особенностей некоторых метеоритов, мы должны определить место метеорита Orgueil и сходных с ним тел в общей классификации метеоритов. Метеориты [21, 23] классифицируются обычно по двум признакам: по составу и по тому, содержат ли они мелкие (до 1 мм в диаметре) сферические агрегаты — *хондры*. По составу метеориты делятся на *железные*, *железо-каменные* и *каменные*. Хондры встречаются только в каменных метеоритах, причем составляют большую их часть. Такие метеориты называются *хондритами* в противоположность *ахондритам*. Возможно, последняя классификация является генетической: предполагают, что хондриты — первичная форма метеоритов, а ахондриты образовались из них при вторичном процессе нагревания, плавления и перекристаллизации при охлаждении.

За редкими исключениями, метеориты резко отличаются по составу от пород земной коры. В железных метеоритах преобладают минералы никеля и железа, в каменных — железо-магнезиальные силикаты, а ведь земная кора состоит в основном из кварцево-алюминиевых силикатов. В минералах обычных метеоритов отсутствует вода, и сформировались они в сильно восстановительных условиях, а минералы земной коры, как правило, гидратированы и (или) окислены.

Но небольшая группа так называемых *углистых метеоритов* во многих отношениях решительно отличается от всех остальных. Их называют обычно «углистыми хондритами», так как они относятся к каменным метеоритам, которые, как мы знаем, в большинстве случаев содержат хондры. Однако некоторые, причем самые типичные из углистых метеоритов хондр не содержат. Историю возникновения этих метеоритов понять сложно, но, вероятно, они формировались в таких условиях, в которых хондры — эти «огненные капли дождя расплавленных силикатов», как образно называет их один автор, — не могли образоваться. Поэтому лучше называть эти камни просто углистыми метеоритами. В них содержится заметное, а иногда и большое, количество воды, а также значительное количество углерода. Они состоят главным образом из силикатов чешуйчатого строения, напоминающих глинистые минералы, а их общая формула сходна с формулой обычного на нашей планете минерала хлорита.

Бострем и Фредрикссон [5] изучали историю одного из наиболее полно исследованных углистых метеоритов — метеорита Orgueil. Они нашли, что этот метеорит формировался в три стадии. На первой он состоял из минералов типа троилита (особая форма FeS), стабильных при температуре до нескольких сот градусов Цельсия. На второй стадии появились минералы типа хлорита и лимонита, образующиеся при температурах не выше 170° C, а на последней —

карбонаты и фосфаты, сформировавшиеся при температуре ниже  $50^{\circ}\text{C}$ . Последняя стадия проходила в водной среде (фиг. 100), да и на второй стадии, очевидно, присутствовал водяной пар. На третьей стадии вещество метеорита Orgueil было раздроблено, а затем вновь сцементировалось.



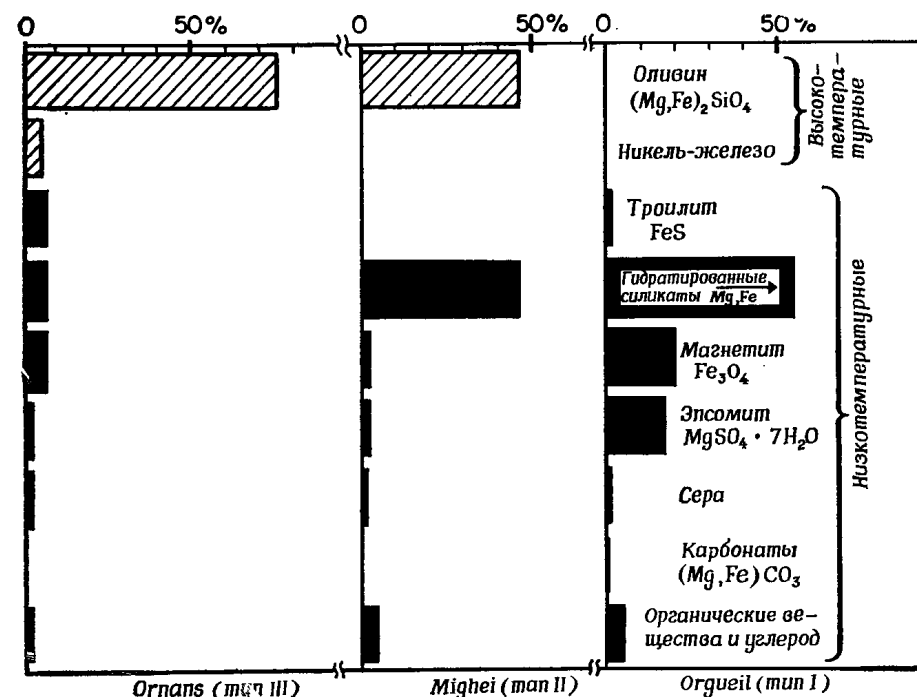
Фиг. 100. Последовательность образования минералов из метеорита Orgueil. Минералы, присутствующие на каждой стадии, отмечены сплошными линиями; прерывистой линией отмечено возможное существование данного минерала на данной стадии. На первой стадии минералы формировались при температуре в несколько сот градусов Цельсия. На второй стадии температура, видимо, была ниже  $170^{\circ}\text{C}$ , а на третьей — менее  $40^{\circ}\text{C}$ ; при этой температуре в водной среде шла жильная минерализация.

Разнообразие состава метеоритов уже в 1866 году навело известного французского геолога и минералога Г. Добрэ (1814—1896) на мысль, развитую подробнее Дэли [11], по которой метеориты представляют собой обломки существовавшей некогда планеты земного типа. Затем Добрэ по аналогии предположил, что наша планета имеет железо-никелевое ядро, сходное по составу с минералами железных метеоритов, и мантию, состоящую из железомagneзиальных силикатов, подобно каменным метеоритам (фиг. 11). Кстати заметим, что до сих пор единственным более или менее серьезным «доказательством» того, что Земля имеет железо-никелевое ядро, служит аналогия с железо-никелевыми метеоритами. Тогда углистые метеориты должны представлять собой образцы пород коры распавшейся планеты.

### 3. УГЛИСТЫЕ МЕТЕОРИТЫ

Как уже говорилось, число углистых метеоритов невелико. Разные ученые используют разную классификацию, относя некоторые метеориты то к углистым, то к обычным каменным. Но в це-

лом известно около 20 углистых метеоритов (общее число каменных метеоритов — около 950). По общему химическому составу они близки к «высокожелезистой» подгруппе каменных метеоритов,



Фиг. 101. Минералогия углистых хондритов.

Отношение низкотемпературных (черные столбики) к высокотемпературным (заштрихованные столбики) минералам растет от типа III к типу I. Понятие «низкотемпературные» включает здесь все три температурных диапазона, приведенных на фиг. 100.

хотя отличаются от нее глинистой природой своих минералов, что связано с высоким содержанием в них воды. Однако с петрографической точки зрения эти метеориты сильно отличаются от обычных каменных.

Так, Берцелиус [3], получивший в 1834 году очень маленький кусочек углистого метеорита Alais, решил сначала, что это просто комочек почвы, в которую упал метеорит. Только удостоверившись, что полученный образец действительно представляет собой частицу метеорита и что все обнаруженные фрагменты выглядят так же, Берцелиус занялся химическим анализом. Окончив работу, он констатировал: «...Нет сомнения, что исследованный камень, несмотря на все свое внешнее несходство, является метеоритом и, видимо,

имеет то же происхождение, что и обычные метеориты». Берцелиус был первым ученым, предположившим, что наличие в метеоритах углистого вещества может свидетельствовать о существовании внеземной жизни. Но затем он отбросил это предположение, не приводя, впрочем, никаких аргументов против него.

Работа Берцелиуса интересна для нас еще в одном отношении: мы можем видеть, какие грубые методы анализа приходилось тогда использовать. Так, тот факт, что углерод присутствует в метеорите не в виде угля, был доказан следующим образом: «размельченный камень имел зеленовато-бурый цвет, после сухой перегонки превратившийся в угольно-черный», а угли меняют свой цвет иначе. Не буду приводить другие цитаты с описанием анализов, подчеркну лишь, как далеко ушла за эти полтора века аналитическая химия, какими утонченными методами располагает ныне химик-органик для анализа углистых метеоритов.

Хотя, как мы видели, углистых метеоритов известно мало, они весьма разнообразны. Вийк [45] делит их на три подкласса (фиг. 101). Углистые метеориты типа I самые необычные из всех, в них особенно много воды и углерода. Содержание углерода составляет 3—7%, связанной воды — до 22%. Такие метеориты состоят в основном из гидратированного железо-магнезиального силиката, магнетита и сульфата магния. Хондр в них нет; их плотность около 2,2. В углистых метеоритах типа III содержится 0,5—2% углерода и 2% связанной воды; состоят они в основном из оливина; их плотность — около 3,4. Тип II — промежуточный. Для нас наиболее важны метеориты типа I. Их найдено всего 5: Alais (1806), Orgueil (1864), Tonk (1911), Ivuna (1938) и Revelstoke (1965).

Последний случай падения углистого метеорита, вблизи Аленде в Мексике (метеорит Allende)<sup>1</sup>, привлек широкое внимание, так как это был метеоритный дождь из нескольких дюжин камней. Общий вес обломков — более 1000 кг. Но этот случай для нас не представляет интереса: метеорит Allende относится к типу III углистых метеоритов.

Метеорит Orgueil взорвался в атмосфере, образовав метеоритный дождь, хорошо заметный на большом расстоянии и отмеченный многими наблюдателями. Было собрано множество осколков, и подавляющая часть новых работ по углистым метеоритам выполнена именно на этом богатом материале. Но параллельно проводились работы и на других метеоритах этого типа, причем результаты, полученные при исследовании метеорита Orgueil, были подтверждены (см., например, [18 и 41]).

<sup>1</sup> Метеорит Allende упал 8 февраля 1969 года. — *Прим. перев.*

#### 4. УГЛИСТЫЙ КОМПЛЕКС

Важная особенность углистых метеоритов — наличие у всех у них тонкой стекловидной коры, образовавшейся, по-видимому, при расплавлении наружного слоя метеорита под действием высокой температуры, развивающейся во время прохождения метеоритом земной атмосферы. Эта кора, которую можно сравнить с теплоизоляционным слоем космических кораблей, не пропускает жар во внутреннюю часть метеорита. Поэтому внутри метеоритов сохраняются минералы, не выносящие сильного нагрева, например гипс.

Исследование углистого комплекса шло по двум направлениям. Изучалась, во-первых, химическая природа экстрагированных органических (или «органических») веществ и, во-вторых, морфология и природа «организованных элементов». Каждое направление связано со своими трудностями. Анализ углистого комплекса затрудняется тем, что лишь небольшая часть составляющих его веществ растворима и может быть экстрагирована. В основном они представляют собой нерастворимый остаток, сходный с керогеном (гл. VIII, разд. 3) или битумом. Этот остаток может быть разрушен действием озона [4], но пока провести его полный анализ не удалось. «Организованные элементы» так малы, что их невозможно выделить для проведения химического анализа. Таким образом, нельзя понять, к чему относятся результаты анализа — к аморфной массе углистого комплекса или к «организованным элементам». Более того, когда два исследователя говорят о свойствах «организованных элементов» одного и того же метеорита, никогда нельзя быть уверенным, что они говорят об одном и том же (см., например, [8 и 27]).

Основные группы «органических» соединений, найденных в углистых метеоритах, перечислены в табл. 23. Полный перечень соединений, обнаруженных в метеорите Orgueil, со структурными формулами и библиографией можно найти в работе Надя [28], а список соединений из метеоритов Murray и Holbrook — в работе Гейса и Биманна [16]. Многие из этих веществ, например вся группа насыщенных углеводородов, карбоновые кислоты, в том числе жирные кислоты с неразветвленной цепью, и азотистые основания нуклеотидов часто встречаются в земных осадочных горных породах, а также в живом и фоссильном веществе. Некоторые из найденных в метеоритах соединений, например ароматические углеводороды и порфирины, — обычные компоненты осадочных пород и нефти; наконец, некоторые из этих веществ, в частности триазины, насколько известно, не играют никакой роли в биологии земных организмов.

На первый взгляд этот внушительный список соединений, присутствующих также в земных организмах и в нефти, которая, по-видимому, имеет биогенную природу, кажется решающим доказа-

Таблица 23

## Основные «органические» соединения, найденные в углистых метеоритах [30]

Углеводороды	Другие соединения
<i>Насыщенные углеводороды</i> <i>n</i> -Алканы Алканы с разветвленной цепью Изопреноиды Циклоалканы  <i>Олефиновые углеводороды</i>  <i>Ароматические углеводороды</i> Алкилбензолы Нафталин Аценафтенy Аценафтилены Фенантрены, антрацены Пирены	<i>Карбоновые кислоты</i> Жирные кислоты с неразветвленной цепью Бензолкарбоновые кислоты Оксисбензойные кислоты  <i>Азотистые соединения</i> Пиримидины Пурины Гуанилмочевина Триазины Порфирины

тельством того, что вещества углистого комплекса представляют собой фоссилизированные остатки внеземной жизни, существовавшей некогда на распавшейся планете или на других телах Солнечной системы. Правда, в списке есть и такие группы соединений, которые не встречаются в знакомой нам живой материи, но этот факт не может служить доводом против биогенной природы углистого комплекса. Такие вещества вполне могли сформироваться в течение позднейшей истории углистого комплекса на родительском теле метеоритов. Ведь и в нефти мы находим некоторые соединения (например, пиридины, карбазолы и т. п.), не содержащиеся в живом веществе, но возникшие из него в процессе образования нефти [17, 26].

Однако есть одно серьезное возражение, мешающее признать внеземное биогенное происхождение углистого комплекса. Ведь все соединения, перечисленные в табл. 23, были синтезированы в модельных экспериментах с первичной атмосферой, описанных в гл. VI. Хотя разнообразие «органических» соединений, найденных в углистых метеоритах, уже само по себе служит веским доводом в пользу биогенной природы углистого материала, а значит, и в пользу существования внеземной жизни, но счесть его окончательным и решающим доказательством нельзя. Не исключено, что все эти вещества образовались неорганическим путем в условиях бескислородной планетной атмосферы или на поверхности астероидов, неспособных удержать атмосферу, а может быть,

даже, как полагают проф. Андерс и его сотрудники, в околосолнечной туманности [15, 40].

Итак, несмотря на фантастическое развитие аналитической техники за последние годы, несмотря на то что сейчас мы гораздо больше знаем об этих углеродистых соединениях, мы все еще не можем дать окончательного ответа на вопрос, являются ли исследованные вещества остатками внеземной жизни.

Значит, требуются еще более тонкие методы анализа. Может быть, решающий ответ даст изучение оптической активности этих соединений, хотя и здесь, очевидно, необходима осторожность в выводах (гл. XIV, разд. 2). До сих пор не удалось достоверно обнаружить у вещества углистых метеоритов оптическую активность. Мейншейн и сотр. [25] считают, что положительные результаты, полученные ранее некоторыми авторами, могут быть отнесены на счет загрязнения земными биогенными веществами. И хотя Надь и сотр. [34] сообщили, что им удалось найти оптическую активность у незагрязненного вещества из метеорита Orgueil, другие исследователи не смогли подтвердить их результат. Возможно, дело в том, что методика их работы слегка отличалась от методики Нады. Но не исключено (и это худший вариант), что результат Нады представляет собой артефакт. Итак, пока нет других данных, нам, к сожалению, придется считать это сообщение сомнительным.

Может быть, дать ответ на наш вопрос позволит анализ нерастворимых веществ. В 1964 году Дюшен и сотр. [12] сравнивали углеподобное вещество метеорита с земным углем и пришли к весьма многообещающему выводу. Они пишут: «Все эти соответствия указывают на возможность того, что углистое вещество метеорита хотя бы частично может иметь биогенное происхождение». Но и этот важный вывод нельзя считать окончательным. Ведь, как заключает Надь [28], «интересно было бы провести подобное сравнение и с неорганически синтезированными битумами», а такая проверка еще не выполнена.

Итак, мы видим, что данные, полученные при химическом изучении углистого комплекса, пока не позволяют с уверенностью говорить о существовании жизни вне Земли. С другой стороны, не исключено, что если исследованные вещества и не являются продуктами жизни, то они могут быть продуктами преджизни, подобной той, которая, по нашему мнению, существовала некогда на Земле.

Хотя в настоящее время мы не можем сказать, действительно ли углистый комплекс метеоритов образован преджизнью или жизнью, можно утверждать, что это внеземное вещество. Это показал Клейтон [10], который определял отношение стабильных изотопов  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  и  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в карбонатных минералах (неуглистое вещество!) метеорита Orgueil. Минералы эти, доломит  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  и бреннерит  $(\text{FeMg})\text{CO}_3$ , составляют, вместе взятые, всего 0,3%



массы метеорита, но этого вполне достаточно для анализа. Оказалось, что отношение стабильных изотопов кислорода в названных минералах такое же, как и в земных веществах, но по изотопам углерода они отличаются от земных. Отношение  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  для этих веществ на 6% выше, чем в любом известном геологам карбонате. Хотя мы видели, что в земных горных породах это отношение довольно сильно варьирует (гл. XIV, разд. 9), величины, найденные для метеорита Orgueil, настолько высоки, что совершенно исключают возможность земного происхождения изученных карбонатных минералов.

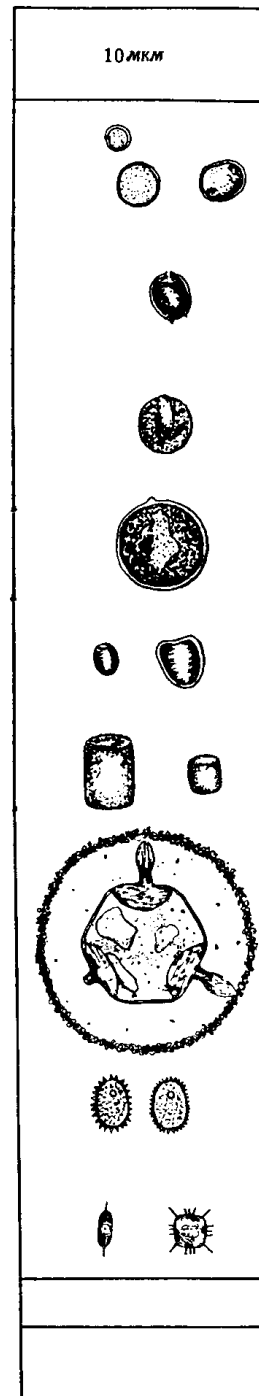
Кстати, этот результат свидетельствует о том, что внутренние части углистых метеоритов, используемые для всех анализов, не подверглись загрязнению земными веществами. Возможность такого загрязнения вновь выступила на первый план, когда оказалось, что кора метеорита Pueblito de Allende (Мексика) за месяц, прошедший после падения, успела сильно загрязниться [14]; впрочем, пробы, взятые из ядер других метеоритов, очевидно, не загрязнены.

Почему отношение  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в карбонатах метеорита Orgueil так высоко, мы не знаем. Интересно, что отношение стабильных изотопов серы в метеоритах других типов, как в железных, так и в каменных, соответствует земному. Может быть, такое отклонение объясняется какими-то не свойственными земным условиям процессами разделения изотопов или недостаточной полной гомогенизацией вещества углистых метеоритов на самой ранней стадии их образования. Пока об этом можно лишь гадать.

Так или иначе, история происхождения метеоритов для нас не столь уж важна; достаточно запомнить, что вещество углистых метеоритов имеет внеземное происхождение.

### 5. «ОРГАНИЗОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ»

Фото 43—46 и фиг. 102 дают представление о морфологии «организованных элементов». Полный каталог найденных к 1962 году форм приводится в работе Мамикуньяна и Бриггса [19]. «Организованные элементы» — это микроскопические (5—50 мкм, чаще всего 6—15 мкм) «одноклеточные» образования. Часто можно рассмотреть детали строения, например двойные стенки, поры, шипы. Итак, нельзя сказать, что эти образования крайне просты. Поэтому не удивительно, что среди ученых, безоговорочно принимающих эти структуры за остатки внеземной жизни, больше всего микробиологов (ср. [36]). Во-первых, они видят в этих образованиях такую степень организации, которую привыкли связывать с жизнью, — следовательно, это фоссилизированные существа; во-вторых, такие формы не обнаружены на Земле — следовательно, они принадлежат к внеземной жизни.



Тип организованный элемента	Название	Распространенность	Размеры мкм
1	<i>Apolinarisphaera meteoricola</i> [7] <i>Clausisphaera fissa</i> [38]	Очень часто	4—12
2.	<i>Stemmatopila uniporata</i> [7]	Часто только в метеоритах Orgueil [7], Ivuna [38]	Ширина 13—15 Длина 16—18
2.	<i>Disacerra sulcata</i> [7] <i>Subreticulate pollen</i> [38]	Часто	Диаметр 12—18
2.	<i>Apophoreta aethrodescensa</i> [7] Incertae sedis type B [38]	Не слишком обычно	Диаметр 16—22
3.	<i>Ancilicula vetusta</i> [7]	Обычно	Ширина 10—16 Длина 14—18
4.	<i>Dactylitheca daedala</i> [7] Incertae sedis type A [38]	То же	Ширина 8—14 Длина 10—20
5.	<i>Daidaphore brezelii</i> [7] <i>Caelestites sexangulatus</i> [38]	Очень редко	Общий диаметр 25—30 Одиночное тело $d=8-16$ Длина трубчатого выроста 0,8—1,8 Ширина выроста 0,6—1,2
6.	<i>Siderolappa lapillata</i> [7]	Редко	Ширина 10—21 Длина 14—16
7.	<i>Oscenoscaeva proavita</i> [7]	То же	Диаметр 4—6 Толщина 2—3
8.	Тип ткани В [38]	»	30—40
9.	<i>Protoleiosphaeridium A</i> [38]	»	25—30

Фиг. 102. Основные «организованные элементы», известные по работам Клауса и Нада [7] и Стэплина [38].

Надо отметить одну важную особенность «организованных элементов»: они крайне многочисленны, так что речь в данном случае идет отнюдь не о единичных счастливых находках. На 1 мг вещества углистого метеорита приходится примерно 1800 «организованных элементов».

Проф. А. Папп из Вены (личное сообщение, 1964) заметил, что такая многочисленность «организованных элементов» — единственный аргумент, заставляющий сомневаться в том, что эти образования представляют собой фоссилизированные остатки жизни. Папп считает, что вряд ли на родительском теле углистых метеоритов жизнь могла быть настолько обильной — гораздо обильнее, чем на Земле. Но, как мы видели на примере докембрийской флоры из формации Ганфлинт (гл. XII, разд. 13), на Земле также местами встречаются скопления ископаемых — там, где складывались благоприятные для фоссилизации условия. Ранняя жизнь была, по нашим меркам, примитивной, но это не означает, что она не могла быть обильной.

Главная альтернатива толкования «организованных элементов» как фоссилизированных остатков внеземной жизни — утверждение, что они представляют собой продукт наземного загрязнения. Высказывалось даже мнение, что 90% «организованных элементов» есть не что иное, как наземное загрязнение. В частности, под подозрением находится пыльца растений, особенно *Ambrosia*, которая растет вблизи городов. Конечно, пыльца всегда может попасть на микроскопический препарат. Но утверждение, что почти все «организованные элементы» не что иное, как земное загрязнение, затрагивает профессиональную честь микробиологов, работавших с углистыми метеоритами. Каждый микробиолог, приступая к любой работе, помнит о возможности загрязнения. К тому же микробиологи сравнивали загадочные структуры с современными микроорганизмами и не нашли сходства между ними. Да ведь и целью работы, как мы видели, была вначале проверка возможности загрязнения проб метеорита земными организмами во время хранения проб в музее. Утверждать, что большая часть «организованных элементов», если не все они, представляет собой пыльцу *Ambrosia*, — это то же самое, что сказать физику, будто он не умеет читать показания своих приборов, или химику — что он не умеет работать с чистыми веществами.

Надо признать, что микрофотографии «организованных элементов» и пыльцы *Ambrosia*, сделанные Фитчем и Андерсом [13], действительно говорят о некотором их сходстве (фото 47). Но это лишь поверхностное сходство. Фотографии, сделанные при таком большом увеличении, неизбежно бывают нечеткими. Каждый, кто сравнивал под микроскопом препараты обоих объектов, согласится, что сходство это лишь кажущееся и что «организованные элементы» не имеют ничего общего с пылью *Ambrosia*.

«Организованные элементы» сравнивались и с другими формами земной жизни. На фото 48 «организованный элемент» из метеорита Orgueil сопоставлен с ископаемым представителем динофлагеллят<sup>1</sup>. Но и здесь сходство лишь поверхностное, так как «организованный элемент» значительно мельче динофлагелляты. Я думаю, правильно будет сказать, что каждый раз при сопоставлении «организованных элементов» с какими-либо похожими формами земной жизни сходство при ближайшем рассмотрении оказывается лишь внешним.

К тому же многие, если не все, «организованные элементы» минерализованы; следовательно, они не могут быть результатом загрязнения земными формами жизни. Современные организмы просто не успели бы минерализоваться за то время, что метеориты пролежали на музейных полках. Однако природа этой минерализации еще не совсем ясна. Мюллер [27] сообщает, что все «организованные элементы» состоят из оливина, который представляет собой высокотемпературный минерал. Минерализация оливином должна была разрушить все структуры, созданные преджизнью или жизнью. В таком случае то, что мы видим, — всего лишь артефакты. Но Клаус и сотр. [8] возражали Мюллеру; теперь считается, что в этих работах речь шла о разных структурах. Надь и сотр. [32, 33] анализировали «организованные элементы» методом электронного микроскопа и нашли, что эти структуры минерализованы соединениями железа, хлора и некоторых других элементов, а это свидетельствует о том, что формирование «организованных элементов» происходило в водной, низкотемпературной среде.

Кроме возможности наземного загрязнения, критики гипотезы биогенного происхождения «организованных элементов» указывают на возможность неорганического синтеза таких микроскопических структур с двойными стенками. При этом ссылаются на работы Фокса (гл. VI, разд. 6). Но я думаю, что сложность строения стенок «организованных элементов» недвусмысленно указывает на их биогенную природу. Поэтому я склонен верить микробиологам и микропалеонтологам, которые, рассмотрев структуры, найденные в метеоритах, считают их биогенными. Многолетняя работа с биологическими объектами развивает у специалиста тонкую интуицию. Однако интуиция не может быть выражена в формулах, и поэтому биологу трудно убедить представителей так называемых точных наук.

Итак, приходится признать, что, несмотря на доказательства в пользу биологического происхождения «организованных элементов», имеющиеся в нашем распоряжении данные не позволяют пока утверждать, что они представляют собой фоссилизированные остатки внеземной преджизни или жизни.

<sup>1</sup> Одноклеточные водоросли. — Прим. перев.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Почти все исследователи, занимавшиеся в последнее время углистыми метеоритами, отмечают, что проблема происхождения углистого комплекса была бы гораздо проще, если бы мы имели представление о происхождении метеоритов. К сожалению, единственное, в чем мы уверены, — это то, что данные метеориты возникли в нашей Солнечной системе. Сложность состоит в том, что многие метеориты, в том числе и углистые, явно имеют запутанную историю, разные этапы которой не всегда хорошо вяжутся друг с другом.

Теория распавшейся планеты, находившейся когда-то между орбитами Марса и Юпитера, так основательно разработанная Дэли ([11]; см. разд. 2 этой главы), сейчас уже оставлена в основном в связи с тем, что строение и химический состав метеоритов крайне разнообразны. Сейчас считают, что разнообразие это слишком велико, чтобы можно было допустить происхождение метеоритов от одной планеты. К тому же оказалось, что минералы никеля, содержащиеся в железных метеоритах, сформировались при более низком давлении, чем то, которое должно преобладать в ядре крупной планеты [2]. Была выдвинута другая теория, по которой метеориты произошли не от одного родительского тела, а от нескольких. Предполагается, что эти тела находились в том же районе, т. е. в поясе астероидов между Марсом и Юпитером (см. [1]). По этой теории метеориты — осколки, возникающие при столкновениях астероидов. Тогда разнообразие состава и строения метеоритов должно объясняться разнообразием астероидов, возникших, видимо, в разных частях первичной газовой туманности и потому имевших разный состав. Вблизи центра туманности должны были формироваться «высокотемпературные» астероиды, давшие затем начало железным метеоритам; «низкотемпературные» астероиды, в том числе родительские тела углистых метеоритов, возникали на периферии туманности.

Я воздержусь от более подробного анализа этих теорий. Лучше давайте вспомним факты, полученные при изучении углистого комплекса. Мы видели, что в его растворимом веществе содержатся разные типы «органических» молекул, встречающиеся и в современных земных организмах. Но, насколько известно, все эти соединения могут при благоприятном стечении обстоятельств синтезироваться и неорганическим путем, в восстановительных условиях. Следовательно, мы не можем решить, являются ли данные вещества остатками жизни или это продукты преджизни. Другие анализы, главным образом определение соотношения стабильных изотопов углерода, показали, что интересующие нас вещества в любом случае имеют внеземное происхождение.

«Организованные элементы» состоят, как оказалось, частично из углерода, а частично из минералов. Они присущи самим метеоритам, а не занесены туда на Земле. Их морфология не позволяет однозначно ответить на вопрос, являются ли они продуктами преджизни или жизни, хотя большинство микробиологов, кажется, склоняется ко второму предположению. Однако сейчас считается общепринятым, что «организованные элементы» несомненно имеют внеземное происхождение. Вывод этот основан на изучении морфологии «организованных элементов», отличающейся от морфологии земных организмов.

Итак, углистый комплекс метеоритов, вероятнее всего, образовался вне Земли. В его создании участвовала какая-то форма преджизни, скорее даже ранней жизни. Конечно, у нас нет доказательств того, что на родительском теле метеоритов существовала жизнь. Но пока это предположение лучше других объясняет факты, описанные в этой главе. Кроме того, как показали многочисленные попытки, предпринятые за последние годы, это предположение трудно опровергнуть.

Если «организованные элементы» углистых метеоритов действительно представляют собой фоссилизированные формы внеземной жизни, то возникает вопрос, почему, будучи так близки к земной жизни химически, они так сильно отличаются от нее по своей морфологии. Здесь мы вновь сталкиваемся с вопросом, уже затронутым в гл. IV, разд. 9, там, где обсуждалась схема Пири. Рассматриваемые нами простые молекулы образуются в результате ограниченного числа реакций, и при сходных условиях может возникнуть и «выжить» лишь ограниченный набор соединений. Как мы уже видели, на родительском теле углистых метеоритов должна была существовать водная, низкотемпературная среда, близкая к земной. Не исключено, конечно, что более сложные вещества неэкстрагируемой части углистого вещества отличны от веществ, присущих земной жизни. Впрочем, это маловероятно [4]. Во всяком случае, более простые соединения, которые анализировали до сих пор, имеют вполне обычное строение, и это не удивительно. Но ведь с морфологией дело обстоит иначе. Даже самые простые морфологические структуры, вроде пор и шипов, показанных на фото 45, могут развиваться по-разному в разных районах, в разных параллельных рядах эволюции, у разных организмов. В данном случае нельзя выделить какие-то простые, совершенно определенные реакции, которые способствовали бы развитию той или иной подобной структуры. Оно определяется взаимодействием между мутациями, имеющимися в популяции в данное время, и давлением отбора, обусловленным средой. Количество независимых переменных, участвующих в игре, здесь настолько велико, что возможность повторения практически исключена. Следовательно, если та или иная структура появилась в одной эволюционной ли-

нии, вероятность того, что она точно повторится в другой, крайне мала.

