

Л. Дж. Баттан

**ЧЕЛОВЕК
БУДЕТ
ИЗМЕНЯТЬ
ПОГОДУ**



**ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД
1965**

NEW YORK
1962

Перевод с английского
И. М. БЕККЕРМАНА и Л. В. САМСОНЕНКО
Ответственный редактор
Л. Л. РУППЕРТ

Автор ряда популярных книг по метеорологии, американский ученый Л. Дж. Баттан известен как исследователь облаков. В своей книге, посвященной природе облаков и научным основам воздействия на них, Баттан, обращаясь к повседневному опыту каждого человека, в живой и непосредственной манере рассказывает о возникновениях и видах облаков, образовании снега и льда, искусственном вызывании дождя, теориях градообразования, вероятности градобитий и возможности их предупреждения. Эти проблемы привлекают сейчас большое внимание и в Советском Союзе. Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся метеорологией.

ОТ РЕДАКТОРА

Количество районов на земном шаре, ощущающих большую или меньшую нехватку пресной воды, непрерывно возрастает. Это является естественным следствием развития человеческого общества, роста населения, сопровождающегося освоением земель, требующих искусственного орошения, и быстрым развитием ряда отраслей промышленного производства, потребляющих большое количество воды. Вопросы водоснабжения городов и населенных пунктов, а также засушливых земель решаются различными инженерными методами с использованием поверхностных и грунтовых вод.

Все же на значительной территории земного шара уже сейчас нехватка пресной воды ограничивает хозяйственную деятельность человека, препятствуя развитию промышленности, росту городов и осуществлению интенсификации сельского хозяйства. В южных и юго-восточных районах СССР проблема пресной воды тоже относится к весьма важным и часто трудно разрешимым вопросам.

Имеются все основания считать, что в ближайшие десятилетия нехватка воды будет приобретать все большую и большую остроту в континентальных областях субтропических и умеренных широт.

Нехватка пресной воды в городах и особенно в сельской местности в те периоды, когда вода особенно необходима, полностью объясняет повышенный интерес к проблеме активных воздействий на облака и осадки. За последние 10—15 лет в этой области было проведено много новых исследований, значительная часть которых относится к микрофизике облаков и проблеме активных воздействий на облака. Этот научный материал без дополнительных исследований и обобщений был использован в США значительной группой бизнесменов, создавших ряд компаний и акционерных обществ по воздействиям на облачность. С помощью широкой рекламы были привлечены средства фермеров и общественные средства ряда муниципалитетов. Воздействия проводились путем распыления йодистого серебра непосредственно с земли.

Достижения науки в области микрофизики облаков породили не только идею искусственного обводнения, но и идею так называемой метеорологической войны. Эта мысль, широко рекламировавшаяся в США в период холодной войны, основывалась на том, что воздушные массы, из которых наиболее часто выпадают осадки,

как правило, смещаются с запада на восток. Следовательно, путем искусственных воздействий можно вызвать конденсацию водяного пара и выпадение осадков у западной границы тех стран, метеорологическая блокада которых осуществляется США. Идея метеорологической войны поддерживалась наиболее реакционными кругами США в качестве оружия против стран социалистического лагеря. Нет нужды подробно доказывать, что идея метеорологической войны является практически неосуществимой. Воздействия на облака, возникающие в воздушных массах, перемещающихся в определенном направлении, в лучшем случае могут дать осадки над небольшими районами, а это может привести только к ничтожно малому уменьшению общего горизонтального переноса влаги.

Рекомендуемая советскому читателю книга американского автора Л. Дж. Баттана содержит интересный научный и фактический материал, относящийся к проблеме активных воздействий на облака. В книге кратко излагаются основные вопросы метеорологии, связанные с явлениями конденсации. Широко отражены исследования, посвященные физике перехода воды из парообразного состояния в жидкое и наоборот. Популярное объяснение этого сложного явления редко встречается в общедоступной литературе. Автор собрал очень интересные результаты значительного количества научных экспериментов в области воздействий на облака, проведенных в США и других странах. Баттан живо и в вполне доступной форме излагает научные основы современных методов активных воздействий.