Предположение, согласно которому в углистых метеоритах найдены свидетельства существования внеземной жизни, подрывает один из самых лелеемых предрассудков человека — представление о том, что жизнь существует только на Земле. Может быть, работа Надя и Клауса была встречена такой пристрастной критикой именно из-за этого предубеждения, прочно укоренившегося в умах. Но, мысленно выходя за тесные пределы нашей Солнечной системы, можно представить себе, что существование жизни в других уголках Вселенной не так уж невероятно. Мамикуньян писал [20]: «Велика математическая вероятность того, что во Вселенной есть неизвестные нам пока планеты с пригодными для жизни условиями. Примерно одна звезда из миллиона может иметь планету, отвечающую всем требованиям».

Шепли [37] считает, что эти требования таковы:

1) наличие жидкой воды — растворителя, необходимого для всех жизненных процессов; жизнь, такая, как мы ее себе представляем, не может существовать в неконденсированном паре или в натающем льду; поэтому основное требование состоит в том, чтобы планета, несущая на себе жизнь, находилась на подходящем расстоянии от своего солнца — в зоне, где вода может оставаться жидкой;

2) планета должна иметь подходящий период вращения, чтобы ее поверхность не успевала слишком остыть за ночь или перегреться за день;

3) эксцентриситет орбиты должен быть небольшим, чтобы разница между поступлением солнечной энергии в афелии и в перигелии была незначительной (кометы в этом отношении непригодны);

4) химический состав воздуха, океана и поверхности суши должен быть благоприятным для жизни и не содержать значительных количеств веществ, вредных для биологических процессов;

5) светимость центральной звезды не должна отклоняться от среднего значения более чем на 4—5%. Планеты, обращающиеся вокруг двойных звезд, непригодны для жизни. Конечно, центральная звезда не должна время от времени взрываться, превращаясь в Новую.

Снова процитирую Мамикуньяна: «Поскольку наша Галактика содержит  $10^{11}$  звезд, можно думать, что в Млечном Пути существует 100 000 планет, способных поддерживать жизнь высших организмов... Предположим, во всей Вселенной  $10^{22}$  звезд; тогда обитаемых планет должно быть  $10^{16}$ ». Таким образом, теория вероятностей допускает существование жизни вне Земли!

## 7. ЖИЗНЬ НА ЛУНЕ?

В свое время немало говорилось о возможности существования, сейчас или в прошлом, жизни на Луне. Но результаты анализа проб, доставленных с Луны астронавтами корабля «Аполлон-11», полностью исключают такую возможность.

Подробнее об этих работах, а также о других исследованиях, выполненных на пробах лунного грунта, можно узнать из журнала «Сайенс» („Science“, № 3918, 30 января 1970 года). В этих пробах не удалось найти никаких следов хотя бы фоссиллизированной жизни или преджизни. Пробы изучались многими высококвалифицированными специалистами в области органической геохимии, причем использовались различные чрезвычайно тонкие методы анализа. Эти методы позволяют выявить предбиологические соединения (например, пурины, пиримидины, аминокислоты или порфирины), присутствующие в количестве менее 10 ч. на млрд. Несмотря на столь высокую чувствительность методов, обнаружить эти вещества в лунном грунте не удалось. Заметим, что в пробах грунта были обнаружены вещества выхлопных газов из тормозных двигателей лунной кабины, но никаких веществ естественного происхождения найти не удалось.

Следовательно, на Луне никогда не было ни преджизни, ни жизни. Очевидно, это связано с полным отсутствием на Луне воды.

### Список литературы

1. Anders E., On the origin of carbonaceous chondrites, Ann. N. Y. Acad. Sci., 108, 514—533 (1963).
2. Anders E., Origin, age and composition of meteorites, Space Sci. Rev., 3, 583—714 (1964).
3. Berzelius J. J., Ueber Meteorstein, Ann. Phys. Chem., 33, 113—148 (1834).
4. Bitz M. C., Nagy B., Ozonolysis of „polymer-type” material in coal, kerogen and in the Orgueil meteorite. A preliminary report. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S., 56, 1383—1390 (1966).
5. Boström K., Fredriksson K., Surface conditions of the Orgueil meteorite parent body as indicated by mineral associations, Smithsonian Inst. Miscell. Collections, 151, 1—39 (1966).
6. Briggs M. H., Mamikunian G., Organic constituents of the carbonaceous chondrites, Space Sci. Rev., 1, 647—682 (1963).
7. Claus G., Nagy B., A microbiological examination of some carbonaceous chondrites, Nature, 192, 594—596 (1961).
8. Claus G., Suba-C, E. A., Interpretation of micro-structures in carbonaceous meteorites, Nature, 205, 1201 (1965).
9. Claus G., Nagy B., Europa D. L., Further observations on the properties of the “organized elements” in carbonaceous chondrites, Ann. N. Y. Acad. Sci., 108, 580—605 (1963).
10. Clayton R. N., Carbon isotope abundance in meteorite carbonates, Science, 140, 192—193 (1963).
11. Daly R. A., Meteorites and the earth-model, Bull. Geol. Soc. Am., 54, 401—456 (1943).

12. *Duchesne J., Depideux J., Litt C.*, Sur la nature des radicaux libres de la météorite Cold Bokkeveld, *Compt. Rend.*, **259**, 1891 (1964).
13. *Fitch F. W., Anders E.*, Observations on the nature of the "organized elements" in carbonaceous chondrites, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **108**, 495—513 (1963).
14. *Han J., Simoneit B. R., Burlingame B. L., Calvin M.*, Organic analysis of the Pueblito de Allende meteorite, *Nature*, **222**, 364—365 (1969).
15. *Hayatsu R., Studier M., Oda A., Fuse K., Anders E.*, Origin of organic matter in early solar system. II. Nitrogen compounds, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 175—190 (1968).
16. *Hayes J. M., Biemann K.*, High resolution mass spectrometric investigations of the organic constituents of the Murray and Holbrook chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 239—268 (1968).
17. *Henderson W., Eglinton G., Simmonds P., Lovelock J. E.*, Thermal alteration as a contributory process to the genesis of petroleum, *Nature*, **219**, 1012—1016 (1968).
18. *Kaplan I. R., Degens E. T., Reuter J. H.*, Organic compounds in stony meteorites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **27**, 805—834 (1963).
19. *Mamikunian G., Briggs M. H.*, A catalog of microstructures observed in carbonaceous chondrites, *Jet. Prop. Lab., Pasadena, NASA Tech. Rept.* 32-398, 75 pp., 1963.
20. *Mamikunian G., Briggs M. H.* (Editors), *Current Aspects of Exobiology*, Pergamon, London, 420 pp., 1966.
21. *Mason B.*, *Meteorites*, Wiley, New York, N. Y., 247 pp., 1962.
22. *Mason B.*, The carbonaceous chondrites, *Space Sci. Rev.*, **1**, 621—646 (1963).
23. *Mason B.*, *Meteorites*, *Am Sci.*, **55**, 429—455 (1967).
24. *Meinschein W. G., Nagy B., Hennessy D. J.*, Evidence in meteorites of former life: The organic compounds in carbonaceous chondrites are similar to those found in marine sediments, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **108**, 553—579 (1963).
25. *Meinschein W. G., Frondel C., Laura P., Mislaw K.*, Meteorites: Optical activity in organic matter, *Science*, **154**, 377—380 (1966).
26. *Meinschein W. G., Sternberg Y. A., Klusman R. W.*, Origins of natural gas and petroleum, *Nature*, **220**, 1185—1189 (1968).
27. *Mueller G.*, Interpretation of microstructures in carbonaceous meteorites, *Nature*, **205**, 1200—1201 (1965).
28. *Nagy B.*, Investigations of the Orgueil carbonaceous meteorite, *Geol. Fören., Stockholm, Förhandl.*, **88**, 235—272 (1966).
29. *Nagy B.*, The possibility of extraterrestrial life: ultramicroscopic analyses and electronmicroscopic studies of microstructures in carbonaceous meteorites, *Rev. Paleobotan. Palynol.*, **3**, 237—242 (1967).
30. *Nagy B.*, Carbonaceous meteorites, *Endeavour*, **27**, 81—86 (1968).
31. *Nagy B., Meinschein W. G., Hennessy D. J.*, Mass spectrometric analysis of the Orgueil meteorite. Evidence for biogenic hydrocarbons. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **93**, 25—35 (1961).
32. *Nagy B., Meinschein W. G., Hennessy D. J.*, Aqueous, low temperature environment of the Orgueil meteorite parent body, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **108**, 534—552 (1963).
33. *Nagy B., Fredriksson K., Urey H. C., Claus G., Andersen C. A., Percy J.*, Electron probe microanalysis of organized elements in the Orgueil meteorite, *Nature*, **198**, 121—125 (1963).
34. *Nagy B., Murphy M. T., Modzeleski V. E., Rauser G., Claus G., Hennessy D. J., Colombo U., Gazzarrini F.*, Optical activity in saponified organic matter isolated from the interior of the Orgueil meteorite, *Nature*, **202**, 228—233 (1964).
35. *Oró J., Nooner D. W., Zlatkis A.*, Paraffinic hydrocarbons in the Orgueil,

- Murray, Mokoia and other meteorites. *Life Science, Space Science, Res. Spartan Books, Washington*, **4**, 63—100 (1966).
36. *Papp A.*, The identity of „organized elements”, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **108**, 613 (1963).
37. *Shapley H.*, On climate and life. In: H. Shapley (Editor), *Climatic Change*, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., pp. 1—12, 1953.
38. *Staplin F. L.*, Microfossils from the Orgueil meteorite, *Micropaleontology*, **8**, 343—347 (1962).
39. *Staplin F. L.*, Organic remains in meteorites. In: G. Mamikunian and M. H. Briggs (Editors), *Current Aspects of Exobiology*, Pergamon, London, pp. 77—92, 1964.
40. *Studier M., Hayatsu E., Anders E.*, Origin of organic matter in early solar system. I. Hydrocarbons, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 151—174 (1968).
41. *Timofejev B. W.*, Lebensspuren in Meteoriten. Resultate einer microphytologischen Analyse, *Grana Palynologica*, **4**, 92—99 (1963).
42. *Urey H. C.*, Meteorites and the moon, *Science*, **147**, 1262—1265 (1965).
43. *Urey H. C.*, Biological material in meteorites. A review, *Science*, **151**, 157—166 (1966).
44. *Urey H. C., Meinschein W. G., Nagy B.*, Comments on meteoritic hydrocarbons, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 665 (1968).
45. *Wiik H. B.*, The chemical composition of some stony meteorites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **9**, 279—289 (1956).

## Глава XVIII

## ВЫВОДЫ

1. ЧТО МЫ ЗНАЕМ (ИЛИ ДУМАЕМ, ЧТО ЗНАЕМ)  
О ПРОИСХОЖДЕНИИ ЖИЗНИ

Пора, наконец, подвести итог всему сказанному в этой книге, разобраться в результатах исследования возможности естественно-го возникновения жизни. В этой итоговой главе мы проведем различие между несомненными фактами и теми процессами и событиями, которые, по нашим представлениям, вполне могли иметь место. В нашем исследовании мы руководствовались принципом униформизма, который, как мы видели в гл. II, позволяет восстанавливать геологическую историю, сопоставляя данные о древних горных породах с тем, что известно об идущих в наше время геологических процессах.

Из гл. III мы узнали, как можно измерить возраст некоторых горных пород. Возраст древнейших горных пород коры, достоверно определенный современными методами, составляет 3,3—3,4 млрд. лет; может быть, эту цифру следует увеличить на несколько десятых. Назывались и более значительные цифры, но они были получены не прямыми методами, а с использованием так называемых изохрон и нуждаются еще в подтверждении. Тем же способом возраст древнейших пород мантии, лежащих под корой, оценен в 4,5 млрд. лет, а возраст Земли может составлять 4,5—4,75 млрд. лет. Хотя эти цифры, возможно, нуждаются в уточнении (а уточнение возраста обычно оборачивается его увеличением), они уже сейчас указывают нам те пределы, в которых уместается история жизни на Земле.

Из гл. IV мы узнали, что, согласно современным биологическим воззрениям, ранняя жизнь могла возникнуть естественным путем только после того, как в неорганических процессах были синтезированы «органические» вещества. Сейчас такие синтезы практически невозможны, так как на Землю больше не поступает мощный поток необходимой для них энергии. Более того, даже если бы в результате удачного стечения обстоятельств случайно образовалось «органическое» вещество, оно бы немедленно окислилось и неизбежно разрушилось.

Но это верно только для нашей современной, богатой кислородом среды. Если Земля когда-то обладала бескислородной атмосферой, то неорганические реакции с выходом «органических» веществ могли быть в порядке вещей. Необходимую энергию мог достав-

лять дальний солнечный ультрафиолет, который свободно проходил через бескислородную атмосферу и падал на поверхность нашей планеты. Хотя в действительности даже «бескислородная» атмосфера не была совершенно лишена кислорода, разрушительное действие окисления было тогда настолько незначительным, что им можно пренебречь. Значит, проблема естественного самопроизвольного возникновения жизни упирается в вопрос о возможности существования бескислородной атмосферы и об условиях, господствовавших в те времена на Земле.

Данные астрономии, кратко изложенные в гл. V, показывают, что и межзвездное вещество, и первичные атмосферы планет благодаря обилию в космосе свободного водорода имеют восстановительный характер. И хотя земная атмосфера в течение всей геологической истории была вторичной (первичной в строгом смысле слова можно назвать только атмосферу, возникшую непосредственно из межзвездного или солнечного вещества), к этой атмосфере, образовавшейся в результате обезгаживания недр Земли, на первом этапе ее развития также применимо общее правило. Следовательно, «первичная» атмосфера, окружавшая Землю в первые периоды геологической истории, была восстановительной. Сейчас Земля резко отличается от известных нам планет своей кислородной атмосферой. Очевидно, этот кислород является биогенным — он создан растениями в процессе органического фотосинтеза.

В гл. XIII мы рассмотрели геологические доказательства того, что в ранние периоды своей истории Земля обладала атмосферой с очень малым содержанием кислорода. Об этом свидетельствуют некоторые древние осадочные породы, особенно пириты золототурановых «рифов» и полосчатые железорудные формации типа формации Верхнего озера. Возраст этих отложений указывает на то, что бескислородная первичная атмосфера существовала до конца среднего докембрия, 1800 млн. лет назад. Окисленные осадочные породы типа красноцветных толщ, появившиеся 1450 млн. лет назад, уже свидетельствуют о появлении кислорода в атмосфере. Значит, переход от первичной бескислородной к современной кислородной атмосфере произошел где-то между этими двумя датами. Но и после этого перехода содержание кислорода в атмосфере оставалось низким, значительно ниже, чем сейчас, достигнув к началу силура (около 440 млн. лет назад) всего 0,1 современного уровня.

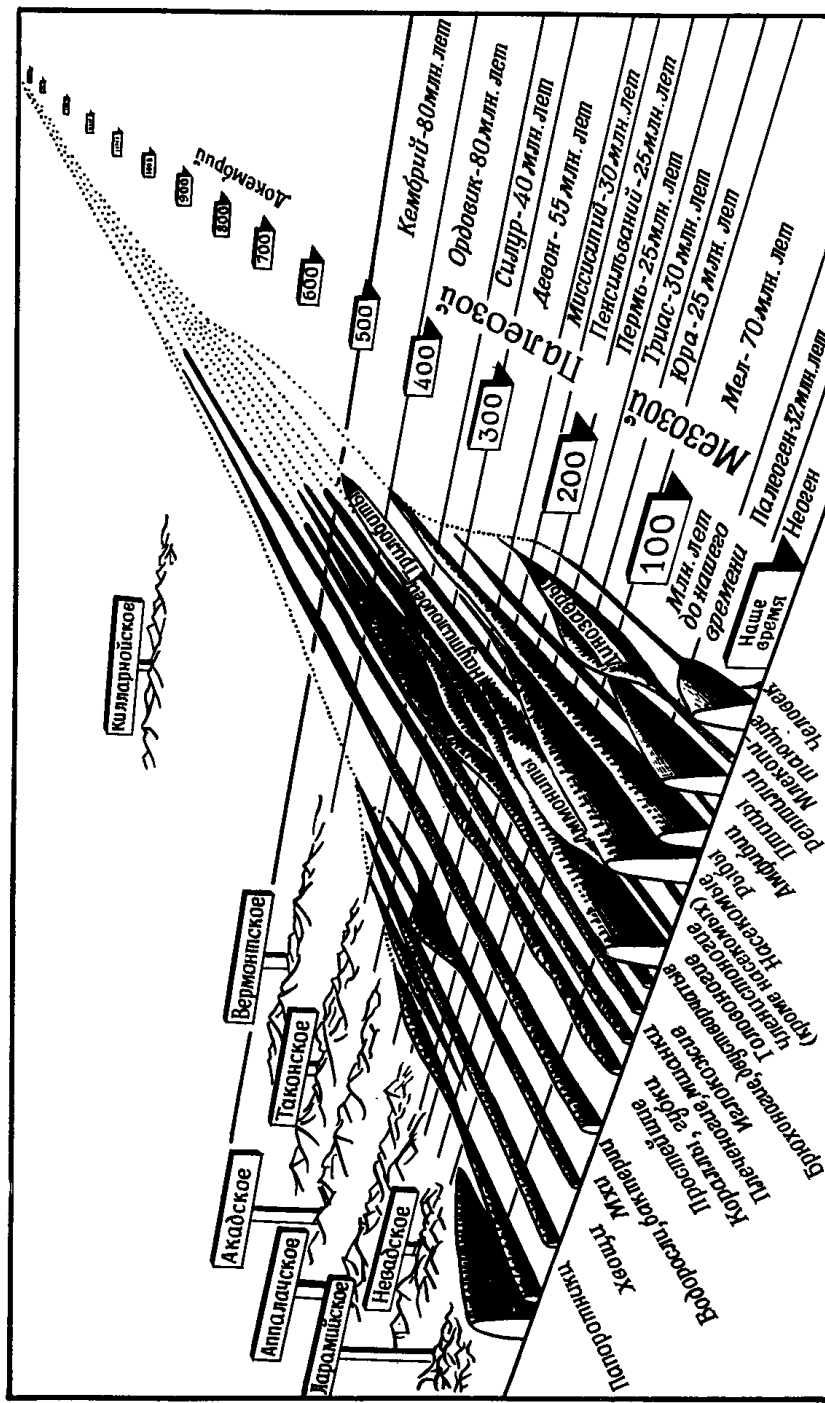
Все эти соображения привели к постановке многочисленных и очень разнообразных экспериментов. В них под воздействием различных видов энергии в условиях, моделирующих первичную атмосферу и первобытный океан, происходил неорганический синтез многих «органических» соединений. Как показано в гл. VI, в этих условиях легко образуются не только малые «органические» молекулы, но даже такие сложные соединения, как нуклеотиды и про-

геиноиды, из чего можно сделать вывод, что подобные процессы синтеза были весьма распространены на первобытной Земле.

Следующий этап развития — переход от возникшей неорганическим путем преджизни к жизни — нам до сих пор мало понятен. Этот процесс гораздо труднее воспроизвести в эксперименте, чем синтез «органических» соединений. Предлагались различные теоретически возможные варианты перехода от преджизни к жизни, но пока повторить этот переход в лабораторных условиях не удалось. Следует отметить одно важное обстоятельство: ранняя жизнь обладала далеко не таким сложным метаболизмом, как современная. Появление даже самого простого механизма, ускоряющего реакции, могло дать формам ранней жизни решающие преимущества перед преджизнью — по пословице «в стране слепых и кривой — король».

Обращаясь к вопросу о том, где надо искать остатки ранней жизни, мы вновь становимся на твердую почву фактов. Возникновение жизни настолько далеко отодвинуто в геологическое прошлое, что в этих поисках нас могут интересовать только области докембрийских древних щитов. И даже в пределах древних щитов мы должны выбирать районы, в которых сравнительно неизменными сохранились осадочные горные породы, сформировавшиеся в самом начале геологической истории. Древнейшие из известных нам «кратонных» областей находятся в Южной Африке. Осадочные породы формаций Онвервахт и Фиг-Три системы Свазиленд, возраст которых составляет, видимо, более 3,2 млрд. лет, представляют собой древнейшие неметаморфизованные отложения, известные сейчас. Вряд ли в других древних щитах удастся найти еще более древние осадочные породы.

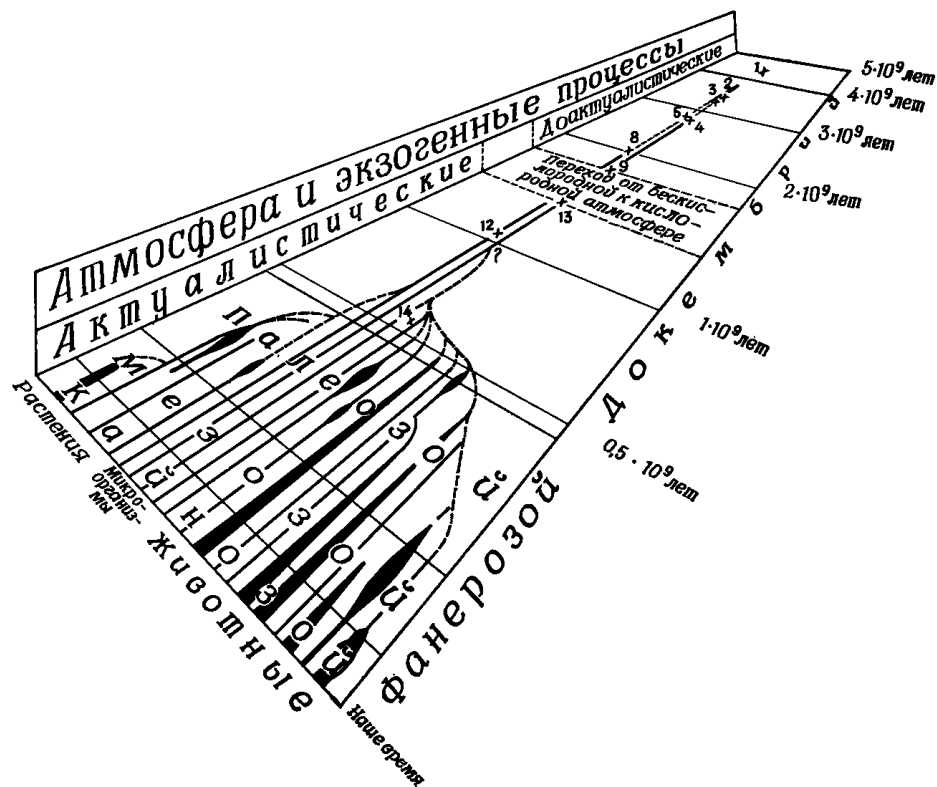
Древнейшие свидетельства жизни, обнаруженные в этих осадочных породах, можно разделить на две группы: 1) биогенные отложения — макроскопические (водорослевые известняки) и молекулярные (так называемые молекулярные ископаемые) — и 2) настоящие окаменелости. Биогенную природу углисто вещества и «организованных элементов» (глобулярных структур из этого вещества), найденных в отложениях Онвервахт и Фиг-Три, пока нельзя считать доказанной. Хотя не исключено, что эти соединения и структуры имеют органическое происхождение и что дальнейшие исследования принесут доказательства этого, мы пока не можем отбросить предположение о неорганической природе углисто вещества и «организованных элементов». Древнейшим отложениям, биогенная природа которых несомненна, — водорослевым известнякам Южной Родезии и молекулярным ископаемым из железорудной формации Соуден (Канадский щит) — более 2,7 млрд. лет. И если даже дальнейшее изучение пластов Трансвааля покажет, что данные осадочные породы тоже имеют биогенную природу, то это мало изменит общую картину. Ведь все эти формации отно-



Фиг. 103. Схема эволюции жизни в фанерозое [5].

Этот период эволюции сравнительно хорошо документирован по ископаемым остаткам (он включает палеозой, мезозой и кайнозой).

сятся к самому раннему периоду геологической истории — к раннему докембрию, так что увеличение «зарегистрированного возраста жизни на Земле» не заставит нас пересмотреть наши современные представления.



Фиг. 104. Схема истории жизни в целом.

Теперь ясно, что ранняя жизнь существовала гораздо дольше, чем более высокоорганизованная жизнь, которая развивалась всего лишь в течение последнего миллиарда лет истории Земли. Цифры на схеме расшифрованы на фиг. 49. Возникновение млекопитающих, о котором мало что известно, отмечено знаком вопроса.

Но есть и другие факты, заставляющие думать, что жизнь, и притом жизнь, способная к фотосинтезу, появилась гораздо ранее, чем 2,7 млрд. лет назад (минимальный возраст серии Доломит из Южной Родезии и железорудной формации Соуден Канадского щита). Полосчатые железорудные формации, которые, как мы узнали из гл. XIII, возникали, по-видимому, в условиях атмосферы, содержавшей примерно в сто раз меньше кислорода, чем современная, начали появляться более 3 млрд. лет назад. Поскольку за счет неорганической фотодиссоциации воды уровень содержания кислорода в атмосфере может достигнуть всего 0,001 современного (гл. XV), для превышения этого порога требовалось уже появле-

ние органического фотосинтеза. Значит, к периоду образования древнейших полосчатых железорудных формаций на Земле уже должен был существовать органический фотосинтез, фотосинтезирующая жизнь.

Древнейшие из известных сейчас истинных окаменелостей — очень разнообразная микроскопическая флора из формации Ган-флинт, Онтарио. Ее возраст должен весьма приблизительно составлять около 2 млрд. лет. Начиная с этого времени в различных древних щитах мы уже находим фрагментарные, но довольно многочисленные остатки древних флор; животные же появились, по-видимому, только в конце позднего докембрия. В начале кембрия некоторые группы животных приобрели способность выделять твердые раковины — возможно, появление этой способности связано с временным снижением содержания двуокси углерода в воздухе (гл. XVI). Только благодаря этим твердым, хорошо фоссилизирующимся раковинам мы находим теперь множество остатков ранней жизни, относящихся к кембрию и более поздним периодам. Именно с появлением раковин обычно связывают начало фанерозоя. Наземная флора высших, сосудистых растений появилась только в начале силура.

Фанерозой, сравнительно богатый окаменелостями, обычно рассматривают в учебниках как «нормальный», хорошо документированный период геологической истории. Я хотел бы подчеркнуть, что фанерозой — лишь сравнительно краткий период дальнейшей эволюции жизни (фиг. 103); события же, связанные с возникновением жизни, заняли гораздо более длительный отрезок геологической истории (фиг. 104).

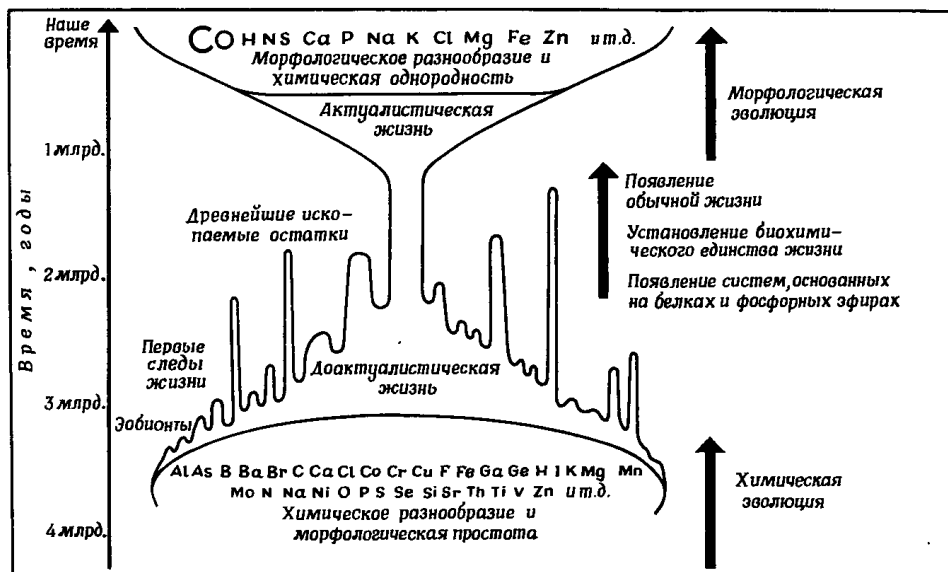
## 2. СОСУЩЕСТВОВАНИЕ ПРЕЖИЗНИ И РАННЕЙ ЖИЗНИ

Лишь недавно мы смогли в полной мере оценить одну из важнейших особенностей перехода от преджизни к ранней жизни — то, что жизнь (как свидетельствуют ископаемые остатки) долгое время существовала в условиях первичной бескислородной атмосферы (о составе атмосферы говорят определенные типы осадочных рудных месторождений). Об этом было сказано в гл. XIII. Мы знаем, что в условиях бескислородной атмосферы возможен неорганический синтез «органических» веществ преджизни. Отсюда следует, что преджизнь и ранняя жизнь долгое время существовали бок о бок.

В литературе нередко встречаешь простую схему развития жизни из преджизни. В принципе она сводится к следующему. Сначала шло неорганическое формирование «органических» соединений преджизни. Затем развилась жизнь. Будучи гетеротрофными, формы ранней жизни питались накопившимся «органическим» веществом. Когда же оно истощилось, живым существам пришлось



выработать автотрофный тип питания — органический фотосинтез, чтобы употреблять для поддержания жизни неорганические, минеральные вещества. Такой предполагаемый ход событий отражен, например, в знаменитой схеме Пири (фиг. 15). Но для такого сложного процесса, каким является возникновение жизни, эта схема, конечно, слишком проста. Основываясь на наших знаниях о дальнейшей эволюции жизни, я уже ранее предположил [8], что



Фиг. 105. Схема возникновения и дальнейшей эволюции жизни [8]. Видоизмененная схема Пири.

переход от преджизни к жизни скорее всего был более сложным и многоступенчатым (фиг. 105). По-моему, преджизнь, как и жизнь, знали несколько более или менее параллельных линий развития, из которых лишь некоторые (или только одна) дали начало ранней жизни.

Еще недавно этот тезис был всего лишь предположением. Но сейчас, глубже изучив свойства осадочных руд [9] и ближе познакомившись с процессами поглощения солнечного ультрафиолета в атмосферах разного состава [1, 2], мы получили гораздо более прочную основу для понимания взаимоотношений между преджизнью и жизнью в период их сосуществования. Как отмечено в гл. XIII, мы знаем, что осадочные руды, формировавшиеся в атмосфере «с очень невысоким содержанием кислорода», отлагались в течение всего раннего и среднего докембрия, примерно до времени, отдаленного от нас на 1,8 млрд. лет. Далее, из гл. XV мы узнали, что механизм, основанный на эффекте Пастера, удерживал содержание свободного кислорода в бескислородной атмосфере на уровне,

составлявшем примерно 1% современного. Наконец, мы знаем, что при таком содержании кислорода дальний солнечный ультрафиолет, вызывающий синтез «органического» вещества преджизни, еще достигает поверхности Земли.

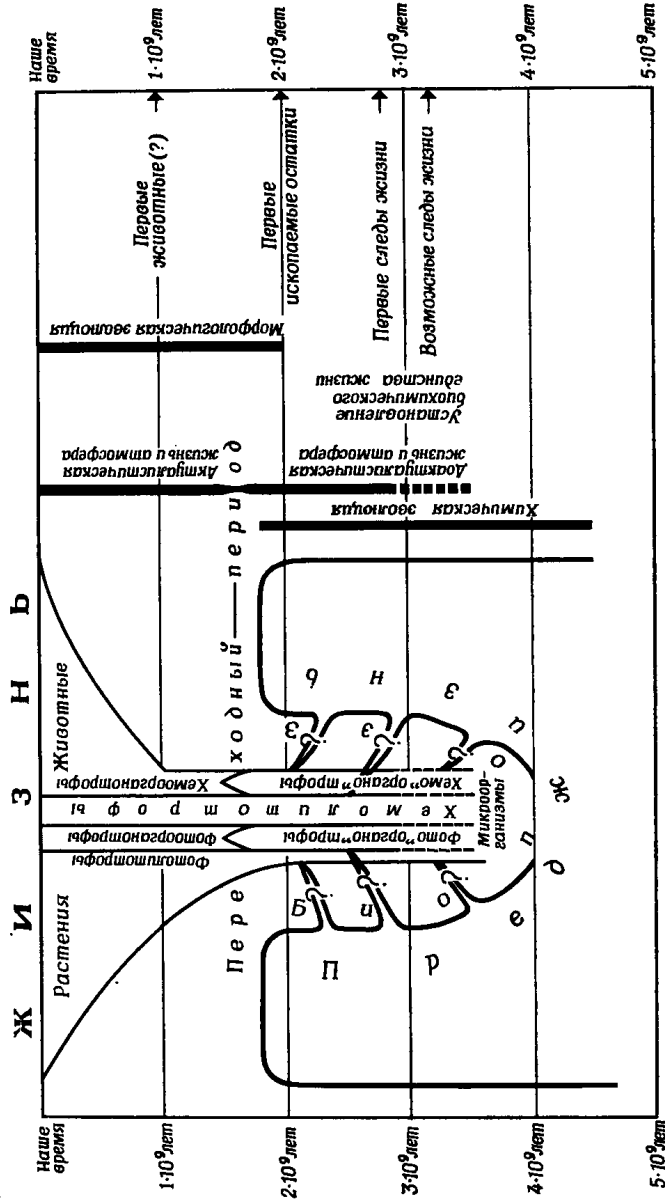
Значит, пока продолжала существовать первичная бескислородная атмосфера, продолжался и неорганический синтез соединений преджизни. Жизнь, как свидетельствуют ископаемые остатки, тоже существовала в этот период, но она не могла еще выйти на поверхность Земли и скрывалась в почве или под водой. Следовательно, хотя преджизнь и жизнь тогда сосуществовали, они занимали разные местообитания. «Органические» вещества не исчезли с поверхности Земли и тогда, когда появились уже автотрофные организмы, ведущие органический фотосинтез. Не вымерли тогда и примитивные гетеротрофные организмы. Вероятнее всего, хемо- и фото«органо»трофы продолжали существовать все это время, питаясь соединениями преджизни, попадавшими в местообитания ранней жизни.

Видимо, биопоз (развитие жизни из преджизни) продолжался непрерывно или с перерывами в течение всего периода сосуществования преджизни и ранней жизни. Возможная схема этого процесса показана на фиг. 106. В то время шла борьба за существование не только между разными формами преджизни (фиг. 105), но и между формами жизни, образовавшимися из преджизни раньше и позже. И точно так же, как в дальнейшей эволюции жизни были случаи полного вымирания отдельных групп растений и животных, так и некоторые эволюционные линии ранней жизни, отделившиеся от преджизни раньше других, могли затем уступить место более молодым.

Период совместного существования преджизни и ранней жизни продолжался с того времени, как впервые возникла жизнь (где-то между 3 и 4 млрд. лет назад), до образования кислородной атмосферы (примерно 1,8 млрд. лет назад, точка *d* на фиг. 99), т. е. около 2 млрд. лет назад. Если читатель скажет, что схема, представленная на фиг. 106, полностью гипотетична, я не стану спорить. Но вспомним, что в фанерозое, продолжавшемся чуть больше полумиллиарда лет, одна за другой достигали расцвета многие группы организмов, которые всего через несколько десятков или сотен миллионов лет полностью исчезли. Можно думать, что и в развитии ранней жизни происходило то же самое.

### 3. ЧТО МЫ НАДЕЕМСЯ УЗНАТЬ

За последние десять лет наше понимание происхождения жизни сделало огромные успехи. Следующее десятилетие принесет нам еще больше: новые исследования очень активно ведутся во многих областях. Разумеется, некоторые результаты этих работ будут пол-



Фиг. 106. Схема развития жизни из преджизни [10].

Биопоз (образование жизни из преджизни) первые должен был происходить уже гораздо более 3 млрд. лет назад. Но неорганический синтез «органических» молекул т. е. образование преджизни, продолжался одновременно с развитием жизни еще до конца среднего докембрия (около 1,8 млрд. лет назад). Вполне возможно и даже вполне вероятно, что биопоз происходил все это время или с перерывами. Если такой переход в более поздний период случайно совершался в необычной среде, то новая жизнь могла сильно отличаться от уже существовавшей. Возможно, именно так появились эукариотические организмы (гл. VIII, разд. 8), хотя пока это предположение не основано на фактах. Видимо, уровень Пастера был превышен потому, что в результате более продуктивного метаболизма эукариотов сильно увеличилась продукция кислорода. Тогда пришел конец господству бескислородной атмосферы. Наша оценка продолжительности периода перехода от бескислородной к кислородной атмосфере совпала, как только содержание О<sub>2</sub> в атмосфере превысило 1% современного (точка d на фиг. 99), то переходного периода не было совсем. Если считать переходным периодом тот промежуток времени, в течение которого содержание О<sub>2</sub> выросло от 1 до 10% современного уровня, то этот период закончился только в начале сикгура, 0,44 млрд. лет назад. Я принял здесь промежуточную точку зрения: по моему мнению, образование краснокровных толщ говорит о наличии кислородной атмосферы. Тогда переходный период заканчивается с образованием, несомненно, Дала (гл. XIII, разделы 16 и 17), т. е. 1,4 млрд. лет назад.

ной неожиданностью, но все-таки попытаемся представить себе, на каких направлениях можно ожидать новых успехов.

Во-первых, наверняка будут усовершенствованы методы определения абсолютного возраста и возраст древнейших пород будет уточнен. Мы глубже пойдем отношение между осадочными формациями докембрия, наиболее важными для проблемы, и надежно датированными изверженными породами, а значит, точнее будем знать возраст этих осадочных формаций. Может быть, удастся разработать более удовлетворительные методы прямого датирования осадочных горных пород. Можно надеяться, что будет уточнен возраст древнейших пород мантии, возраст самой Земли и состав «новорожденной» Земли — ведь именно от него зависел ход обезгаживания и формирования примитивной вторичной атмосферы. Сейчас в этом направлении делаются лишь первые, весьма несовершенные попытки [7].

Несомненно, много новых данных будет получено и в экспериментах по моделированию синтезов преджизни. В этой области работает множество химиков-органиков. Основы химии «органических» молекул уже довольно хорошо изучены, и теперь внимание исследователей все более будут привлекать реакции между этими молекулами, их полимеризация и, наконец, развитие самой жизни. Есть основания полагать, что мы получим новые данные об устойчивости соединений преджизни, то есть о времени их распада.

Можно ожидать прогресса и в изучении молекулярных ископаемых. Здесь открываются две области для изысканий: это исследование других органических соединений, помимо уже знакомых нам алканов, например липидов и пигментов; другая возможность — исследование того, какие соединения (или какие комбинации соединений), входящие в состав молекулярных ископаемых, должны считаться биогенными, а какие могут быть созданы и неорганическим путем и должны относиться к преджизни. Употребляя модное сейчас слово, можно назвать эту область работы исследованием «биогенности». Главной точкой приложения усилий в изучении молекулярных ископаемых является анализ керогена, начатый только недавно (см., например, [3]).

Следовательно, можно ожидать, что мы научимся лучше различать биогенные и абиогенные вещества, а то и найдем ступени перехода между ними. Не так давно считалось, что все соединения углерода, находясь в осадочных породах, являются биогенными. Но с тех пор мы узнали, что возможен абиогенный синтез «органического» вещества; а с другой стороны, биогенные вещества обнаруживаются во все более и более древних отложениях. В результате «геологическая» граница между неживым и живым расплывается, превращается из линии в довольно неопределенную зону, как это уже случилось с «биологической» границей.

Если не каждое соединение углерода из древних осадочных пород обязательно имеет биогенную природу, то необходимо найти какие-то критерии биогенности веществ. Например, если аминокислоты могли синтезироваться неорганическим путем в условиях бескислородной атмосферы, то, может быть, белки или нуклеиновые кислоты можно считать несомненными остатками ранней жизни? Как мы видели, ни один из подобных критериев, взятый в отдельности, не кажется удовлетворительным. Стала сомнительной ценность даже таких почитаемых критериев, как отношение стабильных изотопов углерода или оптическая активность.

По моему убеждению, для того чтобы решить, является ли какое-то соединение углерода, найденное в древних отложениях, молекулярным ископаемым, то есть остатком ранней жизни, или это всего лишь остаток преджизни, мы должны искать не какой-то один решающий критерий, а рассматривать целую группу ключевых признаков.

В качестве подтверждения рассмотрим историю изучения изопреноидных алканов. Сначала, как мы знаем из гл. XII, разд. 9 и 10, разная встречаемость молекул разной длины с числом атомов углерода, близким к 17, была принята как доказательство того, что эти алканы представляют собой продукты распада хлорофилла. Потом оказалось, что такие соединения образуются и при некоторых промышленных синтезах. Правда, условия таких синтезов резко отличаются от условий, создаваемых в модельных экспериментах с первичной атмосферой, и не меньше отличаются от обычных условий формирования осадков, но все же этот факт поколебал уверенность специалистов. Теперь, в своей новой книге, проф. Кальвин [4] подчеркивает неоднородность спектров алканов из органического материала древних осадочных образований. Эта неоднородность еще не может служить прямым доказательством биологической природы данных соединений, но дает по крайней мере веское доказательство в пользу этого. Непрерывный спектр соединений углерода, близкий к кривой гауссова распределения, напротив, свидетельствовал бы об их абиогенном происхождении. Возможно, такие соображения, высказывавшиеся в других формах и ранее, позволят наконец провести грань между неживым и живым в геологии.

Конечно, всегда надо помнить, что за свою длительную историю древние осадочные образования могли претерпеть изменения. При распаде исходного вещества — будь оно органическим или «органическим» — вполне могли идти процессы разделения и гетерогенизации, маскирующие его первоначальный состав.

Что касается настоящих ископаемых остатков, то и в этой области можно ожидать появления новых интересных данных. Впервые, есть надежда (хотя и небольшая), что в одном или нескольких древних штатах найдутся очень древние метаморфиз-

ированные осадочные породы, более древние, чем все известные сейчас. Во-вторых, не исключено, что в уже известных формациях будут найдены остатки, сохранившиеся лучше, чем образцы, описанные в гл. XII. Ведь ископаемые остатки раннего и среднего докембрия впервые найдены всего несколько лет назад, а из истории поисков окаменелостей фанерозоя мы знаем, что даже в районах, исследовавшихся на протяжении веков, всегда есть шансы найти новые богатые скопления ископаемых. Науке предстоит еще ответить на ряд важных вопросов. Пока неясно, можно ли считать биогенными примитивные «организованные элементы» вроде тех, что найдены в формациях Онвервахт и Фиг-Три в Южной Африке (гл. XII, разд. 17), или это продукты преджизни. Если окажется верным первое предположение, то документированная по ископаемым остаткам дата появления жизни на Земле отодвинется в прошлое примерно на полмиллиарда лет. Но такие «рекорды» интересуют нас меньше, чем сведения о свойствах и строении ранних форм жизни. Так, для нас важно, когда впервые появились эукариотические организмы (гл. VIII, разд. 8 и гл. XIV, разд. 10), — ведь их появление ознаменовало собой совершенно новый этап в развитии ранней жизни. Конечно, очень важный этап эволюции — появление первых животных, и знать его срок нам также крайне важно.

Для понимания природы молекулярных ископаемых и «организованных элементов» много может дать дальнейшее изучение углистых метеоритов. Оно, как показали последние годы, оказывает большое влияние на исследования подобного рода, ведущиеся на земном материале. Так, статья Надя и сотр. [6] о «биогенном веществе» метеорита Orgueil вызвала поток работ о земных молекулярных ископаемых.

Наконец, есть еще две отрасли знания, не связанные непосредственно с биологией, но способные дать новые сведения для понимания происхождения жизни. Это геохимия древних осадочных образований и физика и химия атмосферы. Есть надежда, что мы лучше поймем связь между древними осадками и составом атмосферы, в которой эти отложения формировались, а главное — сможем выразить эту связь количественно. От физики атмосферы можно ожидать новых данных, получаемых при космических исследованиях. Они позволят углубить выводы Беркнера и Маршалла, которые мы обсуждали в гл. XV. Кстати, нам очень пригодились бы новые, более подробные сведения о механизме эффекта Пастера (гл. XV, разд. 7) и о том, на каком уровне он начинает действовать.

Несомненно, среди открытий ближайших лет будут и такие, которые невозможно предсказать сейчас. Ведь в исследование проблемы происхождения жизни вносят свой вклад самые разные дисциплины. Но даже оставляя в стороне «сюрпризы», можно с уверенностью сказать, что в последующее десятилетие изучение про-

блемы происхождения жизни интенсифицируется и оно принесет много новых результатов. Лично я убежден, что значительная часть материала этой книги устареет очень скоро.

#### 4. ЧТО, ПО-ВИДИМОМУ, ТАК И ОСТАНЕТСЯ НЕИЗВЕСТНЫМ

Может быть, это излишне, но в заключительной главе я хотел бы еще раз подчеркнуть, что, несмотря на открывающиеся перспективы, наше представление об истории происхождения жизни всегда будет лишь схематичным и неполным. Это неизбежное следствие неполноты геологической летописи, неполноты, которая, как и в истории человечества, усугубляется по мере удаления от наших дней в прошлое. Чем дальше мы углубляемся в геологическую историю, тем меньше встречаем сохранившихся неизменными осадочных пород. С другой стороны, чем ближе мы подходим к истокам жизни, тем примитивнее становятся формы ранней жизни, тем труднее их распознать и тем меньше они могут нам рассказать о себе и об окружающей среде.

Что касается осадочных пород, то вряд ли мы сможем найти достаточно хорошо сохранившиеся отложения древнее южноафриканской системы Трансвааль (более 3,2 млрд. лет). А это означает, что геологическая летопись не сохранила никаких свидетельств самого раннего периода развития жизни — ведь жизнь возникла гораздо раньше. Что же до трудностей обнаружения остатков ранней жизни, мы уже говорили, как сложно отличить неорганически синтезированные глобулы «органического» вещества от фоссиллизованных остатков примитивных форм ранней жизни, по-видимому представляющих собой сходные глобулы. Термин «организованные элементы» был придуман специально для того, чтобы избежать обязывающей оценки форм, обладающих морфологией, переходной между преджизнью и ранней жизнью.

Неизбежная неполнота геологической летописи выражается и в том, что если даже фоссиллизация и сохранила внешнее строение форм жизни, то никаких сведений о метаболизме, свойственном некогда этим организмам, она сохранить не могла. С этой трудностью мы сталкиваемся даже при изучении жизни в фанерозое, но с докембрием все обстоит особенно сложно. Дело не только в том, что вообще сведений о жизни докембрия гораздо меньше, но и в том, что микробный метаболизм гораздо разнообразнее, чем это свойственно высшим организмам — растениям и животным (см. гл. VIII, разд. 4).

#### 5. ОПТИМИСТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

Не будем, однако, страшиться ограниченности наших возможностей в области исследования почти любой проблемы, связанной

с историей Земли. Изучение развития жизни в фанерозое тоже затруднено из-за недостатка данных, и все же надо признать, что об эволюции за последние полмиллиарда лет мы сумели узнать немало.

Сравнивая первые гипотезы, выдвинутые всего несколько десятилетий назад Опариним, Холдейном и Берналом — первопроходцами в этой области исследований, — с положением, достигнутым, скажем, к 1952 году, когда я издал свою первую книгу с обзором проблемы, а затем сравнивая тогдашнее состояние вопроса с современным, мы видим, как из набора довольно слабо обоснованных фактами гипотез выросла современная теория, как неизмеримо увеличились наши знания. Мы добыли за это время массу новых данных. Мы знаем теперь слабые места исходных гипотетических построений. На многих примерах мы поняли, какие из этих построений надо отбросить, какие заслуживают сохранения. В результате отпали многие неясности, мы смогли точнее представить себе, как возникла жизнь.

Итак, даже сейчас, не ожидая новых открытий, которые, несомненно, появятся в будущем, мы с высокой степенью вероятности можем утверждать, что жизнь развилась естественным путем из некоей преджизни, состоявшей из «органических» соединений, созданных в результате неорганических процессов. Эта теория хорошо согласуется с большим числом проверенных научных фактов и наблюдений, полученных специалистами в самых разных естественных науках. В этом ее преимущество перед более ранними гипотезами, в которых было немало противоречий и несуразниц, тем более если включать в их число постулаты о внезапном, а то и сверхъестественном происхождении жизни. Сейчас эти постулаты признаются не только недостоверными, но и просто излишними; наука их отбрасывает. Жизнь на Земле могла возникнуть естественным путем, и, судя по известным фактам, именно так она и возникла.

#### Список литературы

1. Berkner L. V., Marshall L. C., On the origin and rise of oxygen concentration in the earth's atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, **22**, 225—261 (1965).
2. Berkner L. V., Marshall L. C., Limitation on oxygen concentration in a primitive planetary atmosphere, *J. Atmospheric Sci.*, **23**, 133—144 (1966).
3. Burlingame A. L., Simonet B. R., High resolution mass spectrometry of Green River Formation kerogen, *Nature*, **222**, 741—747 (1969).
4. Calvin M., *Chemical Evolution*, Clarendon, Oxford, 278 pp., 1969. (М. Кальвин, *Химическая эволюция*, «Мир», М., 1971.)
5. Moore R. C., *Introduction to Historical Geology*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, N. Y., 270 pp., 1958.
6. Nagy B., Veinschein W. G., Henessy D. J., Mass spectrometric analysis of the Orgueil meteorite: Evidence for biogenic hydrocarbons, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **93**, 25—35 (1961).

7. *Runcorn S. K.*, Convection currents in the earth's mantle, *Nature*, 195, 1248—1249 (1962).
8. *Rutten M. G.*, The Geological Aspects of the Origin of Life on Earth, Elsevier, Amsterdam, 146 pp., 1962.
9. *Rutten M. G.*, Sedimentary ores of the Early and Middle Precambrian and the history of atmospheric oxygen, *Proc. Inter.-Univ. Congr.*, 15th, 1967, Leicester, pp. 187—195, 1969.
10. *Rutten M. G.*, The history of atmospheric oxygen, 1970 (In press).

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абиогенные процессы 74, 79  
 — соединения 14, 85, 362  
 Абсолютная временная шкала 56  
 — датировка 40, 52, 53, 286, 319  
 Абсолютный возраст 53—54, 172, 195, 203, 228, 232, 257, 319, 354, фото 34  
 — — определение 37, 38, 41, 47—48, 51—55, 57, 60, 62, 171, 172, 183, 197, 226, 232, 275, 305, 306, 389  
 Автотрофные организмы 150, 387  
 Аделаида, бассейн 312  
 Азиатский щит 182  
 Азой 183  
 Акадское горообразование 383  
 Актиний 62  
 — ряд 46  
 Актуализма принцип 13, 17—35, 67, 165, 380  
 Актуалистическая атмосфера 325, 353, 355, 384, 388  
 — жизнь 386, 388  
 Алканы 207—215, 368, 384, 390  
 Альbedo 321  
 Альгомское горообразование 183, 258, 262, 277  
 Альгонкий 182  
 Альпийское горообразование 33, 170, 184, 318, 358  
 Альпы 21, 30  
 Алюминиево-латеритные отложения 269  
 Амадеус, бассейн 312  
 Амазонка, бассейн 173  
 Аминокислоты 69, 97—100, 105—109, 111—117, 119, 120, 128, 137, 138, 152, 168, 205, 207, 216, 221, 228, 291, 361, 377, 390  
 Аммониты 317, 318  
 Амфибии 161, 162, 164, 165, 318, 383  
 Анаэробное дыхание 147  
 Анаэробные бактерии 166, 310  
 — микроорганизмы 166, 310  
 — обмен 146  
 — организмы 75, 144, 147, 228, 229  
 — прокариоты 311  
 — процессы 309  
 — условия 143—145  
 Анаэробы 14, 228, 229, 308  
 — облигатные 147  
 — факультативные 148, 149  
 Ангольско-Касайский кратон 189  
 Анды 30  
 Анимики группа 220, 227  
 — формация 226  
 Антарктида 60  
 Антигеноалканы 208  
 Анти-Атлас 189  
 Антрим сланцы 206, 213  
 — формация 211, 212  
 «Аполлон-11», космический корабль 377  
 Аппалачский пояс складчатости 187, 188  
 Архей 40, 182, 183, 276  
 Асимметрические молекулы, кристаллы 286  
 Ассимиляция 139  
 Астероиды 90, 368, 374  
 — пояс 374  
 Атабаска, бассейн 187  
 Атмосфера бескислородная 13, 15, 74—77, 79, 84, 85, 91, 83—96, 107, 118, 119, 129, 151, 156, 159, 160, 177, 193, 194, 203, 204, 221, 223, 228, 236, 237, 246—248, 254, 255, 257—258, 263, 265—267, 269, 270, 277, 279, 281, 284, 303—305, 307, 309, 325—353, 357, 380, 381, 385, 387, 388  
 — вторичная 91—94  
 — первичная 13, 14, 74, 76, 85, 91—96, 106, 118, 126, 129, 151, 203, 204, 213, 221, 223, 236, 237, 254, 268, 281, 284, 291, 304, 309, 322, 325—353, 368, 381, 385  
 Аутигенные минералы 54, 226, 227, 257, 275, 302  
 Аутокатализ 289, 290  
 Афелий 376

Афотическая зона 346, 348  
 Африка 57, 59, 60, 182, 189, 190, 197, 201, 206, 215, 230, 231, 234, 248—253, 257, 276, 382, 391, фото 23, 24, 26, 27, 35, 36  
 Африканский щит 187, 229, 230  
 Ахаггар 189, 197, фото 8, 9  
 Ахондритные метеориты 91, 369  
 Ахондриты 363  
 Ацетилмурамовая кислота 152  
 Аэробные бактерии 310  
 — организмы 75, 140, 229  
 — условия 143—145, 326, 349  
 Аэробы 228  
 — облигатные 147

Бактерии 73, 141, 143, 146, 148, 150, 151, 161, 166, 220, 309, 210, 315, 383, фото 25  
 Балтийский щит 190, 235, 276  
 Белемнит 306  
 Белки 70, 72, 97—100, 106, 108, 113—115, 117, 126, 128, 129, 133, 137, 165, 193, 221, 320, 361, 386, 390  
 Белт, серия 185, 198, 199, 313  
 Бентос 347—349  
 Бентосные организмы 344  
 — прокариоты 346  
 Бескислородная атмосфера см. Атмосфера бескислородная  
 — жизнь 144, 147, 348  
 — среда 91, 129, 156, 198  
 Бескислородные условия 85, 143  
 Бескислородный бентос 347, 349  
 — планктон 347, 349  
 Биогенез 81, 126, 161  
 Биогенные известняки 200, 308, 309  
 — отложения 14, 184, 191, 192, 200—207, 226, 243, 309, 382  
 — соединения 204, 205, 362, 389, 390  
 Биогермы 197  
 Биоломинесценция 156  
 Биомасса 349, 352  
 Биопозз 81, 85, 126—142, 145, 159, 161, 168, 289, 320, 387, 388  
 Биоценозы 235  
 Биттер-Спрингс формация 312, 313, фото 42  
 Бокситовые отложения 269  
 Браннерит 256, 257, фото 37  
 Брожение 139, 141, 144, 147—149, 281, 309, 310, 340—341, 356  
 Булавайо 201, 276, фото 10, 11

— серия 203, 230  
 — система 201—203  
 Бутан 208  
 Бушвельдский магматический комплекс 231

Везувий 22, 24, 25  
 Венера 89, 90, 92  
 Вентерсдорф, система 231  
 Вермонтское горообразование 383  
 Верхнее, озеро 226, 264  
 — — формация 228, 261, 264, 265, 269, 275, 277, 381  
 Верхнекамберлийские рифы 254, 256  
 Взрыв жизни 359—361  
 — ископаемых 360  
 Винная кислота 287  
 Вирусы 161  
 Витватерсранд 250, 257, фото 36  
 — бассейн 250, 251  
 — комплекс 184  
 — серия 251  
 — система 231, 234, 251—255, фото 27, 30, 32, 34, 35  
 — формация 206, 249  
 Внеземная жизнь 15  
 Водорослевые рифы 185, 197, 198, 225  
 — известняки 184, 195, 197, 202, 275, 382  
 Водоросли 40, 146, 150, 152, 153, 156—158, 191, 198, 202, 203, 224, 285, 307, 308, 311, 314—316, 362, 383  
 Возраст абсолютный, см. Абсолютный возраст  
 — относительный, см. Относительный возраст  
 Воспроизведение 136—138  
 Восточный Ранд, месторождение золота 250, 254, 256  
 Вредефорт 250, 251  
 Временная шкала абсолютная 56  
 Время в геологии, измерение 36—66  
 Вторичная атмосфера, см. Атмосфера вторичная  
 Выветривание 244—247, 250, 266, 267, 269, 270, 295, 304, 351, фото 34  
 — окислительное 247  
 — физическое 245, 247, 266, 272  
 — химическое 245—247, 254, 266, 272  
 Вымирания большие 285, 316, 318, 352  
 Газовая хроматография 121, 122, 208, 209—212, 216, 219

Газовый хроматограф 217, 218, 220  
 Газо-жидкостная хроматография 122  
 Газо-жидкостный хроматограф 123  
 Гайана 280  
 Ганфлинт, отложения 227  
 — серия 184  
 — сланец 206, 219, 224, 233—235, фото 21  
 — флора 228, 229, 235, 372, 385, фото 21, 22  
 — формация 160, 206, 219, 222—229, 234, 315, 372, 385, фото 16—18, 20, 21  
 — — железорудная 262  
 Гексагональные кристаллы 287  
 Гем 140  
 Гематит 261, 268, 276, 278, 279, 303  
 Генетический код 136, 138  
 Гены 165  
 Геологические часы 13, 36, 42—43, 45, 306  
 Геологическое время 26, 40  
 Геосинклинали 171—173, 229, 231  
 Геосинклинальная фаза 277  
 Геосинклинальные фации 171  
 Геосинклинальный бассейн 188, 277  
 — период 170, 171, 173—175, 180, 266, 267, 277, 305, 318, 319, 351—354, 356, 357, 359  
 — пояс 172, 173  
 Геосинклинальные фации 171  
 Геркуланум 24  
 Герцинская складчатость 184, 188, 358  
 Гетерополимер 137  
 Гетеротрофные анаэробы 154  
 Гетеротрофы 150, 387  
 Гётит 278  
 Гидрослюда 301  
 Гидросфера 244, 348  
 Гималаи 30  
 Гипертрофные условия 349  
 Гипогенные растворы 255, 256, 258  
 Гиполимнион 271, 272, 347  
 Глауконит 54  
 Глина 298—299  
 Глинистые минералы 284, 291, 299, 301, 302  
 — — разрушенные 302  
 Горообразование 30, 31, 60, 61, 183, 185, 186, 188, 189, 228, 229, 266, 275, 286, 316, 318, 319, 354, 355  
 — акадское 383  
 — альгомское 183, 258, 262, 277  
 — альпийское 33, 184, 318  
 — вермонтское 383  
 — герцинское 184, 188

— гренвиллское 183, 262, 275, 358—360  
 — каледонское 184, 188, 359, 360  
 — Кивино 262  
 — килларнойское 383  
 — лаврентьевское 263  
 — мареальбидское 356  
 — невадское 383  
 — пинокинское 183, 227, 228, 262, 275, 357  
 — послесвазилендское 232  
 — период(ы) 30, 61, 185, 237, 316, 318  
 — — гренвилльский 183  
 — — лаврентьевский 183  
 — — пинокинский 183  
 — процессы 30, 55, 353  
 — фазы 318  
 — цикл 32, 266  
 Горообразовательная деформация 189  
 Горообразовательный переворот 318  
 Граниты, продукты разрушения 247—248  
 Графит 269, 273,  
 Гренвилл, провинция 187  
 Гренвилльский метаморфизм 57  
 Гренвиллское горообразование 183, 262, 275, 358—360  
 Гренландия 31, 187  
 Грибы 73, 146, 153  
 Грин-Ривер сланцы 205, 209—213, 219, 220, 291,  
 — — формация 205, 206, 209  
 Губки 236, 293  
 Гурон 276  
 — нижний 258, 262, 277  
 Гуронская система 183  
 Гуронский период 319  
 — песчаник, фото 29

Дала песчаники 184, 297, 280, 281, 355, 357, 388  
 Дамариды 189  
 Дамарский пояс 230  
 Дарвар 276  
 Датирование абсолютное, см. Абсолютный возраст  
 — относительный, см. Относительный возраст  
 Двумерная хроматография 121  
 Девонский период 56, 279, 383  
 Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) 101—104  
 Дельта речная, район 274  
 Диагенез осадков 278