В книге подробно рассматриваются методы воздействий с помощью йодистого серебра. Читателю станет ясно, что никаких результатов такие воздействия дать не могут. Тем не менее коммерческие компании США проводили свою «деятельность» в течение ряда лет, используя метеорологическое невежество фермеров при длительном невмешательстве правительства.

Метеорология, химия коллоидов, физика и другие науки достигли в настоящее время настолько высокой степени своего развития, что мечта человека об управлении погодой на наших глазах становится реальностью.

Сейчас мы уже умеем рассеивать туманы и слоистую облачность при температурах ниже 0° над небольшими районами. Ведутся интенсивные исследования по воздействиям на ливневые и грозовые облака с целью регулирования их развития. Идет работа по предотвращению градобоев. В этих сложных явлениях природы, приводящих часто к стихийным бедствиям, изучено еще далеко не все. Однако и здесь уже имеются значительные достижения, позволяющие считать, что в течение ближайшего времени человек сумеет регулировать ход атмосферных процессов сравнительно небольшого масштаба.

В заключение необходимо отметить, что за последние годы издано несколько книг по активным воздействиям. Читателям, интересующимся этой проблемой, следует рекомендовать книгу Б. В. Кирюхина и П. Н. Красикова «Дождь и снег по воле человека» и обширную специальную монографию «Физика облаков» под редакцией А. Х. Хргиана.

Канд. техн. наук Л. Л. Рупперт

ПРЕДИСЛОВИЕ

До 1946 года мало кто из метеорологов работал над проблемой воздействия на погоду.¹ Большинство из них занималось наблюдением, объяснением и предсказанием различных метеорологических условий. Но в последние 20 лет были сделаны попытки разработать схемы, позволяющие не только изменять погоду, но и управлять ею. Пока, к сожалению, результаты малоутешительны. Но в ходе исследований по воздействию на погоду удалось очень многое выяснить о естественных процессах формирования облаков и выпадения осадков.

В первую очередь ученые поставили перед собой следующие задачи: увеличение количества осадков, устранение опасности выпадения разрушительного града, изменение направления перемещения сильных штормов. Перспективы решения этих вопросов стимулировали расширение исследований во всем мире. В результате исследований наше сегодняшнее представление об атмосферных явлениях стало несравненно более полным, чем

¹ Работы в области искусственных воздействий на облака и осадки были начаты в СССР значительно раньше. В 1931 г. на Всесоюзной конференции по борьбе с засухой было принято решение об организации Института искусственного дождя. Центром исследовательской работы в этой области с 1934 г. являлся Ленинградский институт экспериментальной метеорологии. (Прим. ред.)

два десятилетия назад. Правда, многие стороны этой проблемы выяснены еще явно недостаточно. Однако непрерывно продолжающиеся исследования рассеивают туман неизвестности и все больше и больше раскрывают секреты природы. Поэтому можно не сомневаться, что мы в конце концов научимся изменять погоду и управлять ею.

Над решением этой исключительно важной и сложной проблемы работает малочисленный отряд ученых. Нужны энергичные и обладающие большим воображением люди. История показывает, что некоторые величайшие научные открытия были сделаны очень молодыми учеными, которые отважились вырваться за пределы общепринятых теорий и гипотез. Физика атмосферы нуждается в таких людях. Мы не можем уклоняться от поединка с погодой, и мы должны победить в нем.

Луис Дж. Баттан

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

Есть ли жизнь — в таком виде, в каком мы ее знаем, — на других планетах или на их спутниках? Вряд ли кто-нибудь может с уверенностью ответить на этот вопрос. Но во Вселенной много миллионов планет, и нет ничего удивительного в том, что в один прекрасный день будут открыты другие «Земли». В настоящее время можно лишь твердо сказать, что в нашей солнечной системе нет людей, похожих на нас, как нет, скажем, и роз, похожих на те, что растут в соседнем саду. Нет людей и на Луне. Вы спросите: откуда такая уверенность?

Как-нибудь, когда небо будет ясным и вы окажетесь поблизости от телескопа, посмотрите внимательно на Луну. Если нет телескопа, сходите в библиотеку и возьмите книгу с фотографией поверхности Луны. И в первом и во втором случае вы сможете различить многие детали рельефа Луны.