- Диатомовые водоросли 292, 293  
 Димиктные озера 271  
 Динофлагелляты 373, фото 22, 48  
 Диссимметрические молекулы 286, 287, 289  
 Доактуалистическая атмосфера 325—353, 355, 384, 388  
 — жизнь 386  
 Доактуалистические процессы 384  
 «Добиологический» бульон 80  
 Докембрий 14, 40, 54, 58, 122, 157, 160, 172, 175, 181—189, 193—207, 213, 220—233, 235—237, 243, 247—249, 255, 256, 258—281, 284—286, 290, 291, 293, 298, 299, 307, 309, 311—314, 318—320, 326, 344, 354, 355, 357, 358, 372, 384—386, 389, 392, фото 8—15, 29, 32, 33, 35, 38  
 Домолит, серия 201—203, 384, фото 10, 11  
 Домингон-Риф 249, 252, 254, 257  
 — — система 231  
 Дочерние изотопы 43  
 — элементы 54, 172, 227, 275  
 Дрейф континентов 182  
 Дыхание 140—141, 144, 147—151, 153, 154, 281, 307, 340—341, 347, 349, 351, 355, 356, 358  
 Железные метеориты 64, 363, 364, 370, 374  
 — руды 260, 275  
 Железо 258—261, 270, 272, 278, 280, 281, 363, 373  
 Железо-каменные метеориты 363  
 Железо-латеритные отложения 269  
 Железо-никелевое ядро 364  
 — — Земли 364  
 Железо-никелевые метеориты 364  
 Железорудные формации 175, 222, 223, 226, 228, 258—273, 275—281, 293, 326, 357, 381, 384, 385  
 — — полосчатые 222—226, 228, 279—281, 293, 326, 357, 381, 384, 385  
 Железорудный кремнистый сланец 276  
 Железосодержащие силикаты 267  
 «Жидкий бульон» 80  
 Жидкостная абсорбционная хромотография 121  
 Жизнь вне Земли 362—379  
 Замбезийский пояс 230  
 Западноафриканский кратон 189  
 Западноконголезский пояс 189  
 Зарождение спонтанное 10, 11, 80  
 Земля, атмосфера 90  
 — возраст 58, 59, 62—65  
 — мантия 59—61, 65, 185, 295  
 — пульс 31—33  
 — состав 59  
 — строение 59  
 — ядро 59, 60  
 Земная кора 13, 30, 59—61, 63, 134, 170, 171, 184, 186, 201, 244, 245, 285, 290, 294—298, 327, 363, 380  
 — — движения 26, 32, 170, 171, 173, 180, 247, 253, 266, 292, 351, 352  
 — — перемещения, см. Земная кора, движения  
 — — подвижность 31  
 — — породы 59—61, 170  
 — — состав 294, 295  
 — — стабильность 183, 277  
 — поверхность, температура 319  
 Золото 255, 256  
 Золото-урановые «риффы» 184, 248—249, 255—258, 261—263, 277, 280, 326, 357, 381  
 — — руды 185, 281  
 Избыток летучих 295, 296  
 Излучение Солнца 144  
 Изоалканы 208  
 Изомеры 120, 121, 208, 217, 288—290  
 Изопрен 208  
 Изопреновые звенья 208  
 Изопреноидные алканы 207, 220, 291, 390  
 Изопреноиды 208, 210, 213—219, 368  
 Изостатическое равновесие 29  
 Изотопная геология 41, 306  
 Изотопное разведение 51  
 Изотопный возраст 48—51  
 — состав 51, 63—65  
 Изотопы 41—45, 47—49, 51, 61—64, 205, 235, 255, 285, 297, 305—307, 354, 369, 370, 374, 390  
 — дочерние 43  
 — материнские 43  
 — разделение 370  
 Изохроны 64, 65, 227, 354, 380  
 Иллит 301, 302  
 Ильменит 249  
 Иотнийская серия песчаников 279  
 Ископаемые 14, 15, 39, 40, 53, 55, 58, 59, 122, 140, 143, 154, 158, 160, 181, 185, 189, 191—244, 274, 275, 279, 285, 290, 291, 306, 311—315, 317, 325, 345, 358, 360, 362, 372, 373, 382, 383, 385—391

- Ископаемые горючие 298  
 — руководящие 39, 197, 275  
 Испарение 177, 273, 300, 309, 321  
 Итабирит 261

Йеллоунайф 187  
 Йеллоустонский парк 308

- Каапвальский кратон 229, 230  
 Кайнозой 30, 40, 56—58, 383  
 Какабека-Фоллс, фото 19  
 Калий-аргоновый метод 51, 54, 169, 227  
 Каменные метеориты 363—365  
 Каменноугольный перпод 56, 164, 165, 231, 320, 358  
 Камерун 189  
 Кампания 25  
 Канадский штт 57, 182, 183, 187, 188, 190, 200, 203, 206, 222, 223, 225, 235, 261, 263, 275, 382, 384  
 Каледонский пояс складчатости 189  
 Каледонское горообразование, см. Горообразование каледонское  
 Капский пояс 189  
 Карелиды — свекофениды 276  
 Карру система 231  
 Катастрофизм 20, 22—25, 27  
 Каустобиолиты 296, 350  
 Кварц 245, 247, 249—251, 254, 277—279, 284, 286—291, 301, фото 30—35, 40  
 Кварцево-пиритовый песок 281  
 Кварцевые иглы (спикуль) 293  
 Кварцевый диорит 247, 248  
 — песок 246  
 Кембрий 10, 40, 56, 58, 160, 183, 188, 189, 194—196, 318, 345, 358—361, 383, 385  
 Кероген 205, 219, 220, 313, 367, 389  
 Кибаранская складчатость 189  
 Кибариды 189  
 Киватин, провинция 187  
 Кивино, вулканическая деятельность 262  
 — система 183  
 Килларнойское горообразование, см. Горообразование килларнойское  
 Кимберли рифы 254  
 — серия 253  
 — сланец 253  
 Кислород 77, 84, 85, 140, 141, 144, 147—150, 155—157, 177, 243, 244, 265—268, 349—361, 380, 381, 386—388  
 — атмосферный 354—361  
 — защита 155—157, 159  
 Кислородная атмосфера 13, 15, 74—76, 91, 93, 144, 156, 157, 159, 160, 177, 193, 198, 207, 243, 254, 255, 263, 266, 267, 270, 277—278, 280, 281, 298, 325—353, 381, 388  
 — жизнь 144, 145, 147  
 «Кислородные» оазисы 155—157  
 Кислородные условия 143, 145  
 — формы жизни 144  
 «Кислородный» бентос 347  
 — планктон 347  
 Кистеперые рыбы 164  
 Кишечнополостные 195, 196, 236  
 Коацерватные капли 131—133, 176, 177  
 Коацервация 126, 130—133  
 Коллаген 360, 361  
 Кольчатые черви 195, 196, 236  
 Конвергентная эволюция 162  
 Континентальная среда 273  
 Кора, см. Земная кора  
 Коралловые рифы 197, 317, 321  
 Кораллы 191, 317, 383  
 Кордильерский пояс складчатости 188  
 Коттона эффект 287  
 Коэффициенты поглощения газов 329—332, 335, 338  
 Красноцветная серия древняя 279  
 — — новая 279  
 Красноцветные толщи 277—280, 355, 357, 381, 388  
 Кратонные области 187, 190, 229, 382  
 Кратоны 187, 189, 229, 230  
 Кремневые конкреции 293  
 Кремни 222, 292  
 Кремнистые желваки 292  
 — илы 292, 293  
 «Крепкий бульон» 174, 180  
 Кронига — Крамера уравнения 287  
 Круговой дихронизм 387  
 Кутин 221  
 «Лагунный бульон» 305  
 Латеритное выветривание 269, 270  
 Латеритные почвы 176, 177, 269  
 Латериты 269  
 Ледниковый период 18, 31, 37, 320, 321  
 Ледяная шапка 31, 37

Ленточные глины 37  
 — — изучение 36  
 Летучие 295, 296  
 Лимпопо пояс 230  
 Линейный гетерополимер 128, 137  
 — гомополимер 128  
 — полимер 128, 136, 137  
 Липиды 97, 98, 117, 128, 131, 133, 134, 152, 389  
 Литосфера 244, 304  
 Литотрофные организмы 150  
 Лондонский бассейн 38  
 Лоррен 259  
 Луна 90, 377  
 Лупан 219  
 Луфилийская дуга 189  
 Люцифераза 156  
 Люциферин 156

Мавританиды 189  
 Магма 295  
 Магматическая теория 295  
 Магнетит 135, 245, 251, 261, 268, 278, 303, 364, 365, фото 31  
 Макмини сланцы 206, 219  
 Малмсберийский пояс 189  
 Мамонтовы горячие источники 308  
 Мантия породы 65  
 Мареевское горообразование 356  
 Марс 89, 90, 92, 374  
 Масс-спектрограф 47, 49, 122, 217, 220  
 — спектрография 47  
 — спектрометр 47, 49—51, 62, 122, 123, 209, 217  
 — спектрометрический анализ 121, 209  
 — спектрометрия 48—51, 62, 210  
 — спектроскопия 209  
 — спектры 123, 209, 217, 218  
 Материковые ландшафты 274  
 Материнский изотоп 43  
 — элемент 48, 53, 54, 275  
 Мацерация 232  
 — методы 198—200  
 Межзвездная пыль 13  
 Межзвездное вещество 23, 59, 381  
 — пространство 93  
 Межзвездный газ 88  
 Межледниковье 320  
 Мезозойская эра 30, 40, 56—58, 312, 383, фото 40  
 Мейн-Риф группа 252  
 Меловой период 56, 165, 383  
 Мембраны 127, 133—134  
 Меркурий 89, 90, 92

Метаболизм 75, 127, 133—137, 139, 146, 147, 154, 157, 158, 165, 166, 191, 192, 198, 220, 228—229, 281, 307—311, 315, 340, 382, 388, 392  
 Метан 208  
 Метеориты 15, 64, 91—93, 194, 362—370, 372, 374—376  
 Микроископаемые 199, 200, 284, 285, фото 17, 18, 20  
 Микроорганизмы 75, 145—147, 150, 151, 153, 154, 157, 160, 166, 181, 195, 237, 281, 285, 289, 315, 340, 341  
 Министы 260, 261  
 Миннесотские отложения 40  
 Миссисипский период 56, 383  
 Митохондрии 153, 155  
 Мнгоцен 56  
 Млекопитающие 148, 163—166, 314, 318, 383  
 Млечный путь 376  
 Многоклеточные 146, 185, 196, 236, 361  
 Модис, свита 231, 132  
 Мозамбикский пояс 189, 230  
 Молекулярные ископаемые 140, 185, 191—194, 200, 201, 203—219, 233, 237, 243, 291, 325, 382, 389—391  
 Моллюски 27—29, 191, 360  
 — двусторчатые 318  
 — пресноводные 360  
 — ходы 27, 28  
 Монацит 257  
 Моноклинные кристаллы 286  
 Мономикстные озера 270, 271  
 Монофилетическое происхождение 161—164  
 Монтмориллонит 291, 299, 301, 302  
 Море, трансгрессия 27  
 Морская среда 273, 274  
 Морфологическая группа 285, 315  
 «Мохол» проект 61  
 Мохоровичича раздел 61  
 Мукокомплекс 152, 155  
 Мукопептид 152  
 Мутанты 138, 139  
 Мутации 138, 139

Намаква-Наталь пояс 230  
 «Нанноископаемые» 199  
 Нансач сланцы 206, 211, 213, 274  
 Невадское горообразование 383  
 Невольничье озеро провинция 187  
 Негони железорудная формация 226  
 Нектон 349  
 Нектонные животные 344

Неоген 383  
 Неогеттонизм 244  
 Неорганическая полимеризация 126  
 Неорганическая фотодиссоциация воды 356, 384  
 Неорганические вещества 74  
 — доноры электронов 150, 151  
 — молекулы 191  
 — процессы 74, 76, 78, 79, 81—83, 126, 127, 129, 130  
 — реакции 77, 84, 126, 293, 327  
 — соединения 73, 74, 150, 193  
 Неорганический синтез 77—81, 85, 94, 194, 109, 127—130, 145, 193, 214, 215  
 — фотосинтез 78—80, 83, 84, 99, 151, 307, 320, 328, 355, 357  
 Нептун 89, 90  
 Нептунизм 23, 294  
 Нерадиогенные изотопы 48, 61, 62, 64  
 Норвежский метаморфизм 57  
 Нормальные алканы 208, 209  
 Нуклеиновые кислоты 97, 101, 102, 106, 108, 117, 126, 137, 138, 390  
 Нуклеотиды 117, 193, 381

Облигатные анаэробы 147  
 — аэробы 147  
 Однопроходные 163  
 «Озерный бульон» 305  
 — ландшафт 274  
 Озон 330—332, 335—337, 343, 367  
 — коэффициент поглощения 330, 331  
 Озоновый экран 77  
 Окаменелости истинные 382, 385, 390  
 Окаменелые леса 223  
 Океанические базальты 65  
 Окременение 223, 292  
 Оледенение 320  
 Оливин 59  
 Олигоцен 56  
 «Омоложение» пород 169  
 Оньвервагт, серия 184, 190, 201, 206, 207, 219, 222, 229—233, 382, 391, фото 26  
 Оптическая активность 284—291, 369, 390  
 — — D-форма 288—290  
 — — L-форма 288—290  
 Оптически активные вещества 288—290  
 — — кристаллы 286, 287, 290  
 — — соединения углерода 291  
 Оптические изомеры 289

Оптического вращения дисперсия 287  
 Оранжевой реки пояс 189  
 «Организованные элементы» 15, 193, 206, 233, 262, 267, 370—373, 375, 382, 391, 392, фото 26, 27  
 Органическая эволюция 38, 39, 41, 133, 316, 318  
 Органические вещества 14, 68, 74, 75, 82, 94, 96, 104, 129, 131, 139, 148, 175—177, 179, 191, 192, 200, 207, 221, 271, 285, 287, 304, 305, 310—312, 367, 380, 385, 387, 389, 390, 392  
 — молекулы 14, 68, 73, 74, 78—80, 85, 96, 107, 112, 116—118, 122, 126—130, 138, 145, 151, 168, 200, 201, 221, 228, 229, 234, 269, 284, 288, 290, 302, 312, 347, 357, 374, 381, 388, 389  
 — процессы 74, 316—319  
 — соединения 14, 15, 71—74, 76—81, 85, 94, 96, 104, 107, 114, 118—120, 219, 130, 134, 147, 150, 159, 168, 193, 204, 220, 221, 273, 287, 290, 304, 343, 362, 367, 368, 381, 382, 385, 389, 393  
 Органический фотосинтез 78, 134, 138—139, 147, 151, 156, 176, 207, 220, 243, 273, 307, 325, 340, 341, 344, 350—352, 355—357, 385—387  
 Органотрофные организмы 150  
 Ордовикские отложения 53  
 Ордовикский период 56, 383  
 Орогенез 183, 285, 319  
 Орогенетические процессы 30, 32, 190  
 Орогенетический цикл 168—180, 186, 277, 279, 326, 351—354  
 Орогенный период 55, 169—172, 351—354, 356, 359  
 Осадочные породы, ритмичность 251  
 Осмотическое давление 133, 134  
 Отложения алюминиево-латеритные 269  
 — бокситные 269  
 — железо-латеритные 269  
 Относительная шкала времени 39, 40  
 Относительный возраст 41, 228  
 — — определение 37—39, 40, 41, 47, 54, 55, 171, 319

Палеобиология 274  
 Палеоботаника 285, 315  
 Палеоботаническая классификация 285  
 — номенклатура 314—316  
 Палеоген 383



Палеозой 30, 40, 56—58, 157, 183, 186, 249, 262, 279, 359, 383  
 Палеопочвы 274  
 Палеотемпературный метод Юри 41  
 Палеоцен 56  
 Парафиновый хвост молекулы хло-рофилла 220  
 Парафины 215  
 Парижский бассейн 38  
 Парниковый эффект 321, 322  
 Парофазная хроматография 121, 122  
 Пастера точка 147—150, 281, 340—341, 345, 347, 348, 352, 357  
 — уровень 355, 388  
 — эффект 144, 356, 387, 391  
 Пегматитовые дайки 201  
 Пегматиты 203  
 Пинокинское горообразование 183, 227, 262, 275, 357  
 Пенсильванский период 56, 383  
 Пептидные цепи 106, 108, 115, 137  
 Пептиды 85, 231  
 — абиотический синтез 119  
 Первичная атмосфера, см. Атмосфера первичная  
 — газовая туманность 374  
 Первичный бульон 80, 84, 116, 134, 174—176, 178, 180, 207, 234, 284, 299, 300, 326  
 Перигелий 376  
 Пермский период 56, 163, 165, 182, 279, 317, 318, 320, 383  
 Петропорфирин 214, 220  
 Пиланберг дайки 231  
 Пири схема 83—84, 375, 386  
 Пирит 245, 249—256, 261, 268, 381, фото 30—33, 35, 36  
 Пиритовые пески 248—255, 263—268, 272, 280, 281, 357, фото 31, 32  
 «Питательный» бульон 80  
 Планеты, атмосфера 13, 89, 91  
 — большие 90  
 — земной группы 90, 92  
 — малые 90  
 Планеты-гиганты 90, 91  
 Планктеры 292  
 Планктон 344, 347, 349  
 Планктонные организмы 344, 345, 348  
 — формы 292, 344  
 Плейстоцен 56  
 Плеохроичные ореолы 44, 45  
 Плеченогие 317, 360  
 Плиоцен 56  
 Плутон 90  
 Плутонизм 294  
 Подзол 176, 179  
 Подзолистая почва 177, 179  
 Покегама 258, 262  
 Полимеризация 116, 117, 126, 127, 389  
 Полимеры 117, 128, 131, 136—138  
 Полипептидные цепи 97, 100, 113, 120  
 Полипептиды 120, 126  
 Полисахариды 97, 117, 221  
 Полифилетическое происхождение 161—164  
 Полосчатые железнорудные формации 222—226, 228, 279—281, 293, 326, 357, 381, 384, 385  
 Полураспада период 42, 47, 48  
 Помпеи 24  
 Послеледниковый период 320  
 Посторогенная стадия 277  
 — фаза 277  
 Посторогенный период 170, 171, 173, 266, 267, 351—353, 357  
 Почвы 176, 177  
 «Предбиологический» бульон 80, 284, 302—305  
 Преджизнь 83—84, 107, 114, 118, 119, 129, 130, 138, 145, 155, 159, 161, 164, 168, 193, 194, 221, 225, 228, 233—235, 273, 289, 305, 309, 357, 369, 373—375, 377, 382, 385—393  
 Принцип актуализма 13, 17—35, 67, 165  
 — простоты 19  
 — суперпозиции 38—41, 53  
 — унитаризма 18, 21, 380  
 Пристань 207, 210, 212—215  
 Прокариотические клетки 144, 151—155, 285, 344, 348  
 — организмы 157  
 — ископаемые 311—314  
 Прокариоты 311, 313  
 Простейшие 146, 153, 383  
 Протеиноиды 114—116, 137, 138, 381, 382  
 Протерозой 40, 183, 276  
 Протисты 146, 152  
 Порфирины 220, 221, 368, 377  
 Псевдоископаемые 235—237, фото 29  
 Псевдоорганические соединения 74  
 Пути длина 329, 331—338  
 Пыльца 372, фото 47  
 Радиоактивное вещество 172  
 — включение 44  
 — зерно 45  
 Радиоактивные процессы 44  
 — ряды 42—43, 53  
 — часы 52  
 Радиоактивный изотоп 42, 45

Радиоактивный материал 61  
 — метод датирования 13  
 — распад 43—48, 62, 64, 275  
 — — история 190  
 — — постоянная 42, 43  
 — — продукты 58, 62  
 — — ряды 47—48, 172  
 — элемент 41, 44, 45, 48, 51, 53, 54, 64, 172, 257, 275, 321  
 Радиогенное происхождение 53, 61  
 Радиогенный аргон 227  
 — изотоп 64  
 — свинец, фото 34  
 Радиолярии 195, 292, 293, 312, фото 39, 40  
 Радиометрический метод датирования 38, 231  
 Радиометрическое определение возраста 172  
 Радиоуглеродный метод 37, 47  
 Ракообразные 195  
 Ранняя жизнь 159—161, 164, 165, 181, 220, 225, 228, 233, 234, 237, 243, 273, 309, 341, 343—349, 357, 372, 382, 384, 385, 387, 390—392  
 Распада продукты 53  
 — процесс 42, 43, 48  
 Рапакиви 57  
 Рацемизация 287  
 Рацемическая кислота 287  
 Рацемические растворы 288, 289  
 Регенерированная порода 172  
 Репродукция 136—138  
 Рептилии 161—165, 383  
 Рибонуклеиновая кислота (РНК) 101—103, 136  
 Ритмичность осадочных пород 251  
 Рифы 184, 185, 197—198, 226, 249, 263, 277, 280, фото 8  
 Родезийские декембрийские пояса 201  
 Родезийский кратон 230  
 Родезийско-Трансваальский кратон 189  
 Россыпи 177, 178, 249  
 Рораима песчаники 280  
 — формация 280  
 Рубидий-стронциевый метод 51, 164, 172, 227, 232  
 Рурский бассейн 231  
 Русская платформа 67  
 Сан-Паулу скалы 61  
 Сардиния 318  
 Сатурн 89, 90  
 Свазиленд 231, 276  
 — система 60, 184, 189, 190, 201, 206, 207, 229—233, 237, 382  
 Свазилендские граниты 232  
 Свекофениды 57  
 Свекофенская складчатость 235  
 Свинец 46—48, 51, 53, 62—65, фото 34  
 Свинцовые руды 63, 65  
 Свинец-свинцовый метод 47, 61, 62  
 Себакийская формация 276  
 Сера 297, 298, фото 34  
 — изотопы 255, 297  
 — круговорот 296—298  
 Серобактерии 310  
 Серпентин 59  
 Сиаля 244  
 Сидерит 261, 268  
 Силицификация 223, 292  
 Силур 56, 243, 279, 346, 358, 331, 383, 385, 388  
 Симбиоз 154  
 Симбионт 155  
 Сингенетическое окремнение 292  
 Ситостан 217—219  
 Скалистые горы 30, 198  
 Складчатости пояс 186—189, 229, 230, 258  
 Скрытокристаллические сланцы 292  
 Сланцы Антрим 206, 213  
 — кремнистые 204—206, 219, 224, 234, 235, 261, 270, 272, 273, 276, 277, 284, 285, 290—293, 298, 312, 313  
 Солнечная радиация 321, 327—337  
 — — интенсивность 328  
 Соуден 276  
 — железнорудная формация 184, 206, 207, 211, 219, 357, 382, 384  
 — сланцы 213  
 Спектроскопия 88, 89  
 Спираль двойная 102, 137  
 — тройная 361  
 Спонтанное зарождение 10, 11, 80  
 Среднекемберлийская серия 254  
 Стабильное ядро 187  
 Стадамиты 308  
 Сталактиты 308  
 Стеран 210, 217, 218  
 Стереоизомеры 286—288, 290  
 Стереоспецифичные соединения 289  
 Стигмарины 274  
 — горизонты 274  
 Стратосфера 321  
 Строматолитные образования, фото 13—15

Строматолиты 40, 197, 198, фото 12  
 Структура «конус в конус» 202  
 Сульфаты 297, 298, 309, 310  
 Сульфиды 245, 249, 268, 297, 298, 310  
 Сумчатые 163  
 Суртсей 164

Таконит 261  
 Таконский 383  
 Танатоценоз 225, 235  
 Танзанийский кратон 189  
 Темискаминг система 183  
 Температура земной поверхности 319—322  
 Теория катастроф 20, 22—25, 27  
 Тепло, аккумуляция 321, 322  
 Тепловой период 320, 321  
 — поток 321, 322  
 Тимор 317, 318  
 Тирозин 289  
 Титан (планета) 89  
 — (элемент) 256, фото 37  
 Тонкослойная хроматография 121  
 Торий 44, 47, 48, 53, 62—64  
 — ряд 46  
 Торий — свинец, ряд распада 44, 47  
 Торий-свинцовый метод 47, 51, 53, 62—65  
 Торридонские песчаники 279, 280  
 Травертин 308  
 Трансваальская система 230, 231, 392  
 Трансваальский кратон 229, 230  
 Третичный период 56, 165, 231, 280  
 Триазины 367  
 Триас 56, 278, 383  
 Триклинные кристаллы 286  
 Тритерпан 210, 218  
 Троилит 363—365  
 Тропопауза 321  
 Тропосфера 321, 330, 333

Углевороды 367, 368  
 Углеводы 205  
 Углерод, двуокись 170, 306, 349—353  
 — изотопы 205, 306  
 — соединения 291, 362, 369, 390  
 Углистые вещества 194, 232, 291, 366, 369, 382, фото 26  
 — метеориты 194, 225, 363—370, 372, 374—376, 391  
 — хондриты 363, 365  
 Углистый комплекс 367—370, 374, 375  
 Ультрафиолет 327—337, 341—344, 358, 386, 387

Униформизм 17—21, 24, 326  
 Уран (планета) 89, 90  
 — (элемент) 44, 48, 62—64, 248, 249, 256—258, фото 34  
 — изотопы 47, 62  
 — распад 46, 47, 63  
 — свинец 43  
 — ряды распада 44  
 Уран-гелиевый метод 227  
 Уранинит 249—256, фото 37  
 — «тени», фото 37  
 Урановая смолка 48, 249—251, 254, фото 33  
 Урановые минералы 54, 257, 258  
 — руды 48, 54  
 Уран-свинцовый метод 47, 51, 53, 62—65

Факультативное дыхание 148—150, 340, 356  
 Факультативные анаэробы 141, 148, 340  
 Фанерозой 30, 40, 47, 54, 57, 58, 160, 164, 171, 173, 181—183, 185, 186, 193—195, 197—200, 213, 220, 222, 223, 225, 234, 237, 273, 278—280, 292, 293, 312, 316—319, 354, 355, 383—385, 391, 392  
 Фарузий 197, фото 8, 9  
 Фауна, развитие 38, 318  
 Фенноскандский щит 182, 188  
 Фенолы 221  
 Фиг-Три серия 184, 185, 190, 201, 206, 207, 215, 216, 222, 229—233, 291, 382, 391, фото 23—25  
 Физическое выветривание 245, 247, 266, 272  
 Фитан 207, 210, 212—214  
 Фитила цепь 213  
 Фитол 214  
 Фишера — Тропша процесс 215  
 Флишевые фации 237  
 Фораминиферы 292  
 Форланд 229, 231  
 Фоссилизация 39, 192, 195, 223, 237, 285, 311—314, 372, 392  
 Фотическая зона 346, 348, 349  
 Фотогальваническая минеральная ячейка 134  
 — модель 135, 141  
 Фотодиссоциация 296  
 — воды 337—340  
 Фотолитиз воды 298, 331  
 Фотолитотрофность 151  
 Фотолитотрофные бактерии 309  
 Фотолитотрофный метаболизм 341

— фотосинтез 220  
 Фотолитотрофы 151, 157, 310, 388  
 Фотолитотрофные бактерии 151  
 — микроорганизмы 151, 309  
 — организмы 150, 151, 229  
 Фотоорганотрофный метаболизм 341  
 — фотосинтез 220  
 Фотоорганотрофы 151, 154, 309, 310, 387, 388  
 Фотосинтез 134, 140, 147, 151, 154, 157, 207, 220, 273, 296, 306—309, 311, 341, 356, 357, 384, 385  
 Фототрофная зона 176  
 Фототрофные микроорганизмы 150  
 — организмы 151, 273  
 Фототрофы 228

Хемолитотрофы 151, 388  
 Хемоорганотрофы 151, 309, 388  
 Хемотрофы 150, 228, 387  
 Химические ископаемые 191, 209, 357  
 Химическое выветривание, см. Выветривание химическое  
 Хитин 221  
 Хлорит 363, 364  
 Хлоропласты 153  
 Хлорофилл 140, 151, 157, 192, 207, 213—215, 220, 390  
 Хлорофиллин 214  
 Холестерин 133  
 Холмса — Хоутерманса анализ 227, — — гипотеза 65  
 — — метод 65  
 — — модель 63  
 Холодная ловушка 330, 333, 337, 338, 340, 356  
 Хондриты 363  
 — углистые 363, 365  
 Хондры 363, 366  
 Хроматография 111, 112, 121—123, 209—211

Целакант 164  
 Цементации зона 177, 269  
 Циркон 257

Чернозем 176, 179  
 Черчилл провинция 187  
 Четвертичный период 56

Чикагский стандарт 306  
 Членистоногие 196

Шамвай 276  
 Швейцарские Альпы 172  
 Шумана — Рунге полосы 335

Щит 14, 180—190, 200, 224, 229, 248, 258, 275, 319, 382, 385, 390  
 — Азиатский 182  
 — Африканский 187, 229  
 — Балтийский 190, 235, 236, 276  
 — Канадский 57, 182, 183, 187, 188, 190, 200, 203, 206, 222, 223, 225, 235, 261, 263, 275, 382, 384  
 — Фенноскандский 182, 188  
 — Южноафриканский 230

Эвапориты 178  
 Эволюция жизни 143—167  
 Эдиакары фауна 185, 196, 312  
 Экзогенные процессы 244, 247, 249, 267, 326, 350, 384  
 Экспериментальные подходы 96—125  
 Эпантиморфы 286—288, 290  
 Эндогенные процессы 244, 316—319, 326  
 — растворы 255  
 Эобионты 83, 84, 386  
 Эокембрий 197  
 Эон 10  
 Эоцен 56, 291  
 Эпиконтинентальные глины 189  
 — зоны 188  
 — области 173  
 — фации 171, 188  
 Эпителимнион 271, 347  
 Этилен 213  
 Эукариотические клетки 144, 151—155, 285, 313, 314, 341  
 — организмы 311, 313, 314, 316, 344  
 — — ископаемые 311

Юпитер 89, 90, 374  
 Юри механизм 340, 342  
 — палеотемпературный метод 41  
 — уровень 298, 355, 356  
 Юрский период 56, 383

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию . . . . .	5	16. Возраст Земли . . . . .	62
Из предисловия автора . . . . .	8	Список литературы . . . . .	66
Список литературы . . . . .	9		
<b>Глава I. Введение . . . . .</b>	<b>10</b>	<b>Глава IV. Биологический подход . . . . .</b>	<b>67</b>
1. Геологи и происхождение жизни . . . . .	10	1. Введение . . . . .	67
2. Биологический подход . . . . .	12	2. Живое и неживое с биологической точки зрения . . . . .	69
3. Об этой книге . . . . .	13	3. Химическое единство и морфологическое разнообразие современной жизни . . . . .	70
Список литературы . . . . .	16	4. Невозможность спонтанного синтеза органических соединений в условиях современной атмосферы . . . . .	73
<b>Глава II. Принцип актуализма . . . . .</b>	<b>17</b>	5. Современная кислородная атмосфера . . . . .	74
1. Основные принципы реконструкции геологической истории . . . . .	17	6. Бескислородная первичная атмосфера . . . . .	76
2. Актуализм и униформизм . . . . .	17	7. Неорганический синтез «органических» соединений в условиях примитивной атмосферы . . . . .	77
3. Философия геологии . . . . .	20	8. Generatio spontanea . . . . .	80
4. Катастрофизм . . . . .	22	9. Химическое разнообразие преджизни и химическое однообразие жизни. Схема Пери . . . . .	83
5. Актуализм . . . . .	23	10. Дополнение . . . . .	85
6. Актуализм и время . . . . .	27	Список литературы . . . . .	85
7. Время и геолог . . . . .	29		
8. Колебания интенсивности процессов: «пульс Земли» . . . . .	31	<b>Глава V. Точка зрения астронома . . . . .</b>	<b>88</b>
9. Принцип актуализма и происхождение жизни . . . . .	33	1. Данные астрономии . . . . .	88
Список литературы . . . . .	34	2. Первичная и вторичная атмосферы Земли . . . . .	91
<b>Глава III. Измерение времени в геологии . . . . .</b>	<b>36</b>	3. Различия в составе между первичной и вторичной атмосферами Земли . . . . .	93
1. Год в жизни человека и в истории Земли . . . . .	36	Список литературы . . . . .	95
2. Определение относительного и абсолютного возраста . . . . .	37		
3. Определение относительного возраста . . . . .	38	<b>Глава VI. Экспериментальные подходы . . . . .</b>	<b>96</b>
4. Эры относительной геохронологии . . . . .	39	1. Введение . . . . .	96
5. Относительный возраст осадочных и изверженных пород . . . . .	41	2. Некоторые формулы . . . . .	97
6. Определение абсолютного возраста . . . . .	41	3. Эксперименты Миллера . . . . .	104
7. Геологические часы; радиоактивные ряды . . . . .	42	4. Эксперименты Уилсона и Поннамперумы . . . . .	106
8. Постоянство радиоактивного распада . . . . .	43	5. Эксперименты Оро с нагреваемой водной средой . . . . .	107
9. Ряды радиоактивного распада, используемые при определении абсолютного возраста . . . . .	47	6. Эксперименты Фокса по использованию высоких температур для синтеза в безводных средах . . . . .	113
10. Изотопный возраст и масс-спектрометрия . . . . .	48	7. Эксперименты Кальвина. Конденсация низкомолекулярных единиц в более крупные в водных растворах, содержащих HCN . . . . .	116
11. Достоверность методов определения абсолютного возраста . . . . .	51	8. Общие результаты экспериментального подхода . . . . .	118
12. Абсолютный возраст изверженных пород и отложений . . . . .	53	9. Методы анализа . . . . .	120
13. Долгая ранняя история Земли . . . . .	54	Список литературы . . . . .	124
14. «Древнейшие породы» . . . . .	58		
15. Усовершенствование уран-свинцового и торий-свинцового методов определения абсолютного возраста . . . . .	62	<b>Глава VII. Стадии биопоза . . . . .</b>	<b>126</b>
		1. Введение . . . . .	126
		2. Неорганический синтез малых и более крупных «органических» молекул . . . . .	127
		3. Коацервация . . . . .	130
		4. Образование мембран . . . . .	133
		5. Метаболизм . . . . .	134
		6. Воспроизведение (редупликация) . . . . .	136
		7. Мутанты приобретают новую способность; органический фотосинтез . . . . .	138
		8. Дыхание . . . . .	140
		Список литературы . . . . .	141