Теперь представьте себе, что вы стоите на поверхности Луны и смотрите на Землю. Вместо четких контуров поверхности вы увидели бы облака самых разных размеров и очертаний. Поверхность Земли во многих местах из-за тумана будет казаться расплывчатой. Причина всего этого очевидна. Дело в том, что на Земле имеется в изобилии очень важное вещество — вода.

На Луне нет воды, значит, нет водяных паров и, следовательно, нет облаков. Отсюда вытекает, что на Луне не может существовать жизнь, такая, какой мы ее себе представляем.

Когда мы говорим, что Земля располагает огромными запасами воды, мы имеем в виду пресную, солоноватую и очень соленую воду. В давние времена лишь немногих людей волновала проблема снабжения пресной водой. Население на земном шаре было сравнительно малочисленным, крупные города располагались, как правило, на берегах озер или полноводных рек, промышленное потребление воды было незначительным, а ирригация не получила еще широкого распространения. Но в результате промышленной революции, происшедшей более ста лет назад, интенсификации сельского хозяйства, которая имела место в последние 20—30 лет, а также вследствие значительного увеличения населения потребление пресной воды резко возросло. Ученые и государственные деятели во всем мире начали понимать, что без воды не может быть ни роста населения, ни развития промышленности.

Многие десятилетия ведутся интенсивные исследования по наилучшему использованию водных ресурсов. В настоящее время предпринимаются серьезные попытки создать технические средства опреснения морской воды и соленых подземных вод.¹ Кроме того, за последние 20 лет было проведено немало экспериментов с целью разработки методов «выжимания» большего количества воды из атмосферы. Но пока эти усилия оказались в значительной мере бесплодными. В следующих главах мы остановимся на исследованиях по воздействию на облака. Теперь же лишь отметим, что неудачи при попытках искусственного стимулирования дождя объясняются главным образом тем, что мы не знаем в деталях, как природа создает дождь или снег. В этой небольшой книге будут разобраны некоторые вопросы физики образования облаков и осадков. Знание этих вопросов очень важно для понимания физических основ экспериментальных воздействий на облака. Прежде чем приступить к рассмотрению собственно облаков, приведем некоторые данные о запасах воды на Земле.²

¹ В 1964 году между СССР и США было заключено соглашение о совместных работах по опреснению соленых вод. (Прим. ред.)

² Большая часть излагаемых здесь сведений заимствована из статьи Дж. Мак-Дональда (J. E. McDonald, *Advances in Geophysics*, vol. 5, New York and London, 1958).

Общее количество воды во всех ее формах оценивается приблизительно в 10^{18} тонн. Для тех, кто впервые встречается с таким написанием, поясним, что оно означает число, выражаемое единицей с восемнадцатью нулями. Лишь около 0,01% этой воды сосредоточено в реках и озерах. До 5% воды находится в ледниках и скопилось под землей. Количество водяных паров в атмосфере составляет 0,001% общей массы воды на Земле. В табл. 1 указаны абсолютные количества и относительное распределение воды в различных ее формах.

Таблица 1
Количество воды в различных формах

	Тонны	%
Моря и океаны	$9,5 \cdot 10^{17}$	94,9
Льды и подземные воды	$5 \cdot 10^{16}$	5,0
Реки и озера	10^{14}	0,01
Пары воды в атмосфере	10^{13}	0,001

Как видим, доля воды, находящейся в атмосфере в виде паров, мала по сравнению с другими формами. И тем не менее общее количество ее весьма существенно. Если считать, что население земного шара составляет приблизительно 2,7 миллиарда человек, и если разделить атмосферную воду поровну между всеми людьми, то на долю каждого придется до 3700 тонн воды. Подсчеты специалистов показывают, что полное обновление всех водяных паров в атмосфере происходит примерно за 12 дней. Таким образом, если бы все водяные пары превращались в дождь, который собирался и равномерно распределялся бы между людьми, то каждый получал бы ежедневно около 310 тонн воды, т. е. 310 000 литров.

Конечно, подобный расчет в значительной мере представляет собой жонглирование любопытными цифрами. Надо сразу же оговориться, что какую-либо пользу может принести только тот дождь или снег, который выпадает на сушу.

По оценкам ученых, годовое количество осадков на всей Земле составляет в среднем 100 см. В сумме это дает около $8 \cdot 10^{11}$ тонн в день. Поскольку континенты

занимают приблизительно четвертую часть земной поверхности, то та четверть осадков, которая может быть использована, составит примерно $2 \cdot 10^{11}$ тонн в день. Если это количество равномерно распределить среди людей, то каждому в день досталось бы 8 тонн воды, или 8000 литров.