Глава VIII. Этапы ранней эволюции жизни . . . . .	143
1. Гипотетический характер наших представлений о ранней эволюции жизни . . . . .	143
2. Аэробные и анаэробные, кислородные и бескислородные формы жизни . . . . .	144
3. Защищенность от коротковолнового ультрафиолета . . . . .	144
4. Роль микробов . . . . .	145
5. Переход от брожения к дыханию; точка Пастера . . . . .	147
6. Роль факультативного дыхания в ранний период эволюции жизни . . . . .	149
7. Типы питания микроорганизмов . . . . .	150
8. Прокариотические и эукариотические клетки . . . . .	151
9. Защита от кислорода и «кислородные оазисы» . . . . .	155
10. Сине-зеленые водоросли . . . . .	157
Список литературы . . . . .	158
Глава IX. Дальнейшая эволюция жизни . . . . .	159
1. Три главные стадии в истории жизни . . . . .	159
2. Эволюция поздней жизни . . . . .	160
3. Моно- или полифилетическое происхождение? . . . . .	162
4. Скорость распространения жизни . . . . .	164
5. Опасность увлечения сравнительной биохимией . . . . .	165
Список литературы . . . . .	167
Глава X. Механизмы концентрирования, сохранения и разделения. Орогенический цикл . . . . .	168
1. Концентрирование и сохранение продуктов последовательных стадий биопоза . . . . .	168
2. Орогенический цикл . . . . .	168
3. Датирование орогенных периодов последовательных орогенических циклов . . . . .	171
4. Колебания уровня моря в геосинклинальные периоды . . . . .	173
5. Круговорот воды в морях и на суше . . . . .	175
6. Механизмы концентрирования и сохранения . . . . .	176
Список литературы . . . . .	180
Глава XI. Где искать остатки ранней жизни. Древние щиты . . . . .	181
1. Разрозненность первых страниц палеонтологической летописи . . . . .	181
2. Древние щиты . . . . .	182
3. Стабильность древних щитов в течение фанерозоя . . . . .	183
4. Сложная структура древних щитов . . . . .	186
Список литературы . . . . .	190
Глава XII. Ископаемые остатки . . . . .	191
1. Различные типы окаменелостей . . . . .	191
2. Живое и неживое в геологии . . . . .	192
3. Ископаемые остатки позднего докембрия . . . . .	194
4. Фауна позднего докембрия . . . . .	195
5. Водорослевые известняковые рифы . . . . .	197
6. Микрофлора позднего докембрия . . . . .	198
7. Ископаемые раннего докембрия . . . . .	200
8. Макроскопические биогенные отложения . . . . .	201
9. Молекулярные биогенные отложения: молекулярные ископаемые . . . . .	203

10. Химическое строение молекулярных ископаемых . . . . .	207
11. Каких еще открытий можно ожидать в этой области . . . . .	219
12. Древнейшие истинные ископаемые остатки . . . . .	222
13. Примитивные ископаемые остатки среднего докембрия (возраст около 2 млрд. лет) . . . . .	223
14. Другие ископаемые остатки среднего докембрия . . . . .	225
15. Возраст ископаемых остатков среднего докембрия . . . . .	226
16. Метаболизм организмов среднего докембрия . . . . .	228
17. Ископаемые остатки раннего докембрия? . . . . .	229
18. Совпадение «организованных элементов» и ископаемых остатков во времени; означает ли это сосуществование преджизни и ранней жизни? . . . . .	233
19. Псевдоископаемые? . . . . .	235
20. Оптимистический взгляд в будущее . . . . .	237
Список литературы . . . . .	238

Глава XIII. Условия среды в геологическом прошлом . . . . .	243
1. Реконструкция условий среды по ископаемым остаткам и по геологическим данным . . . . .	243
2. Экзогенные и эндогенные процессы . . . . .	244
3. Выветривание горных пород . . . . .	244
4. Минералы, разрушающиеся в современных условиях . . . . .	245
5. Минералы, устойчивые в условиях бескислородной атмосферы . . . . .	246
6. Исследования Ранкамы; продукты разрушения гранитов . . . . .	247
7. Работы Рамдора; пиритовые пески и золото-урановые «риффы» . . . . .	248
8. Пески с пиритом, уранинитом и ильменитом . . . . .	249
9. Дальнейшая история докембрийских золото-урановых «риффов» . . . . .	256
10. Возраст золото-урановых «риффов», возникших в условиях бескислородной атмосферы . . . . .	257
11. Докембрийские железорудные формации . . . . .	258
12. Пиритовые пески и докембрийские железорудные формации . . . . .	263
13. Происхождение докембрийских железорудных формаций . . . . .	269
14. Морские или наземные (пресноводные)? . . . . .	273
15. Возраст докембрийских железорудных формаций . . . . .	275
16. Осадочные породы, сформировавшиеся в условиях кислородной атмосферы; красноцветные толщи . . . . .	277
17. Возраст красноцветных толщ . . . . .	279
18. Выводы . . . . .	281
Список литературы . . . . .	282

Глава XIV. Геологическая смесь . . . . .	284
1. Введение . . . . .	284
2. Оптическая активность и роль кварца . . . . .	286
3. Образование кремнистых сланцев . . . . .	291
4. Данные геохимии . . . . .	294
5. Круговорот серы . . . . .	297
6. Роль глин . . . . .	298
7. Состав морских вод . . . . .	300
8. Силлен; «миф о предбиологическом бульоне» . . . . .	302
9. Соотношение стабильных изотопов в биогенных и абиогенных соединениях . . . . .	305
10. Метаболизм организмов, секретирующих карбонат кальция . . . . .	307

11. Процессы фоссилизации. Как отличить прокариотические ископаемые организмы от эукариотических . . . . .	311
12. Водоросли; ботаническая и палеоботаническая номенклатура . . . . .	314
13. Органические процессы и эндогенные геологические процессы . . . . .	316
14. Постоянство температуры земной поверхности . . . . .	319
Список литературы . . . . .	322
<b>Глава XV. Две атмосферы: бескислородная и кислородная (доактуалистическая и актуалистическая) . . . . .</b>	<b>325</b>
1. Первичная бескислородная и современная кислородная атмосфера . . . . .	325
2. Доактуалистические и актуалистические процессы и условия . . . . .	326
3. Ультрафиолетовое излучение Солнца . . . . .	327
4. Поглощение ультрафиолетового солнечного излучения . . . . .	329
5. Поглощение ультрафиолетового солнечного излучения в атмосфере . . . . .	332
6. Автоматический механизм, ограничивающий содержание в атмосфере кислорода, образующегося в результате неорганической фотодиссоциации воды, на уровне 0,001 его современного содержания . . . . .	337
7. Второй автоматический механизм, ограничивающий содержание свободного кислорода в атмосфере на уровне 0,01 его современного содержания. Точка Пастера (переход от брожения к дыханию) . . . . .	340
8. Проникновение солнечного ультрафиолета в воду . . . . .	341
9. Ограниченность распространения ранней жизни . . . . .	344
10. Расширение зоны обитания ранней жизни по мере роста содержания кислорода в атмосфере . . . . .	345
11. Кислород и двуокись углерода . . . . .	349
12. Производство и потребление кислорода и двуокиси углерода на протяжении сменяющих друг друга орогенических циклов . . . . .	351
Список литературы . . . . .	353
<b>Глава XVI. История атмосферного кислорода и двуокиси углерода . . . . .</b>	<b>354</b>
1. набросок истории атмосферного кислорода и двуокиси углерода . . . . .	354
2. История атмосферного кислорода . . . . .	354
3. История атмосферной двуокиси углерода . . . . .	358
4. «Взрыв жизни» в начале кембрия . . . . .	359
Список литературы . . . . .	361
<b>Глава XVII. Жизнь вне Земли? . . . . .</b>	<b>362</b>
1. Введение . . . . .	362
2. Метеориты . . . . .	363
3. Углистые метеориты . . . . .	364
4. Углистый комплекс . . . . .	367
5. «Организованные элементы» . . . . .	370
6. Обсуждение . . . . .	374
7. Жизнь на Луне? . . . . .	377
Список литературы . . . . .	377

<b>Глава XVIII. Выводы . . . . .</b>	<b>380</b>
1. Что мы знаем (или думаем, что знаем) о происхождении жизни . . . . .	380
2. Существование преджизни и ранней жизни . . . . .	385
3. Что мы надеемся узнать . . . . .	387
4. Что, по-видимому, так и останется неизвестным . . . . .	392
5. Оптимистический взгляд в будущее . . . . .	392
Список литературы . . . . .	393
Предметный указатель . . . . .	395



Фото 1. Плеохроичные ореолы.

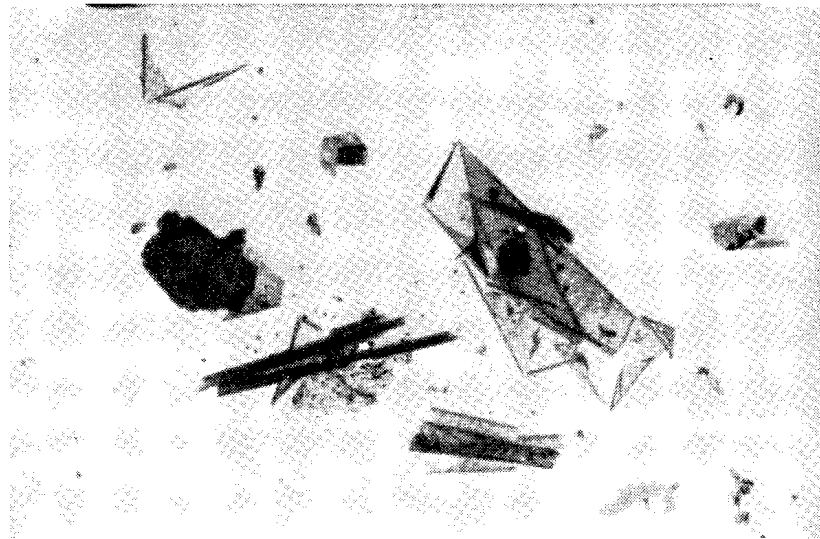


Фото 2. Плоские пленки «органических» макромолекул, образовавшиеся при искровых разрядах в смеси аммиака, сероводорода, паров воды и золы пекарских дрожжей (гл. VI, [43]).

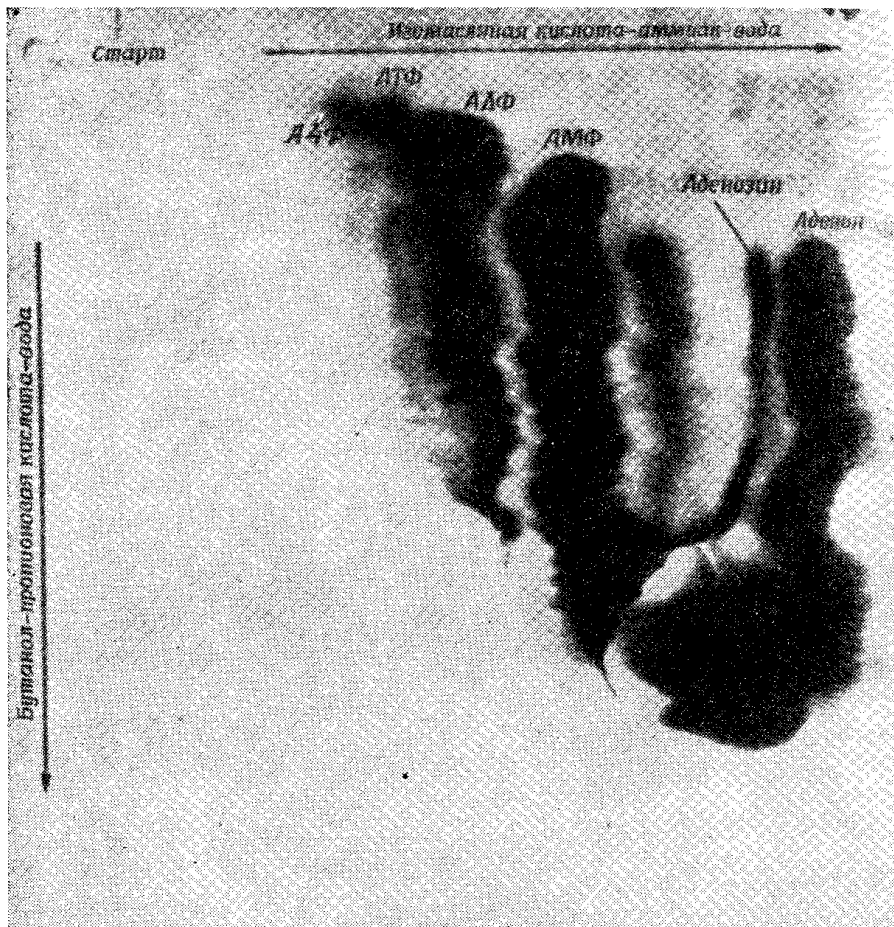


Фото 3. Хроматограмма на бумаге смеси соединений, полученных после облучения аденозинмонофосфата (АМФ) ультрафиолетом (гл. VI, [34]). Среди продуктов синтеза — аденозинтетрафосфат (А4Ф), аденозинтрифосфат (АТФ), аденозиндифосфат (АДФ). В более ранних экспериментах была доказана возможность неорганического синтеза АМФ из аденозина и аденина под действием ультрафиолета. Аденозин и аденин в свою очередь могут быть синтезированы в водных растворах с цианистым водородом под действием несколько повышенной температуры (гл. VI, [28, 29]) или ультрафиолета. Таким образом, в условиях примитивной атмосферы, очевидно, был вполне возможен неорганический синтез небольших органических молекул, на которых основана современная жизнь.

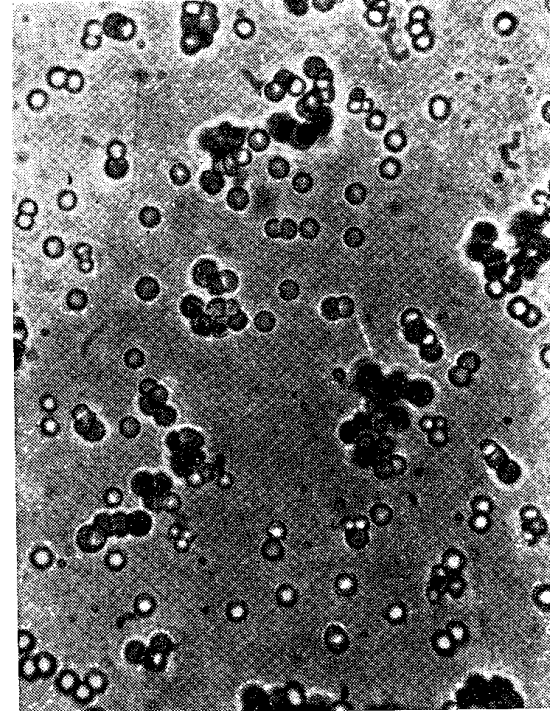


Фото 4. Протеиноидные микросферы, полученные промывкой горячих протеиноидных смесей (средний диаметр 2 мкм) (гл. VI, [9])

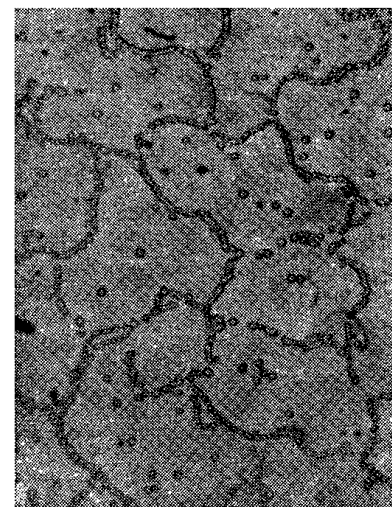


Фото 5. Протеиноидные микросферы, при слабом надавливании на препарат объединившиеся в цепочки, напоминающие водоросли (гл. VI, [9]).

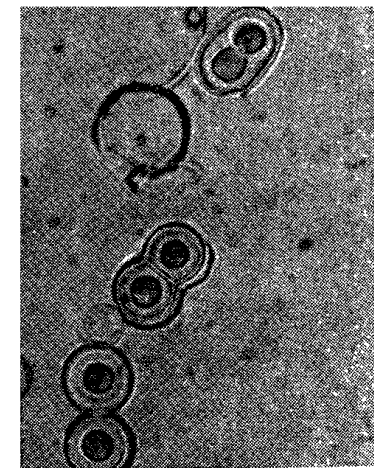


Фото 6. Протеиноидные микросферы, сдвоившиеся при повышении pH среды до 6,0 (гл. VI, [9]).

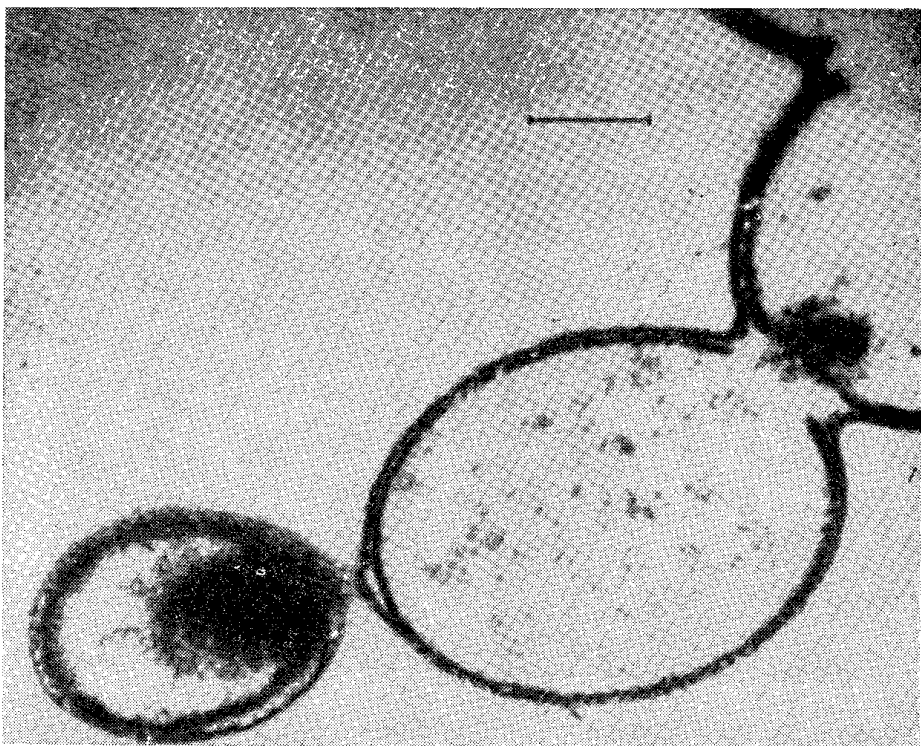
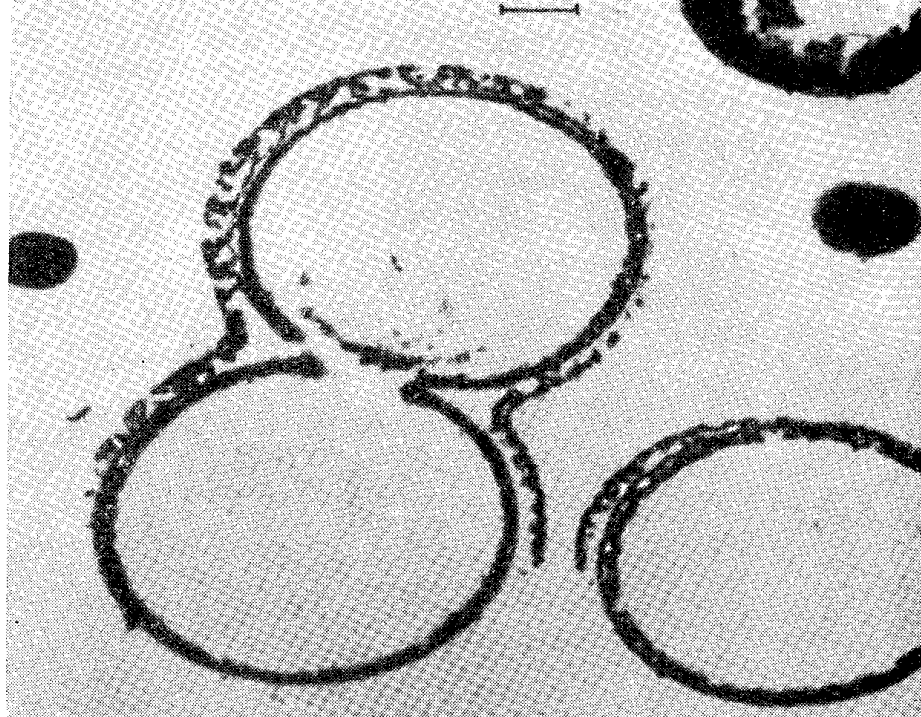


Фото 7. Электронные микрофотографии срезов микросфер. Ясно видны двойные стенки ( $\times \sim 1400$  раз). (гл. VI, [9]).



Фото 8. Гиф, образованный *Sporhyton* (Фарузий); докембрий массива Ахагар, Сахара (гл. XII, [37]).



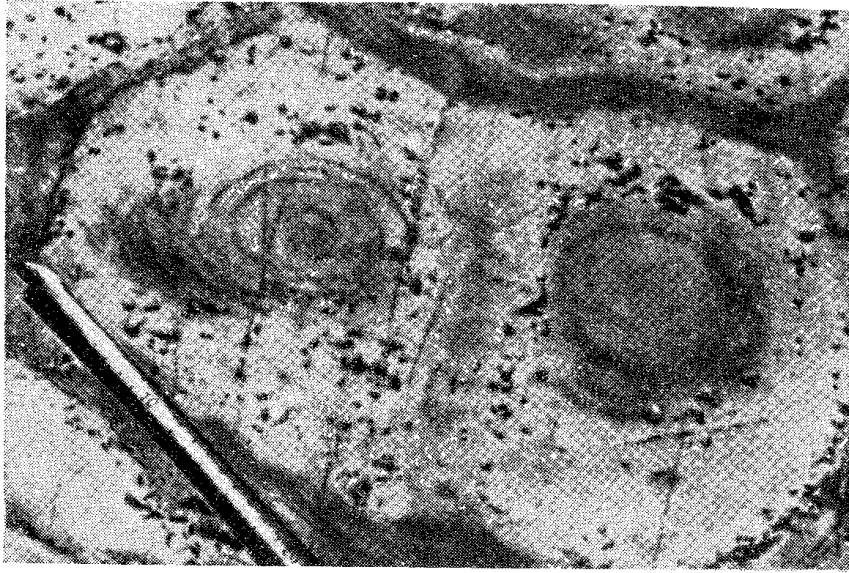


Фото 9. Две колонии *Conophyton* в поперечном разрезе (Фарузий); докембрийского массива Ахаггар, Сахара (гл. XII, [37])

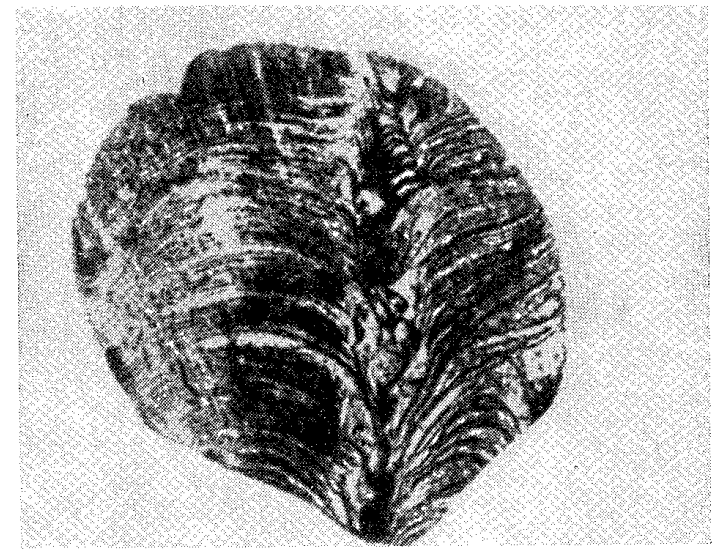


Фото 11. Тонкий шлиф биогенного докембрийского известняка (гл. XII, [51]). Серия Доломит, вблизи Булавайо, Южная Родезия. Несколько уменьшено. Обратите внимание на сложную структуру центральной «колонки», которая типична для биогенных отложений, но не встречается в неорганических известняковых отложениях.

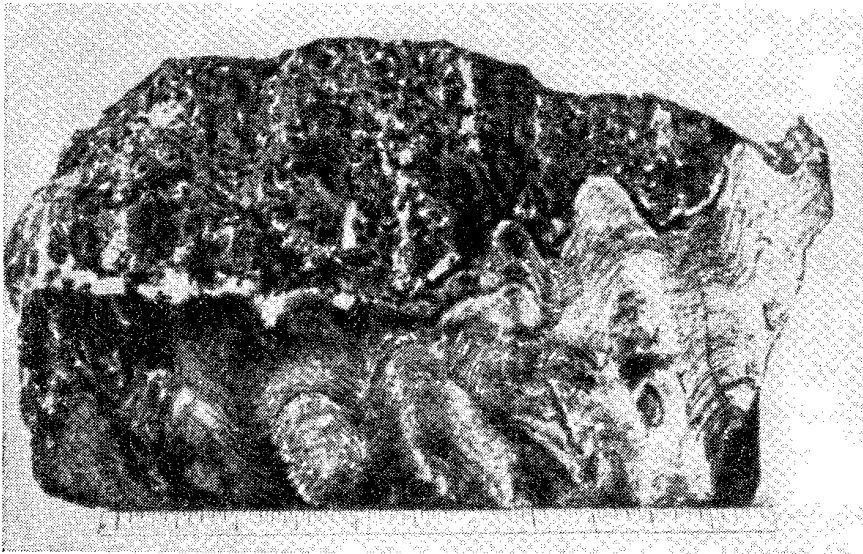


Фото 10. Полированная и травленая поверхность образца биогенных отложений в докембрийском известняке (гл. XII, [51]). Серия Доломит, вблизи Булавайо, Южная Родезия. Тонкая пластинчатая структура так называемой «зубчатой ленты» свидетельствует о том, что этот известняк возник не в результате неорганической кристаллизации, а биогенным путем. Две трети натуральной величины; линейка внизу проградуирована в дюймах.



Фото 12. Выветрившаяся поверхность слоистого докембрийского доломита (возраст более 1780 млн. лет) вблизи Оллитерво, Тервола (Финляндия) (гл. XII, [40]). Порода образована строматолитами; биогенные отложения накапливались слой за слоем.

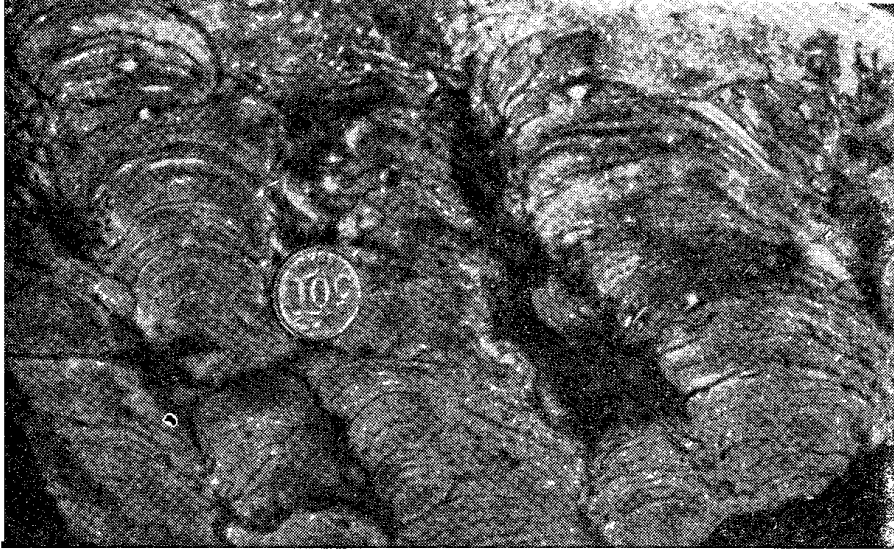


Фото 13. Участок строматолитных образований докембрия Финляндии, показанных на фото 12 (при большем увеличении).

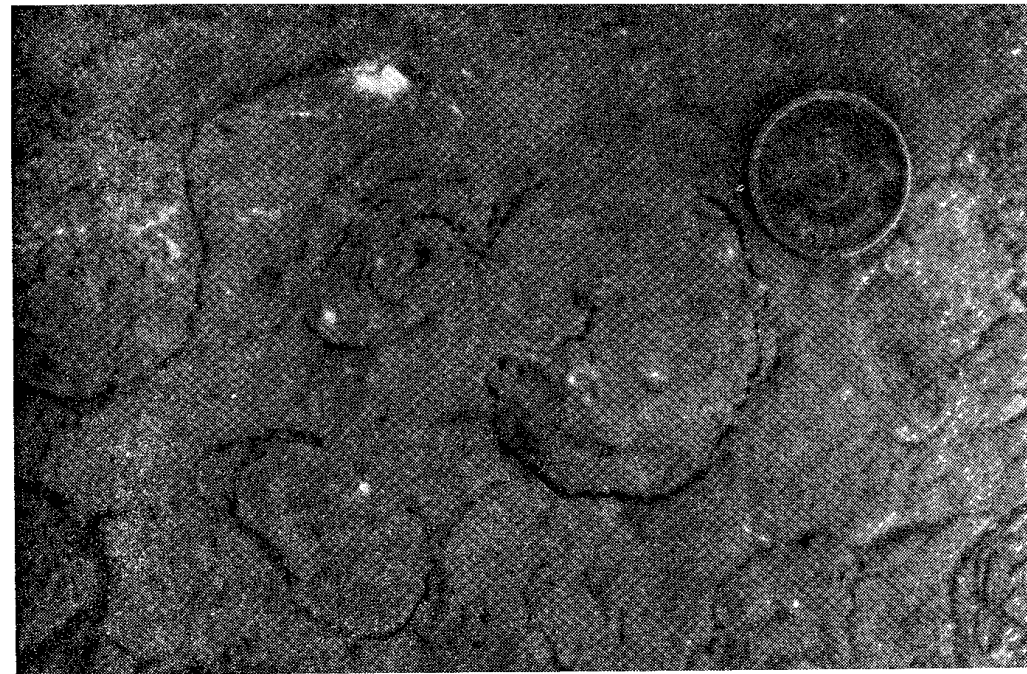


Фото 15. Плоскость напластования строматолитных образований докембрия Финляндии (см. фото 12). Видны очертания отдельных колоний строматолитов.

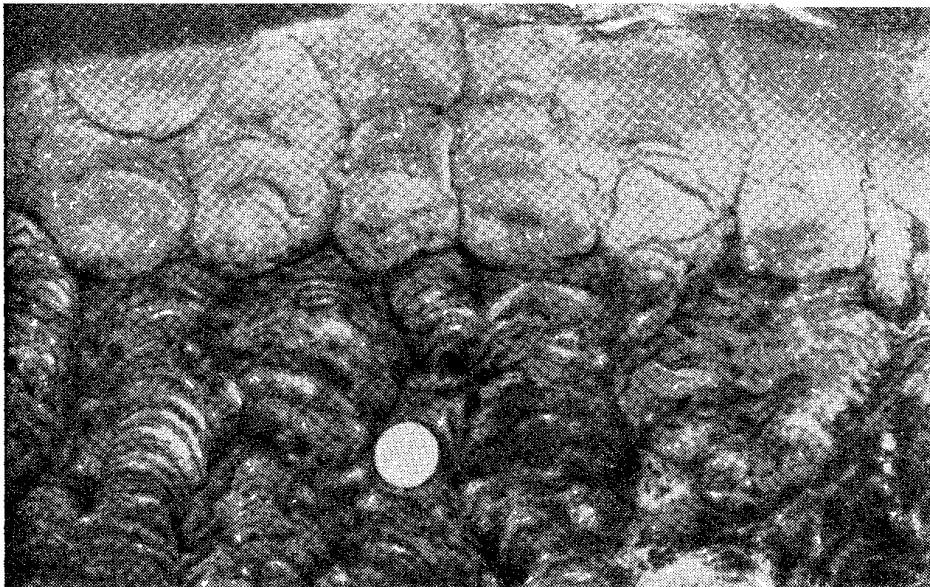


Фото 14. Участок строматолитных образований докембрия Финляндии (см. фото 12). Видны две серии слоев с разным строением, очевидно, образованные разными организмами.

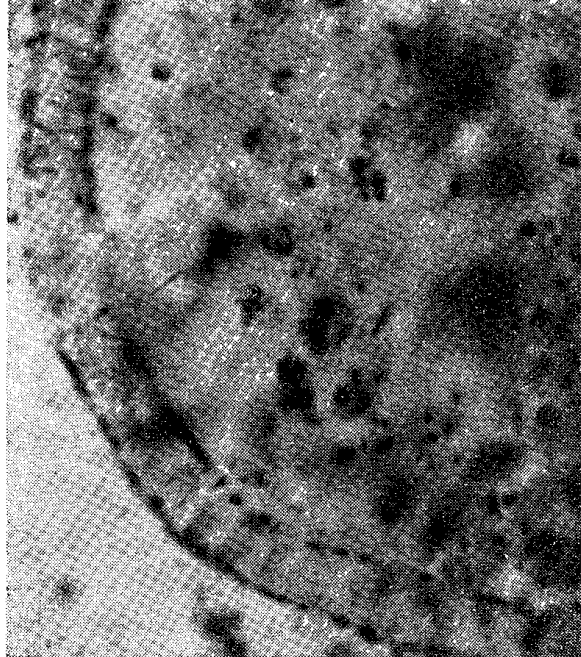


Фото 16. Образцы нитчатого ископаемого организма, названного Баргхоорном *Animikiea septata* ( $\times 1000$ ) (гл. XII, [6]). Формация Ганфлинт, Онтарио.

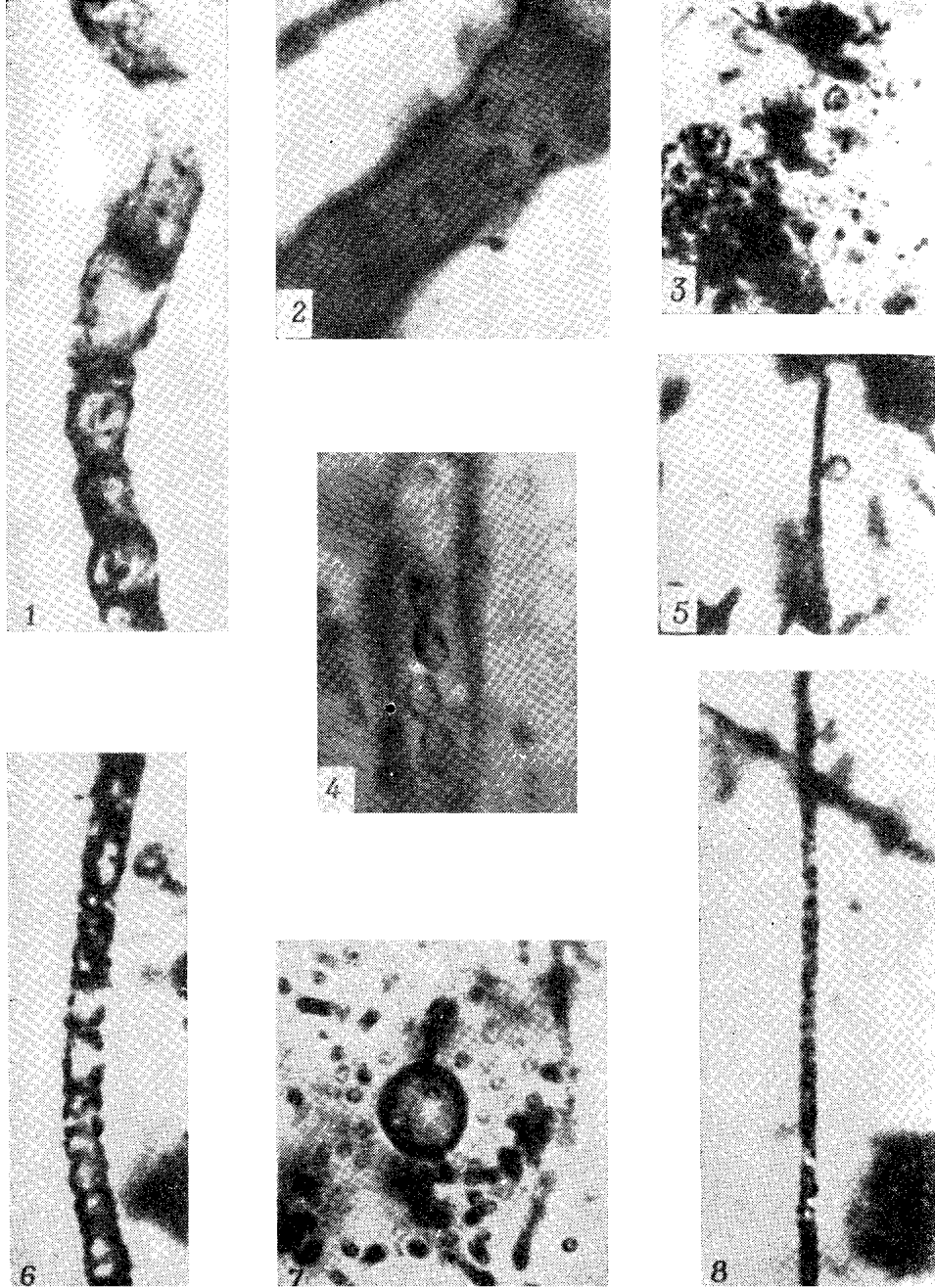


Фото 17. Нитчатые и другие микроскопические ископаемые из формации Ганфлинт ( $\times$  около 1500) [6]. 1, 4, 6 и 8 — различные нитчатые формы, имеющие внутренние перегородки. Баргхоорн объединяет их в новый род *Gunflintia*. Они явно отличаются и по внешней форме, и по размещению перегородок от *Animikiea*. Нитчатые формы без перегородок, называемые *Entosphaeroides*, содержат мелкие сферические тельца, которые можно найти и вне клеток, там, где клеточная стенка некогда разрушилась (2, 3 и 5). Наконец, 7 — образование, которое, как полагают, представляет собой спору (*Huroniospora*) (см. на обороте).

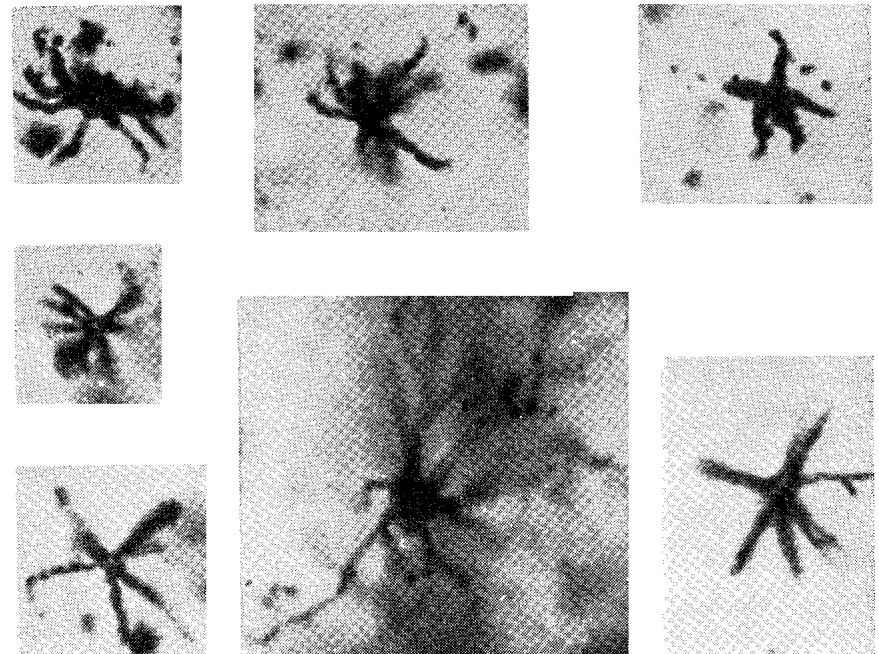
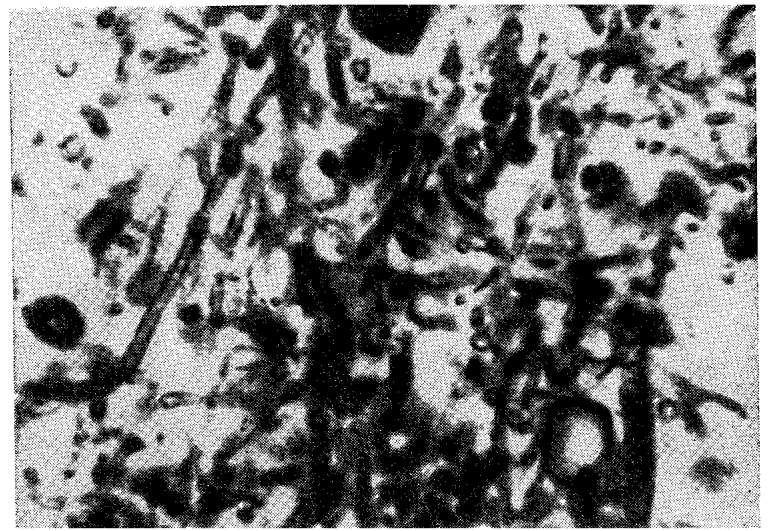


Фото 18. Типичное беспорядочное скопление нитей, главным образом *Gunflintia minuta* и спороподобных телец *Huroniospora* (гл. XII, [6]). Снимки ясно говорят об обилии микроископаемых в формации Ганфлинт, Онтарио.

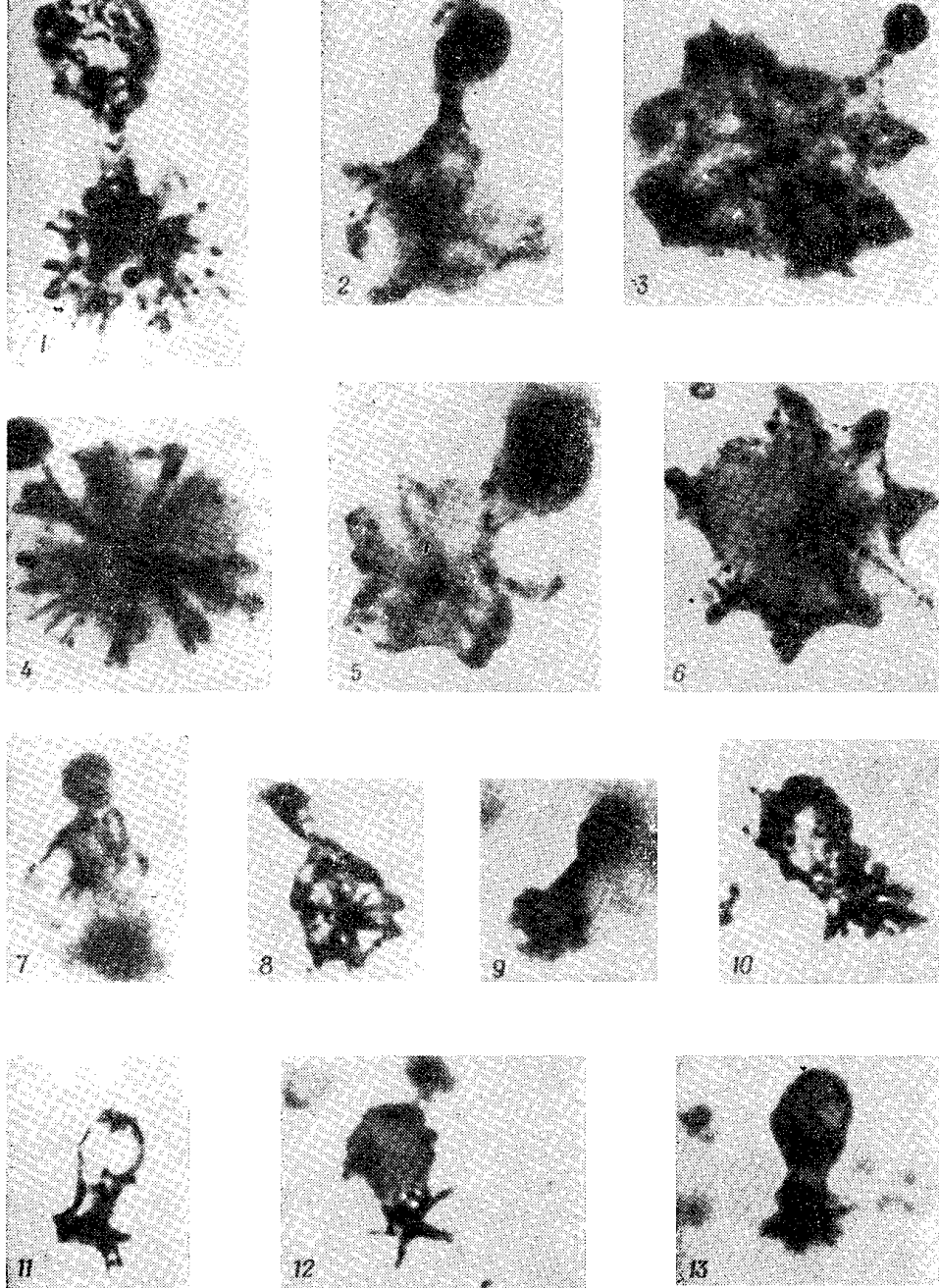


Фото 19. Различные экземпляры организма с неясным систематическим положением (гл. XII, [6]). Он не похож ни на один из известных сейчас живых или ископаемых видов. Найден вблизи Какабека-Фоллс, Онтарио, и поэтому получил родовое название *Kakebekia*. В строении организма можно выделить три части: грушевидную часть, ножку и структуру в виде зонтика, из-за которой он и получил свое видовое название — *umbellata*, что означает «зонтичная». Это название — чистая формальность, оно ничего не говорит о филогенетических связях организма. Полагают, что образцы 1—13 представляют собой разные стадии развития одного вида.

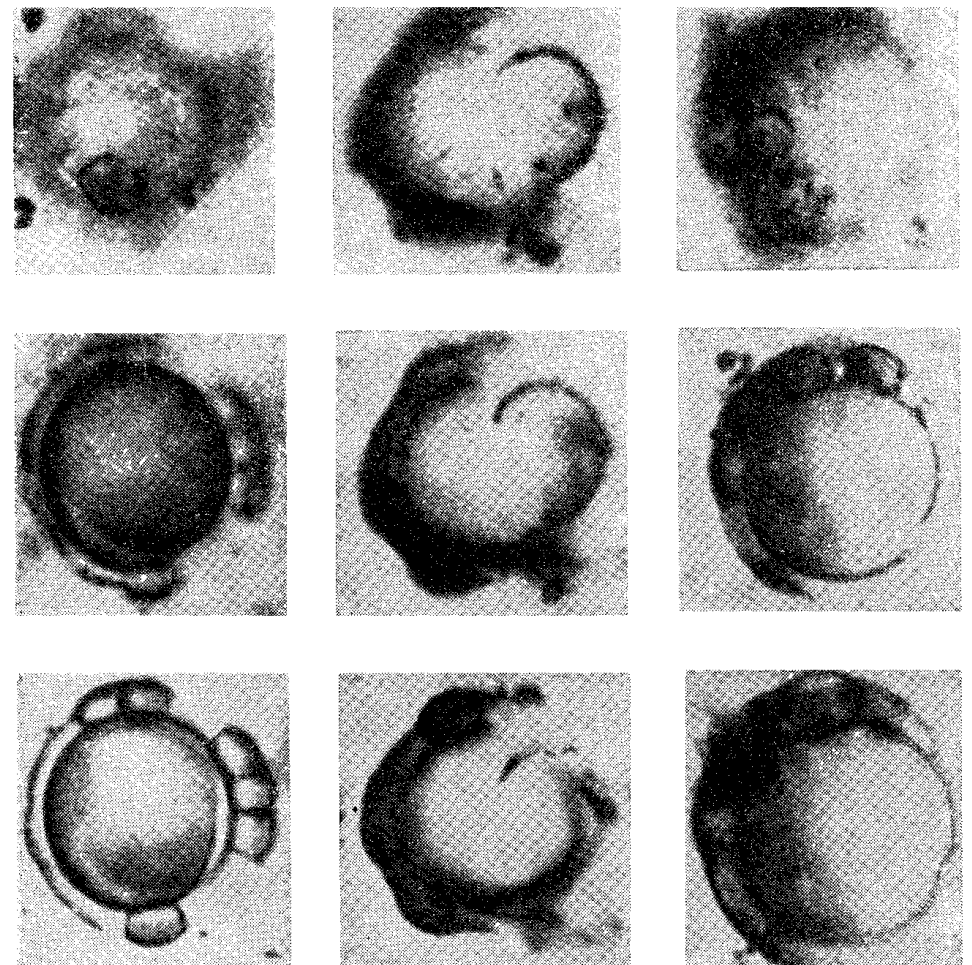


Фото 20. Три образца распространенного в формации Ганфлинг (Онтарио) сферического микроископаемого *Eosphaera tyleri* [6]. В каждом вертикальном ряду даны три снимка одной и той же особи, сделанные при разной фокусировке микроскопа. Снимки нижнего ряда сделаны при фокусировке на экваториальную плоскость сфер. Можно представить себе объемную морфологию организма. Это двойная сфера, между стенками которой лежат сферические бугорки, прикрепленные к внутренней стенке. Как и в случае рассмотренных выше сегментированных нитевидных ископаемых, столь сложная структура свидетельствует о том, что перед нами довольно высокоорганизованные существа.

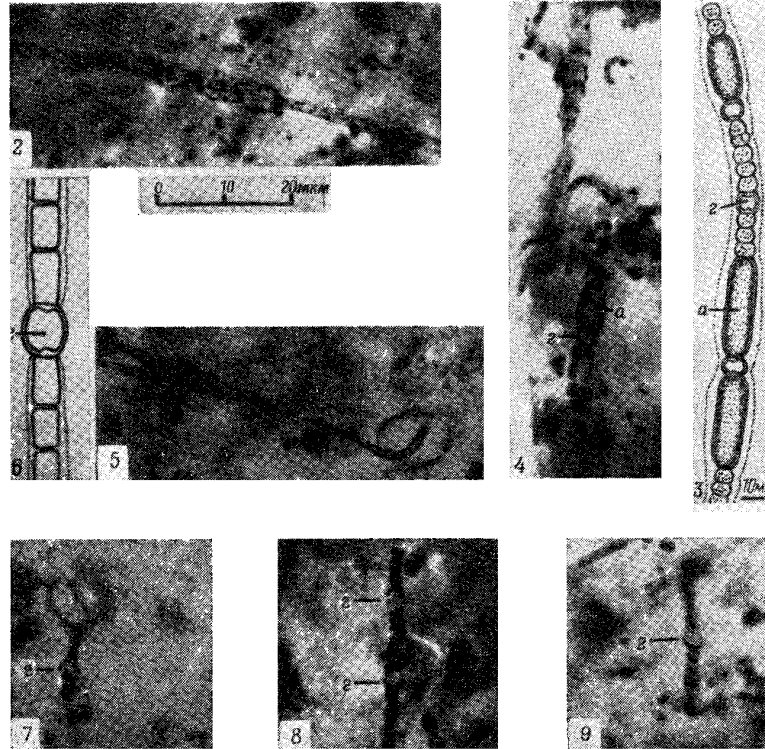
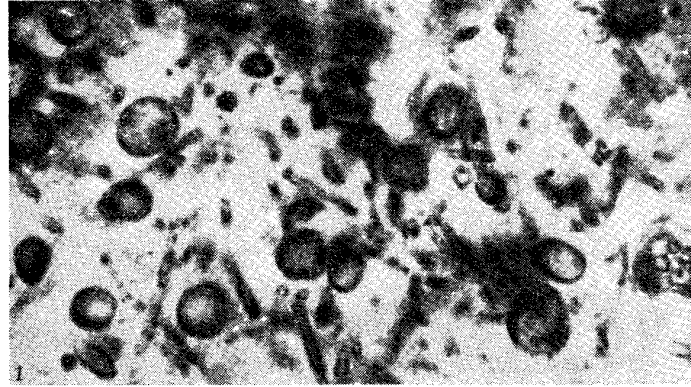


Фото 21. Микрофотографии ископаемой флоры Ганфлинт и рисунки современных сине-зеленых водорослей (гл. XII, [50]). Их сравнение подтверждает, что представители флоры формации Ганфлинт были способны к размножению. Масштабная линия 20 мкм относится к изображениям 1—4 и 7—9, а линия 10 мкм — к изображениям 6 и 7. 1 — микрофотография кремнистого сланца Ганфлинт; видны скопления телец *Huroniospora* и нитей *Gunflintia* (ср. с фото 18); 2, 3 — нити различной толщины; Баргхоорн принимает диаметр нити за таксономический критерий, выделяя два вида — *Gunflintia minuta* и *G. grandis*; авторы работы, из которой взята эта иллюстрация, считают, что различия в толщине объясняются тем, что у одного и того же вида на разных стадиях жизненного цикла могут образовываться клетки разного диаметра; 4 — выделяющиеся размером и формой клетки *Gunflintia*, которые могут рассматриваться как гетероцисты (z) и акинеты (a) (ср. с 5); 5 — рисунок, сделанный с живой водоросли *Anabaena oscillarioides* Borg с ее дифференцированными клетками: видны акинеты (a) и гетероцисты (z); 6 — гетероциста (z) трихома живой водоросли *Aulosira implexa* Bernet et Flahaut; 7—9 — *Gunflintia minuta* Barghoorn; указаны образования, интерпретируемые как гетероцисты.

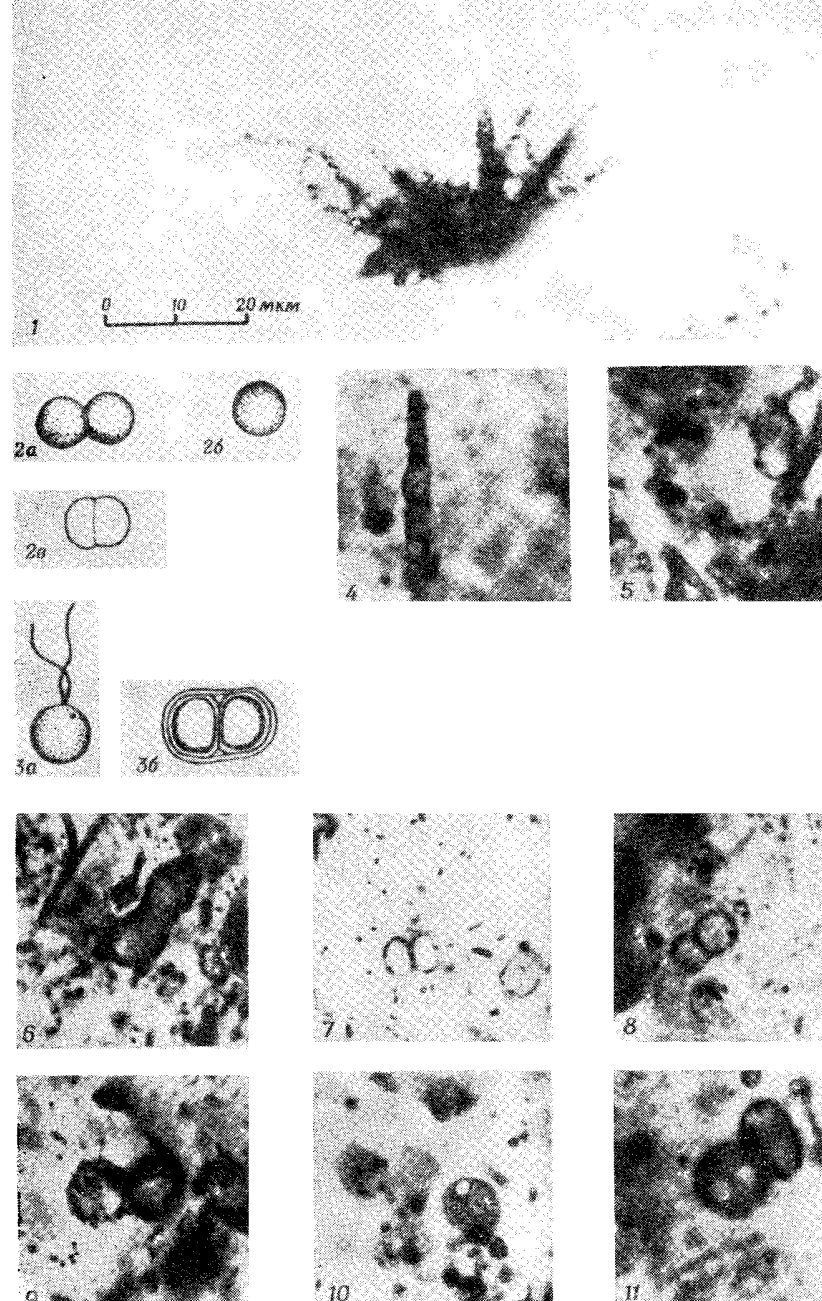


Фото 22. Микрофотографии ископаемой флоры Ганфлинт и рисунки современных организмов. Их сравнение подтверждает, что флора Ганфлинт была способна к размножению. 1 — микрофотография нитей *Gunflintia-lake*; возможно, это разрастающаяся колония; 2 — рисунок, сделанный с живой неподвижной сине-зеленой водоросли *Synechocystis sallensis* Skuja (а и б — вегетативное размножение; б — отдельная клетка); 3 — современная динофлагеллята *Desmocapsa geltatinosa* Pascher (а — зооспора, б — клеточное деление); 4 — дифференцированные клетки на конце нити *Gunflintia grandis* Barghoorn; 5—9 — двойные клетки *Huroniospora* (возможно, стадии вегетативного размножения); 10, 11 — поры в оболочке *Huroniospora*.

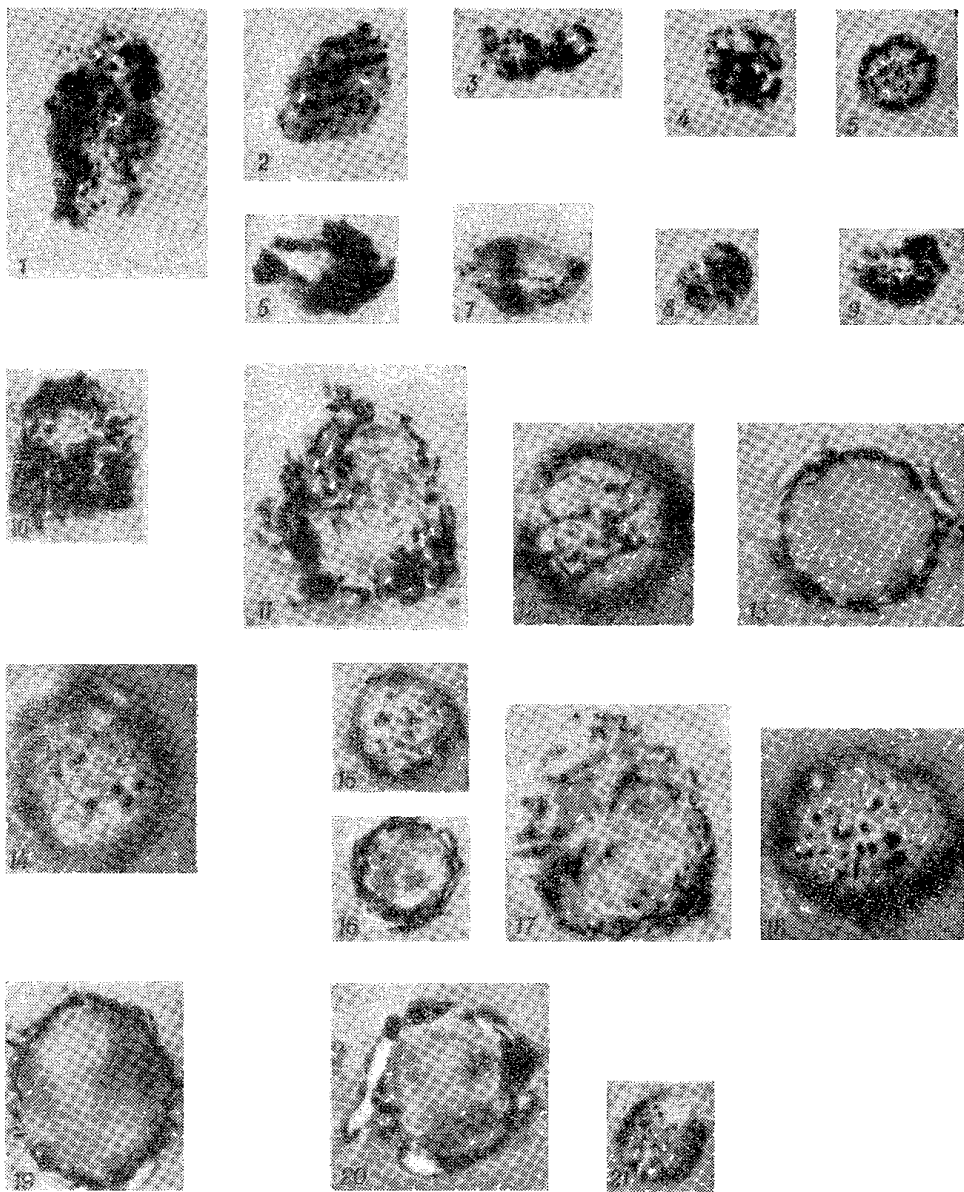


Фото 23. Глобулярные образования из формации Фиг-Три (ранний докембрий, Южная Африка) (гл. XII, [68]). 1—10 — глобулярные образования типа  $A_3$  ( $\times \sim 425$ ). 11 — глобулярное образование типа  $A_3$  ( $\times \sim 1100$ ). 12—16 — глобулярные образования типа В ( $\times \sim 1100$ ). 17 — глобулярное образование типа  $A_3$  ( $\times \sim 1100$ ). 18—20 — глобулярные образования типа В ( $\times \sim 1100$ ). 21 — глобулярное образование типа В ( $\times \sim 25$ ). Подобные структуры описаны Шопфом и Баргхоорном (гл. XII, [77]). Эти авторы не приняли во внимание мелкие различия, отмеченные Пфлюгом, и объединили все эти образования в новый род и вид *Archaeosphaeroides barbertonensis*.

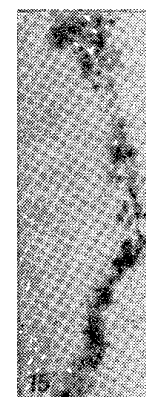
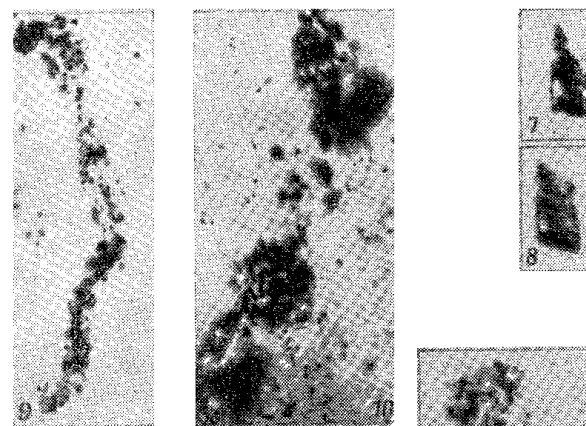


Фото 24. Нитчатые образования из формации Фиг-Три (ранний докембрий, Южная Африка). 1—11 — нитчатые образования разных типов ( $\times \sim 375$ ); 12 — колония глобулярных образований типа  $A_2$  ( $\times \sim 150$ ); 13—15 — нитчатые образования разных типов ( $\times \sim 375$ ).



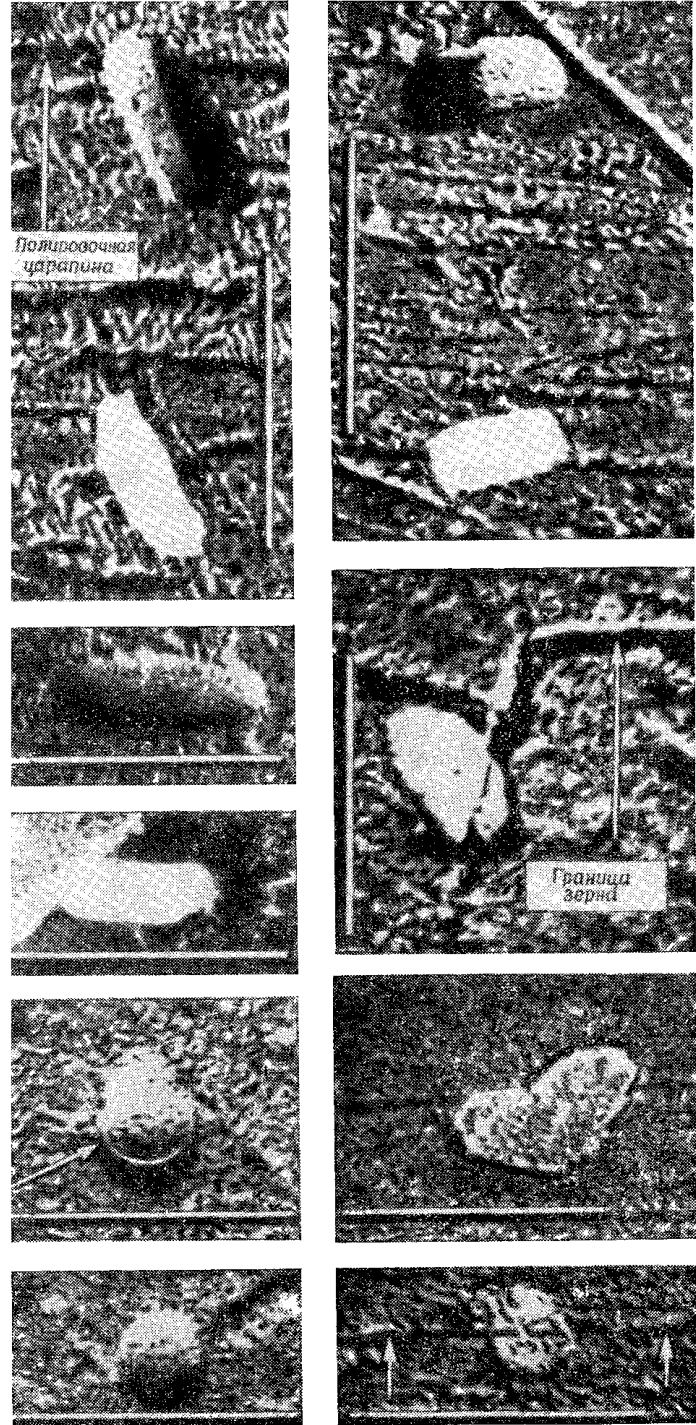


Фото 25. Негативы электронных микрофотографий углеродных реплик сланца Фиг-Три, полученных после отщепления платиной (гл. XII, [5]). Видны мелкие палочковидные образования, представляющие собой, по мнению авторов, ископаемые бактерии *Eobacterium isolatum* — новый род и вид. Масштабная линия 1 мкм.

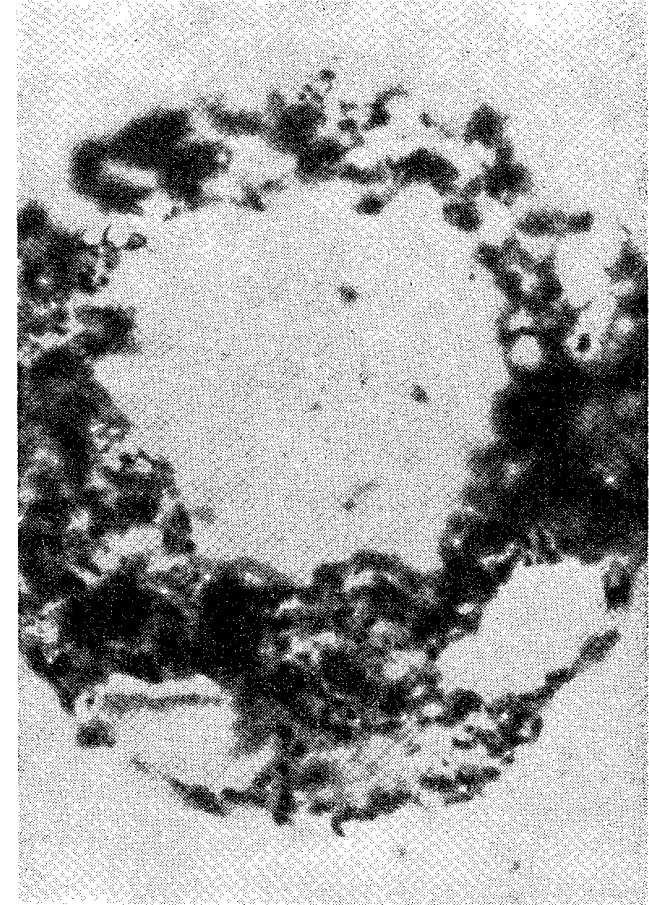


Фото 26. Организованный элемент углистого вещества из серии Онвервайт, Южная Африка (гл. XII, [26]). Диаметр структуры 106 мкм. Пока мы не уверены, является ли это образование настоящим ископаемым остатком; во всяком случае, это древнейшее из известных «ископаемоподобных» образований.

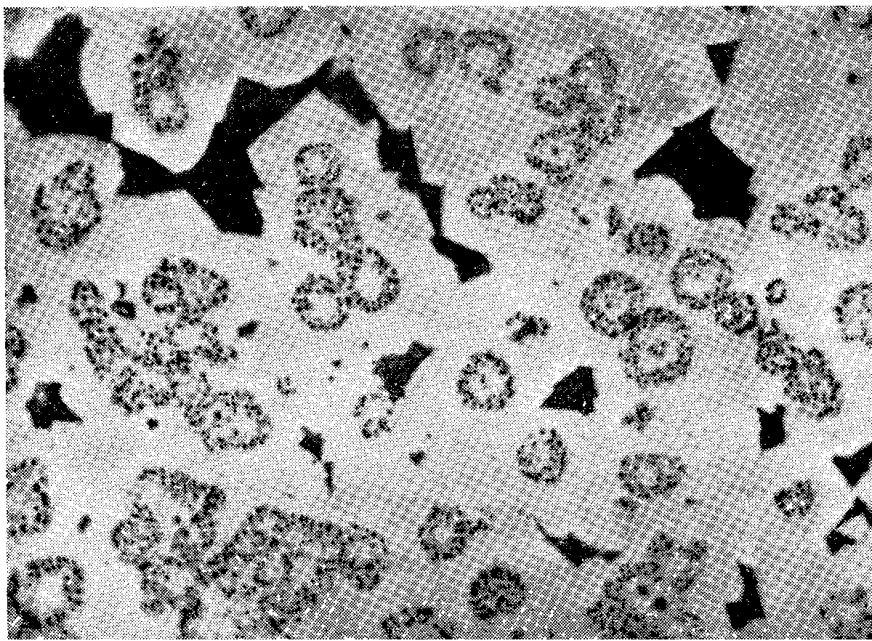


Фото 28. Шлиф докембрийского филлита, слабометаморфизованного глинистого осадка. Видны два экземпляра *Coruscium enigmaticum* Sederholm, Миллинемы, Айтолакти, в 7 км к северо-востоку от Тампере, Финляндия.

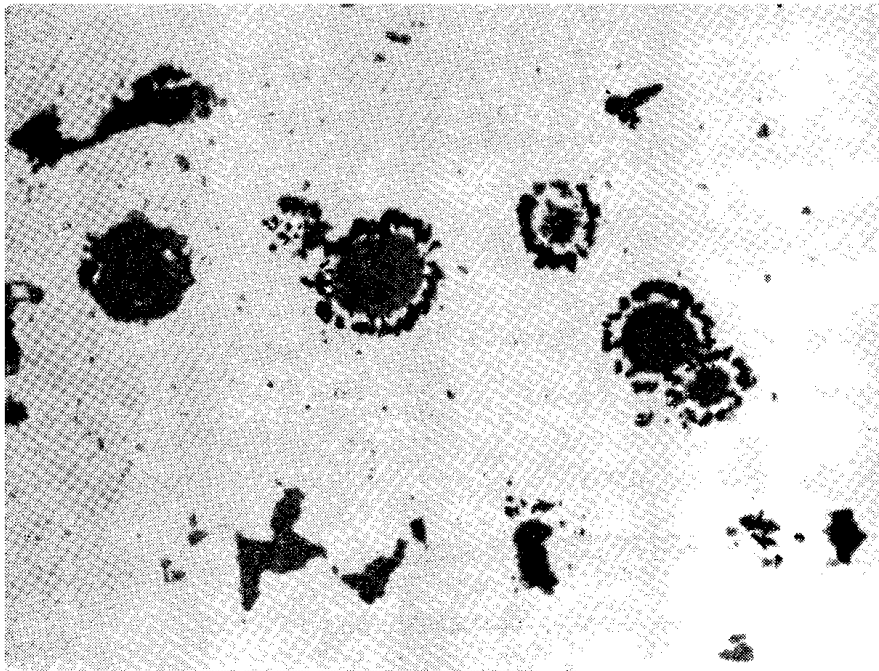


Фото 27. Организованные элементы из системы Витватерсранд, Южная Африка ( $\times \sim 1150$ ) (гл. XII, [74, 75]). Шлифы сфотографированы в отраженном свете.



Фото 29. Гуронский песчаник (средний докембрий, вблизи озера Эллиот, Онтарио, Канада), содержащий веретена псевдоископаемого *Rhysonetron*.

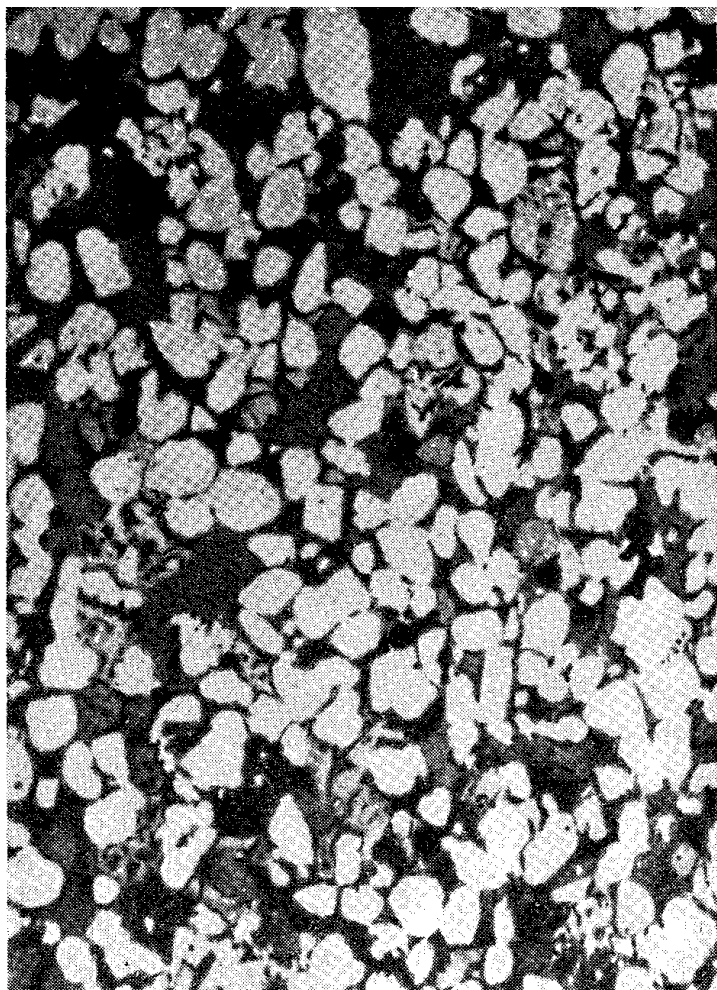


Фото 30. Микрофотография древнего песчаника (возраст более 2 млрд. лет) из системы Витватерсранд, Южная Африка ( $\times 70$ ) (гл. XIII, [21]). Зерна пирита белые, зерна разных окислов — серые, зерна кварца — черные.

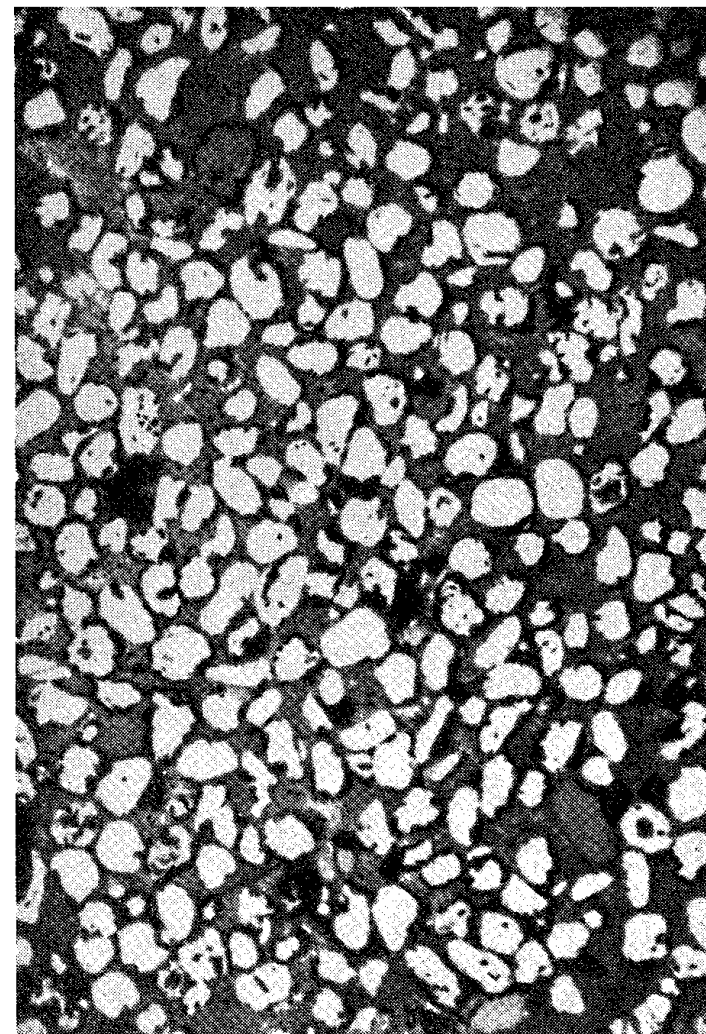


Фото 31. Микрофотография современного песка с побережья Аргентины ( $\times 45$ ) (гл. XIII, [21]). Зерна магнетита — белые, зерна кварца — серые. Сравните со структурой древнего пиритового песчаника (фото 30).

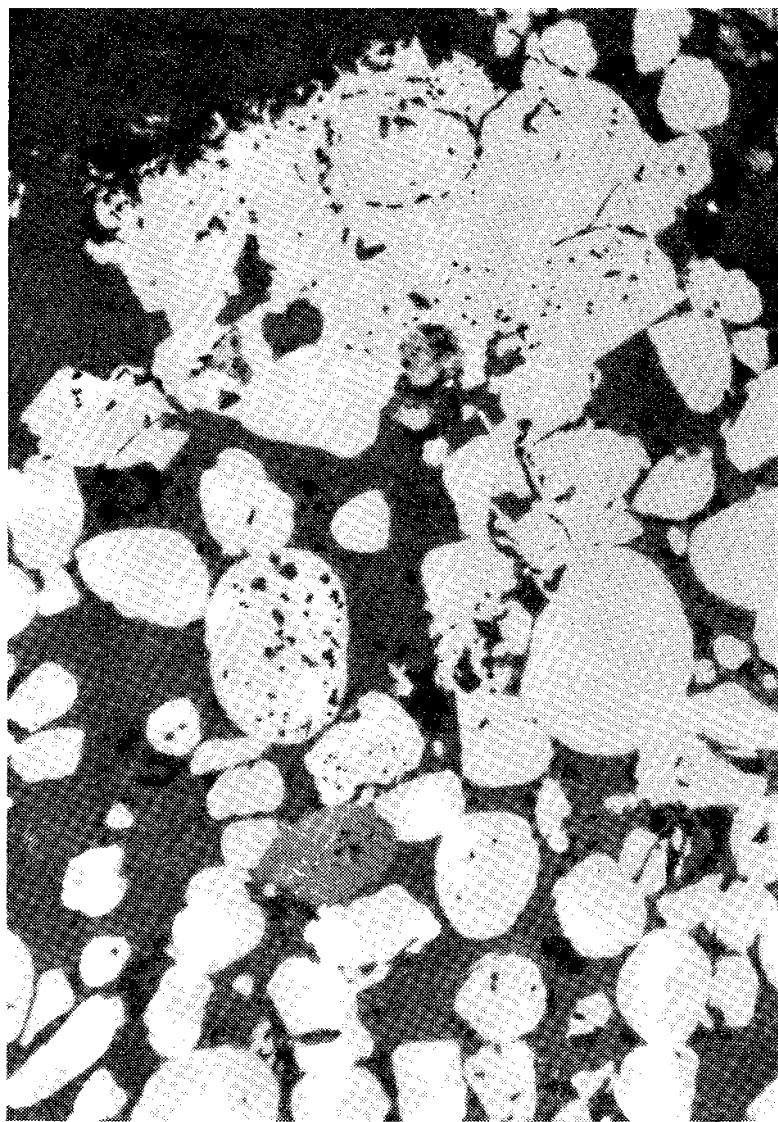


Фото 32. Микрофотография докеембрийского пиритово-кварцевого песка из системы Витватерсранд, Южная Африка ( $\times 45$ ) (гл. XIII, [21]). Зерна пирита — белые, зерна кварца — темные. Вверху — обломок перетолженного более древнего пиритового песка. В этом древнем песчанике еще различимы округлые очертания зерен пирита.

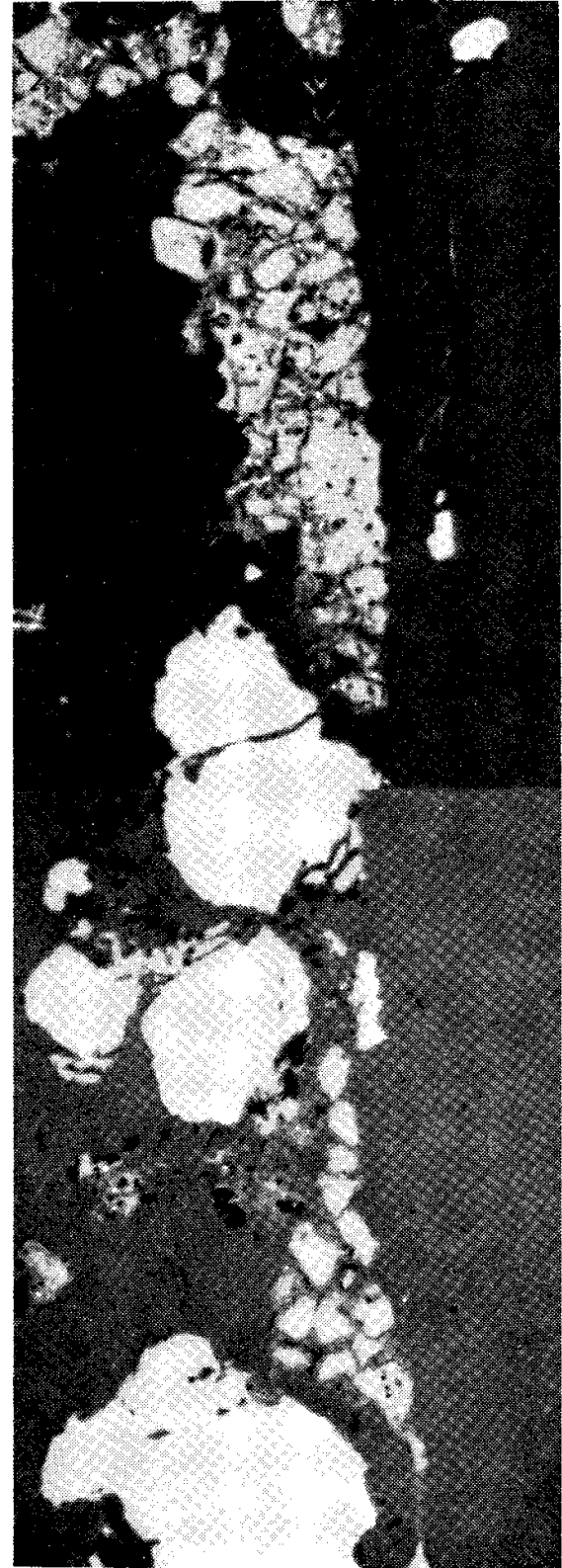


Фото 33. Микрофотография осадочного ритма (кварц — пирит)/(кварц — урановая смолка) в докеембрийском песчанике Блайнд-Ривер, Канада ( $\times 22,5$ ) (гл. XIII, [21]). Кварц — черный, границы отдельных зерен на фотографии не видны; пирит — белый; мелкие зерна урановой смолки — серые.

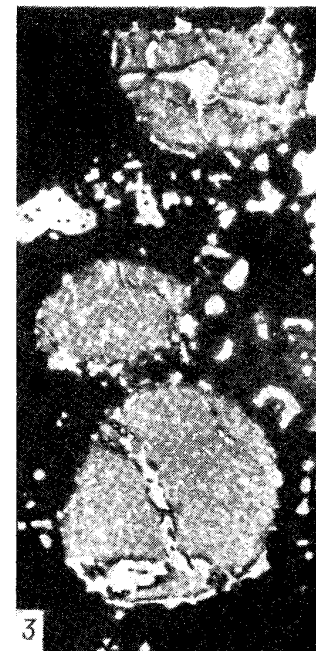
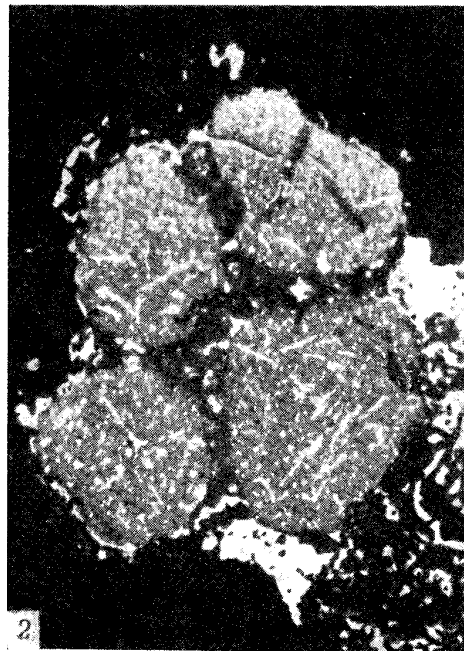
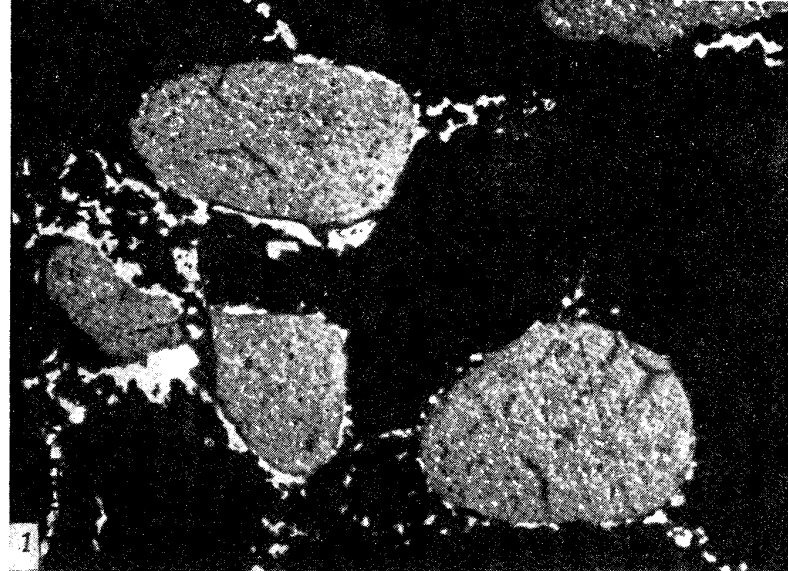


Фото 34. Зерна уранинита (1—3) с округлыми очертаниями, характерными для обломочного материала, переносившегося реками или силой прилива в озерах и морях. Риф Бейзел, система Витватерсранд ( $\times 315$ ) (гл. XIII, [28]). Основная масса кварца показана черным, уранинит — серым, PbS — белым. Этот свинец имеет радиогенное происхождение, он образовался в результате распада атомов урана, соединился с серой и был отложен в микроскопических пустотах и трещинах исходного минерала. Сравнив количества уранинита и свинцового блеска, можно получить приблизительное значение абсолютного возраста последнего метаморфизма, которому подвергалось зерно и при котором терялся свинец (гл. XIII, [22]). Как правило, получаемые этим способом оценки значительно выше 2,15 млрд. лет — принятый возраст системы Витватерсранд. Очевидно, в зернах уранинита какая-то доля радиогенного свинца имела уже во время цикла выветривание — эрозия — перенос — седиментация, в ходе которого возникли осадочные отложения системы Витватерсранд.

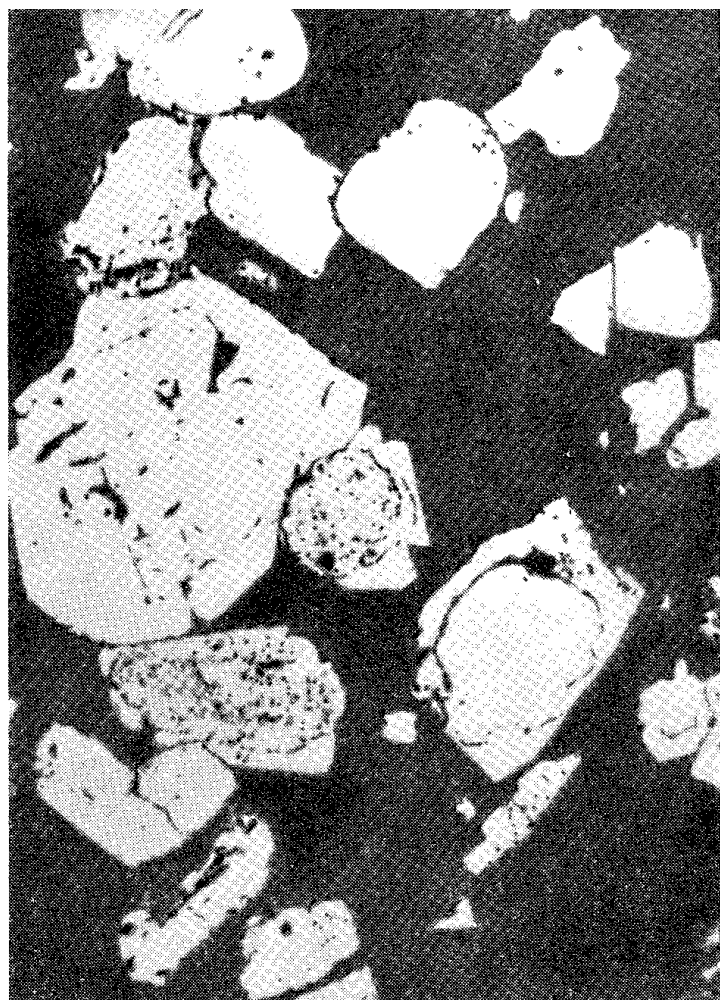


Фото 35. Микрофотография зерен пирита и кварца в докембрийском песчанике системы Витватерсранд, Южная Африка ( $\times 70$ ). Вначале зерна пирита были округлыми, но затем на них кристаллизовался пирит, образовавшийся после отложения песков, так что исходная округленность кластических зерен оказалась скрытой.



Фото 36. Микрофотография округлого зерна пирита, окруженного более молодыми наростами, обычно повторяющими форму кристаллов пирита (гл. XIII, [15]); Витватерсранд, Южная Африка ( $\times 100$ ).

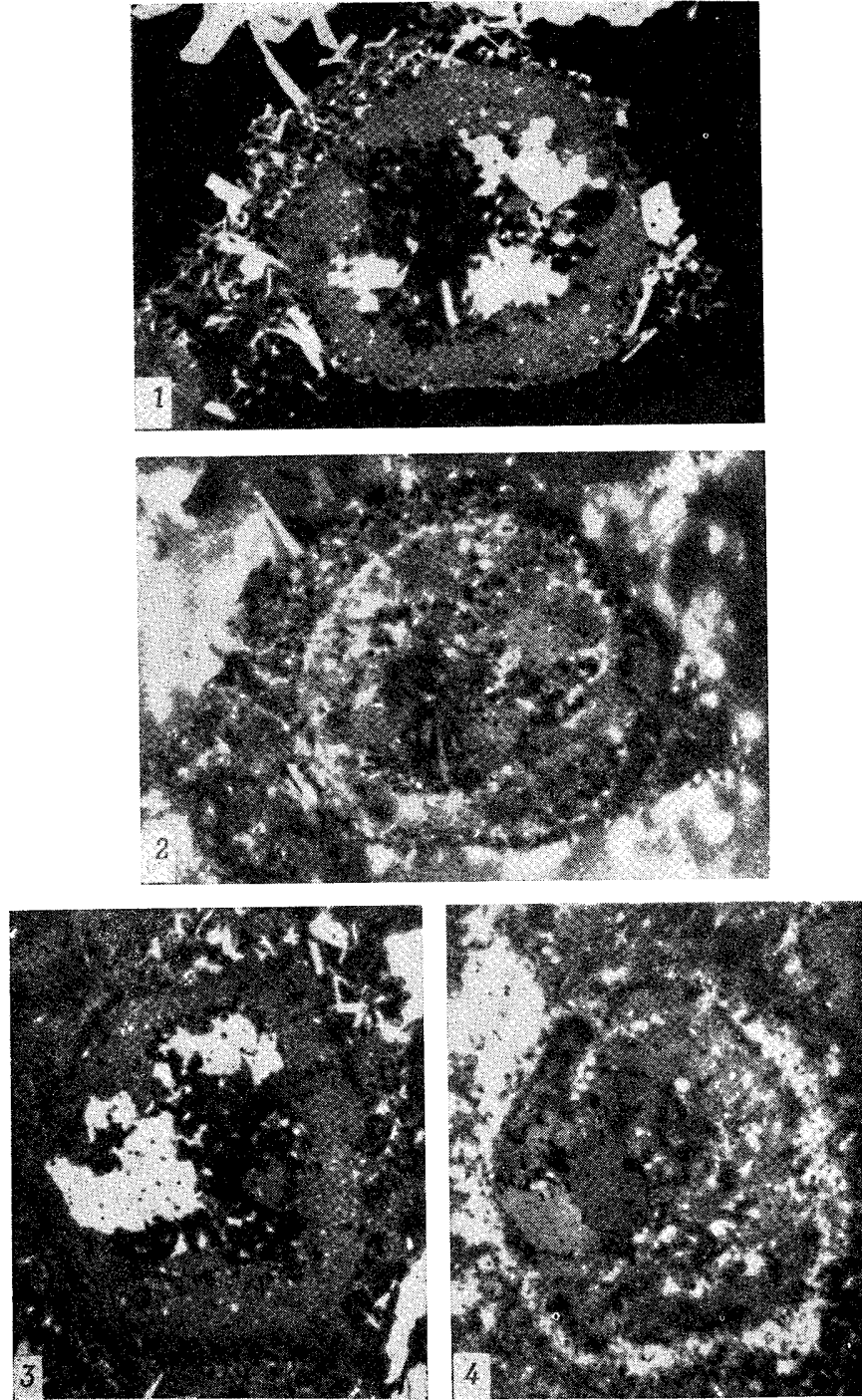


Фото 37. Кластические зерна уранинита, в которых уранинит позже соединился с титаном, образовав браннерит ( $UTi_2O_6$ ) (1—4) ( $\times 315$ ). (гл. XIII, [29]). Округлые очертания исходных зерен уранинита сохранились, но внутреннее их строение полностью изменилось. Немецкие геологи называют эти «тени» зерен уранинита „Uranpecherzgeistern“ — «призраки урановой смолки».

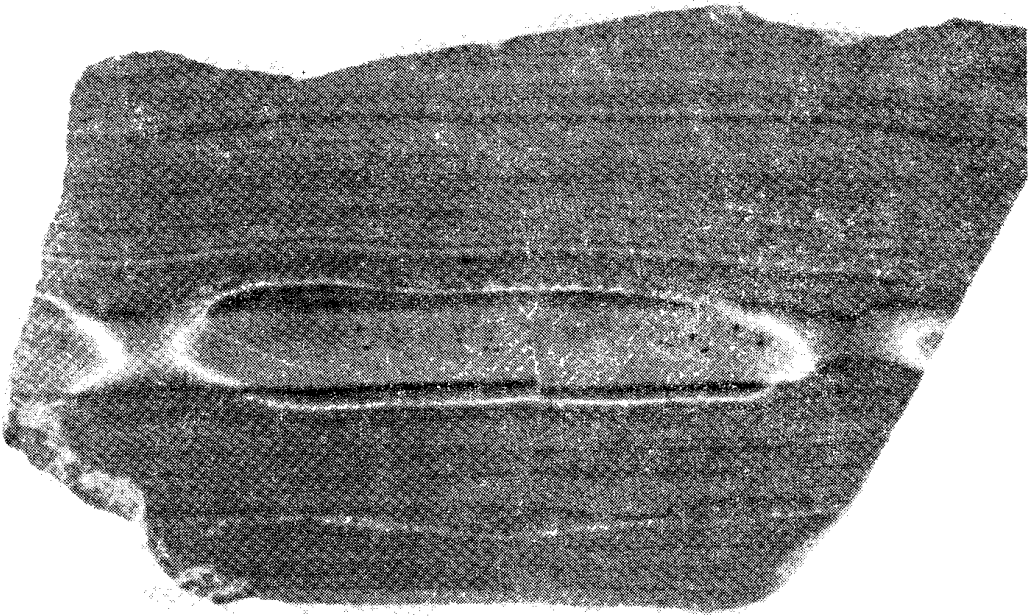


Фото 38. Полированная плитка породы из докембрийской полосчатой железорудной формации вблизи Ишлеминг, на севере штата Мичиган. Очень тонкие прослойки, заметные простым глазом в таких тонкозернистых сланцевых породах, возможно, возникли в результате сезонных изменений процесса седиментации. Более толстый пласт в середине — песчанистая порода. Беловатые прожилки образовались при замещениях, происходивших позднее.

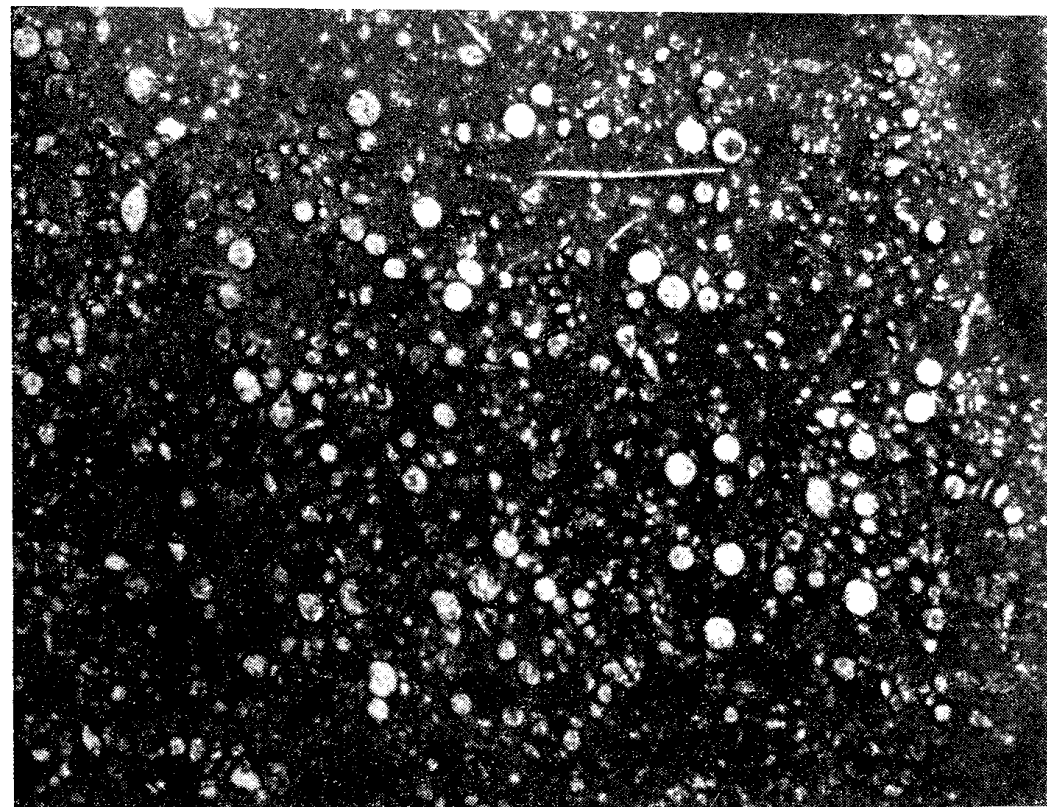


Фото 40. Фотография ископаемых радиолярий из мезозойских пород Кюрасао. От лучей ничего не осталось, видны только раковинки с их радиальным строением. При дальнейшей силицификации разрушится и это строение и радиолярии будут выглядеть как прозрачные шарики кремнезема. На фотографии, сделанной в поляризованном свете, видно, что клетка внутри заполнена неправильными срастаниями новообразованных кристаллов кварца, по-разному затемненных из-за их разной ориентации.

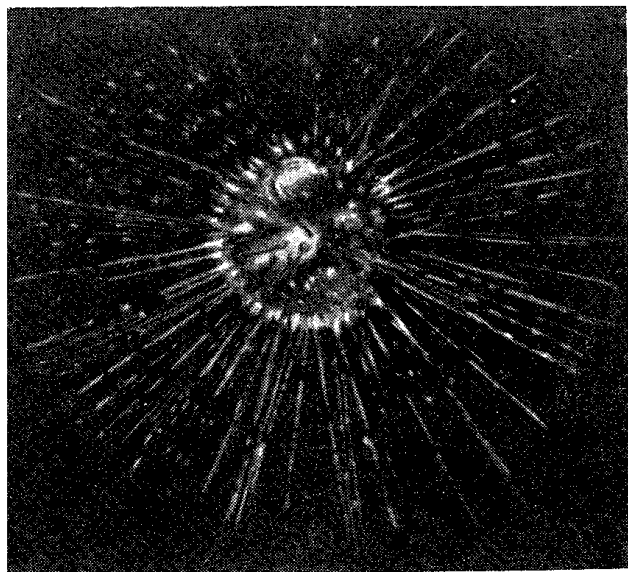


Фото 39. Фотография живой радиолярии. Видны иглоподобные лучи, торчащие во все стороны из центральной круглой раковины ( $\times 250$ ).



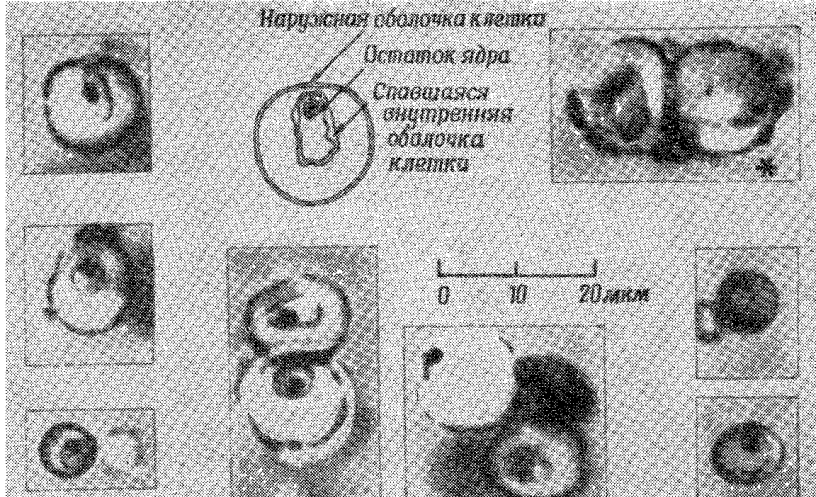


Фото 41. Фоссилизированные микроорганизмы *Caryosphaeroides pristina* из австралийской формации Биттер-Спрингс [41]. В клетках ясно различимы остатки внутриклеточных структур. Их можно интерпретировать как остатки ядра и внутренней клеточной оболочки. Значит, организмы эти были эукариотическими.

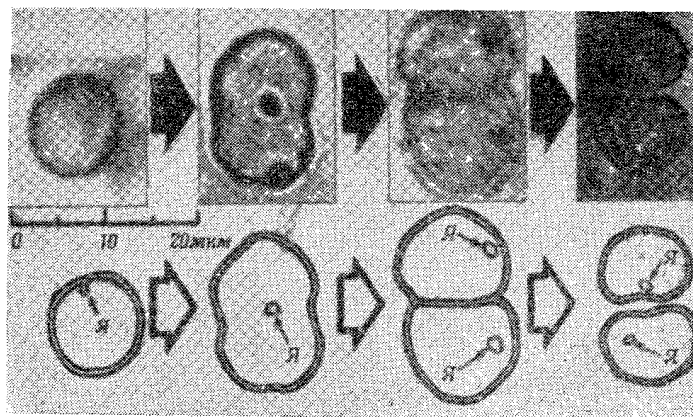


Фото 42. Клетки фоссилизованного микроорганизма *Glenobotrydion aenigmaticus* из австралийской формации Биттер-Спрингс (гл. XIV, [42]). Можно различить темное пятно — возможно, остаток ядра. Видно, что форма и положение пятна могут быть различными. Разные формы этого вида можно расположить в последовательности, напоминающей последовательные стадии митотического деления эукариотических клеток.

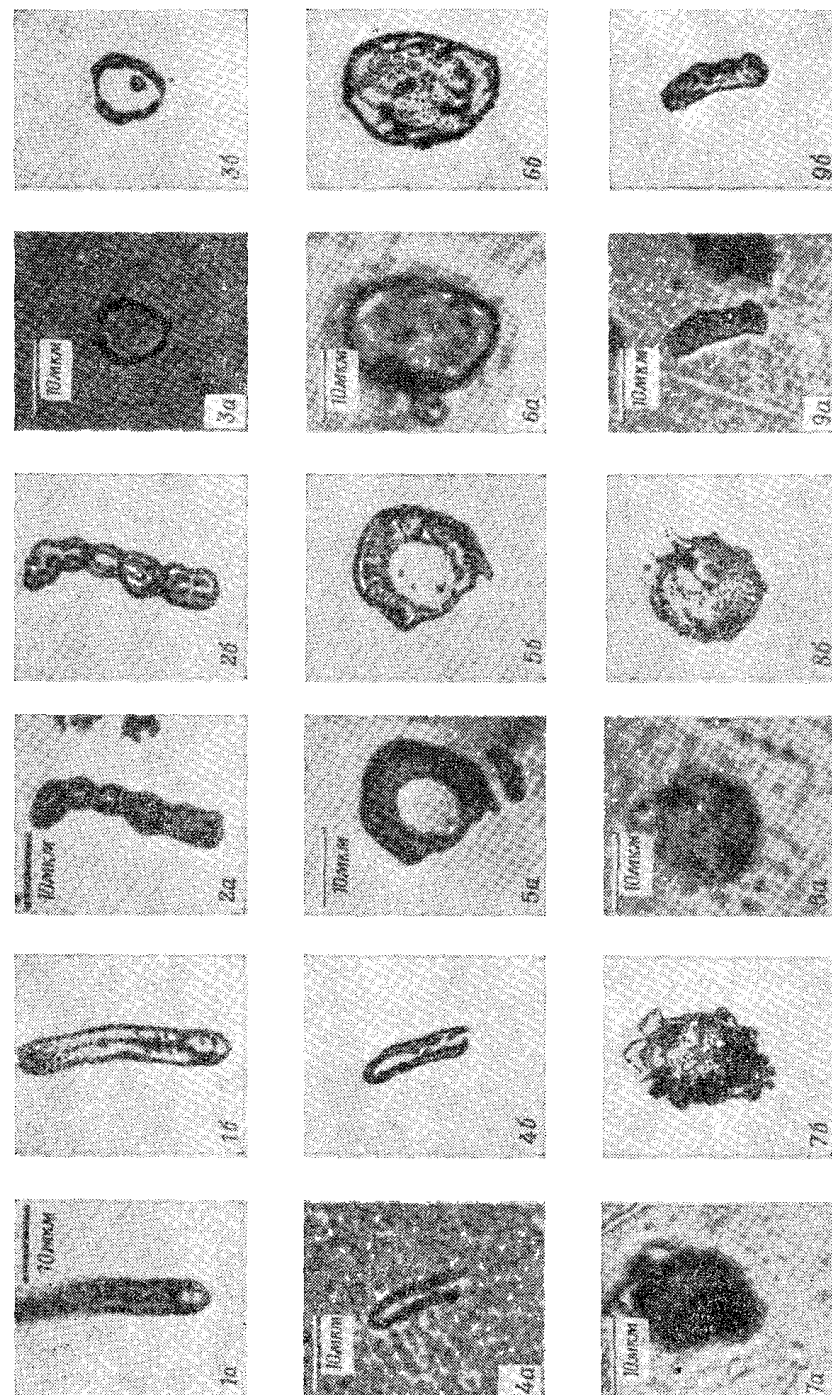


Фото 43. Микрофотографии (а) и рисунки (б) «организованных элементов» из метеорита Orgueil (гл. XV, [32, 33]). Рисунки сделаны человеком, не видевшим фотогафий. С помощью сканирования электронным микроскопом показано, что образования 1, 2, 3, 4, 5 и 9 частично минерализованы железом в некотором количестве хлора. В образовании 6 содержатся железо и никель, а образцы 7 и 8 состоят из силиката магния.

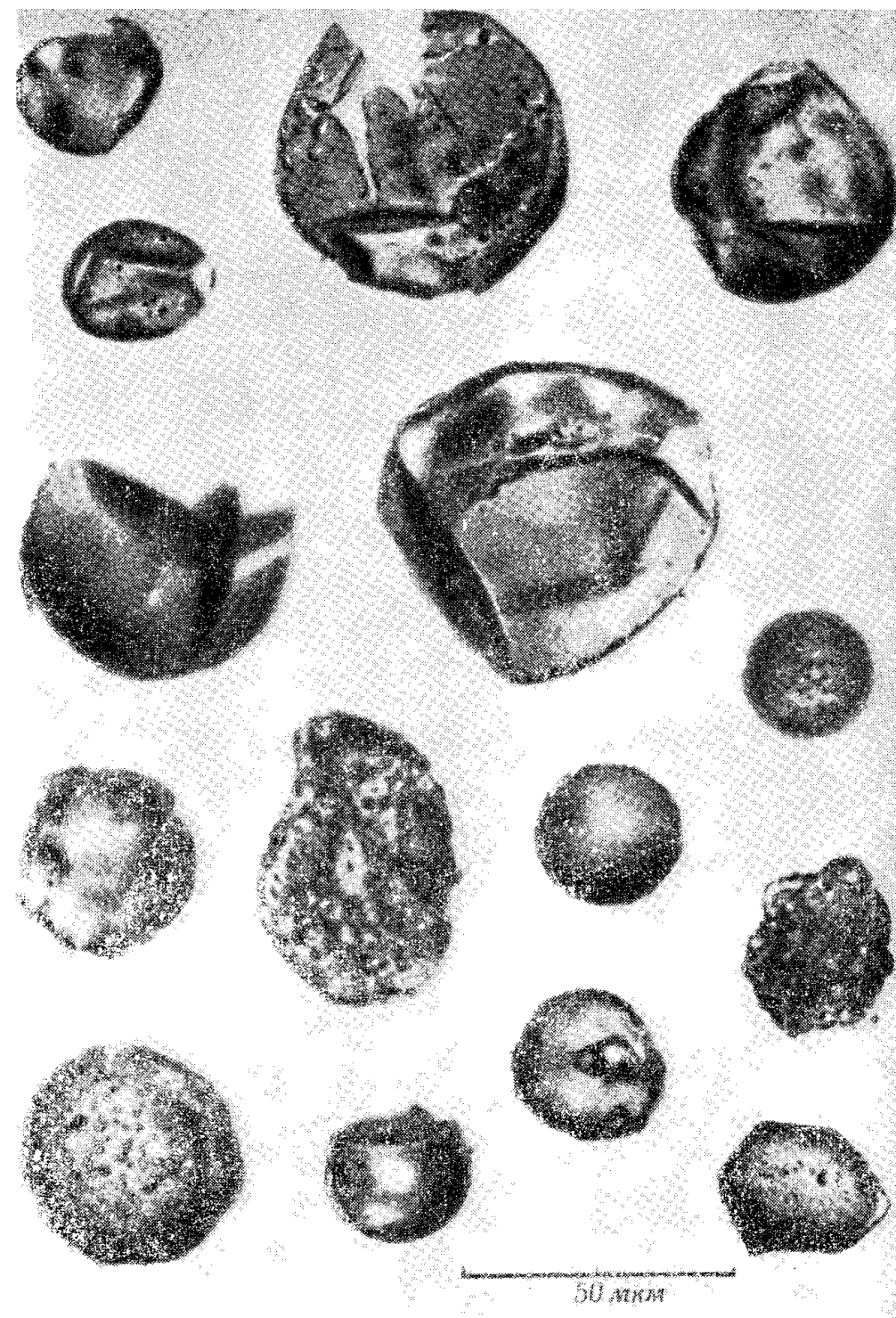


Фото 44. Микрофотографии «организованных элементов» из метеорита Mighei.

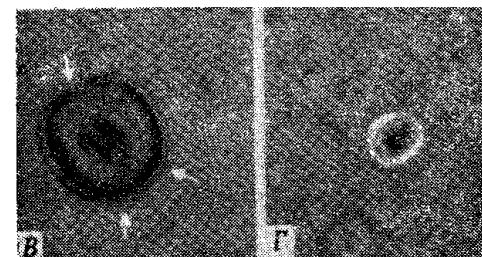
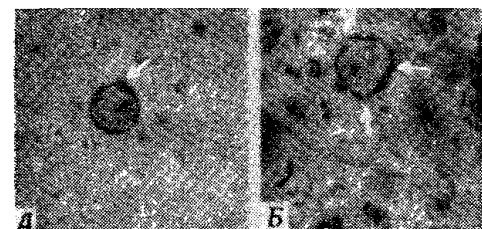


Фото 45. «Организованные элементы» метеорита Orgueil. Обозначения: А—В — «организованные элементы», выделенные из размолотой в порошок пробы; Г — «организованный элемент» на тонком шлифе. Снято при фазовом контрасте.

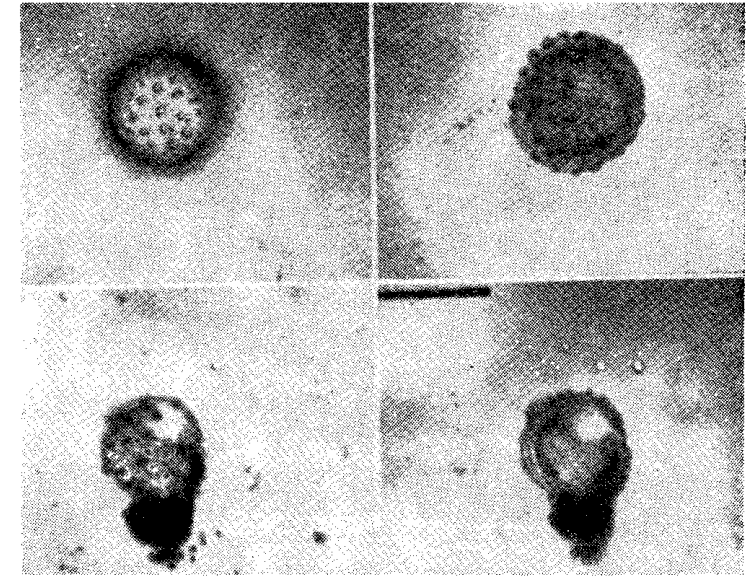
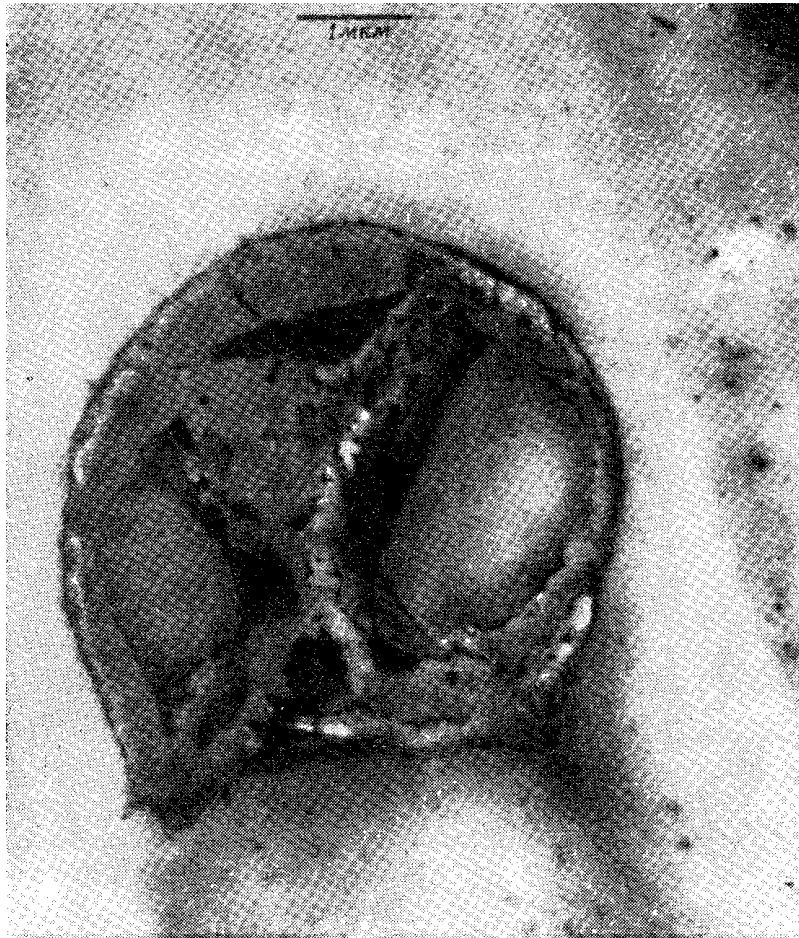


Фото 46. Электронная микрофотография микроструктуры ультратонкого шлифа метеорита Orgueil (гл. XVII, [29]). Перед приготовлением препарата пробу в течение 1 ч кипятили в 6 н. растворе HCl. Объекты, сфотографированные через электронный микроскоп, труднее идентифицировать, чем те, которые сделаны с помощью светового микроскопа (см. фото 43 и 45). Может быть, здесь перед нами «организованный элемент», но возможно, что это какой-то устойчивый к кислоте земной микроскопический объект или даже артефакт, возникший в процессе обработки препарата. На эту возможность указывает Надь в своей работе (гл. XVII, [29]).

Фото 47. Сравнение «организованного элемента» из метеорита Orgueil (вверху) с пылью *Ambrosia* ( $\times 720$ ) (гл. XVII, [13]). В каждой паре фотографии, сделанные с одного объекта, различаются фокусировкой микроскопа. Кажущееся сходство между этими двумя образованиями обусловлено нечеткостью изображения при таком увеличении, но этот недостаток присущ даже лучшим микрофотографиям. Непосредственное изучение под микроскопом показывает, что объекты явно различаются.

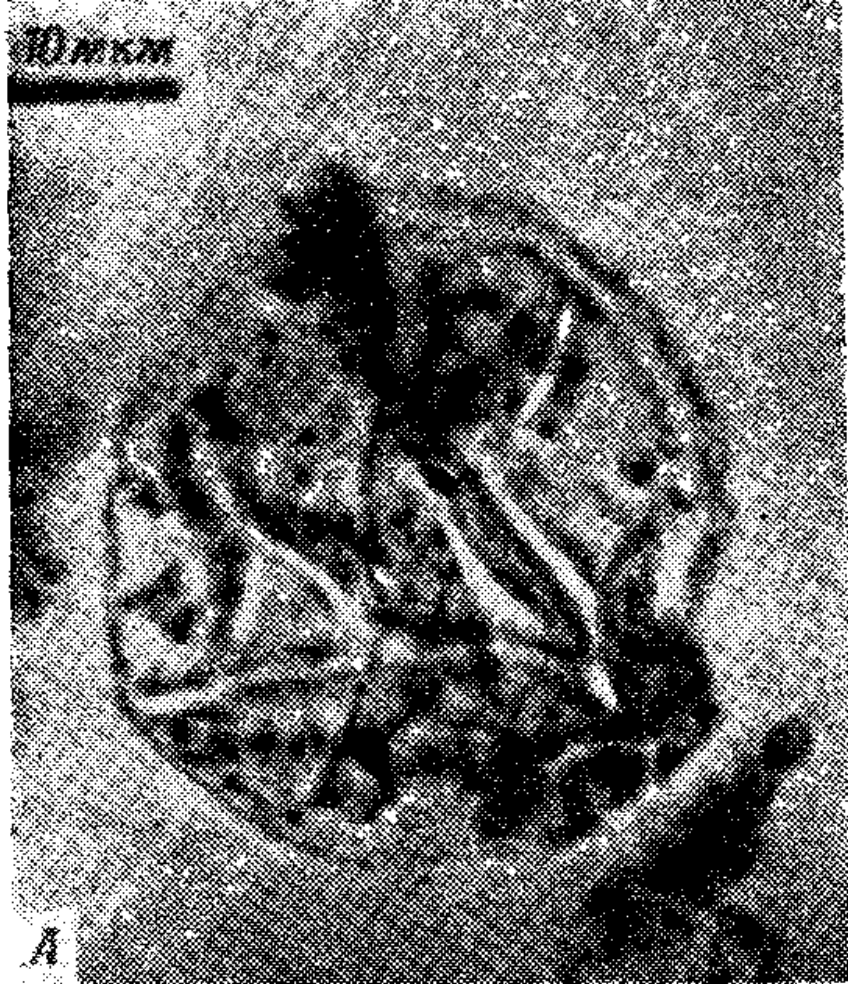


Фото 48. «Организованный элемент» из метеорита Orgueil (А) и ископаемый земной организм, динофлагеллята (В). Между ними есть некоторое сходство, только следует учесть, что «организованный элемент» увеличен в четыре раза сильнее, чем динофлагеллята. К тому же ультрамикроспектр «организованного элемента» не похож на спектры современного биологического материала. Значит, сходство здесь лишь чисто внешнее. «Организованный элемент» входит в состав метеорита, а не занесен в метеорит на Земле.