Любопытно отметить, что потребление воды в Соединенных Штатах Америки в расчете на душу населения составляет в среднем 6250 литров в день. Из них 90% приходится на промышленность и сельское хозяйство (примерно пополам), а остальные 10% потребляются в домашнем хозяйстве.¹ Приведенные цифры убедительно показывают, что на Земле достаточно пресной воды для полного удовлетворения потребности в ней. К сожалению, в действительности дело обстоит по-иному. Как это часто бывает, средние цифры лишь вводят в заблуждение. В одних районах земного шара осадков слишком много, в других — слишком мало. Более того, не все осадки выпадают именно тогда, когда в них испытывается нужда.

По этой причине приходится использовать воду из естественных хранилищ — озер, рек и подземных резервуаров. Однако и это не разрешает полностью проблемы. Важным потенциальным источником пресной воды являются моря и океаны, но очистка воды от солей и других растворенных в ней веществ обходится пока слишком дорого. При использовании даже самой совершенной (на 1962 год) техники стоимость каждых 4000 литров опресненной воды составила бы 1 доллар². Это примерно втрое превышает экономически оправданные затраты. Однако можно надеяться, что технический прогресс и достижения мировой науки позволят решить эту экономическую проблему.

Что же касается метеорологов, то они занимаются развитием тех средств, которые способны увеличить количество осадков. Вряд ли можно надеяться, что известные в настоящее время методы воздействий могут привести к значительному изменению водных ресурсов на Земле. И тем не менее есть основания полагать, что они позволят воздействовать на облака и вызывать вы-

¹ См.: В. F. Dodge. American Scientist, vol. 48, 1960.

² 1 доллар = 90 копеек.

падение осадков над небольшими районами. Чтобы понять, как это можно сделать, необходимо сначала выяснить физический механизм образования облаков и осадков в природе.

ГЛАВА 2

ЯДРА КОНДЕНСАЦИИ — ОСНОВА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ

Как приятно стоять на берегу моря и смотреть на волны, которые непрерывно, одна за другой накатываются на берег! Длинные ленты белых бурунов спокойно набегают на песчаную отмель или, ударяясь о прибрежные камни, поднимают целые фонтаны брызг. Затем водяные брызги падают обратно в быстро откатывающийся вал. Но не вся вода тотчас же возвращается в море. Отдельные очень мелкие капельки взлетают вверх и затем испаряются. При этом остаются мельчайшие частицы соли, которые играют важную роль в образовании облаков и дождя. Как мы увидим дальше, водяные пары конденсируются именно на подобных частицах. Они служат ядрами, на которых вырастают капельки, составляющие облако.

Существуют и другие типы ядер. Некоторые из них более активны, так как обладают большим сродством к молекулам воды; они вырастают в капельки облаков при относительной влажности ниже 100%. При всяком горении образуются ядра; следовательно, крупные города вносят свой вклад в заполнение атмосферы такими ядрами. В настоящее время население всего земного шара обеспокоено загрязнением атмосферы.¹ Хотя все еще имеются отдельные разногласия по вопросу об основных источниках дыма, но не вызывает сомнения, что количество газов и частиц, выбрасываемых в атмосферу заводскими трубами, автомобильными моторами, а также в результате пожаров, возрастает. Подъезжая к большому городу, вы часто видите темно-бурую пелену, заво-

¹ В последние 10 лет вопросы загрязнения атмосферы стали настолько актуальными, что возникла специальная область науки, исследующая диффузию сернистого ангидрида и пыли в районе крупных городов и промышленных предприятий. (Прим. ред.)

лакивающую горизонт. Ее иногда называют дымовой завесой. Без сомнения, загрязнение воздуха достигло такой стадии, когда это стало чуть ли не бедствием. Загрязненный воздух не только портит пейзаж города; находящиеся в воздухе вещества вызывают преждевременный износ строений, гибель растений и — что особенно важно — наносят серьезный вред здоровью человека.

Едва ли доставляет удовольствие вид заводских труб, выбрасывающих клубы дыма, однако не следует забывать, что частицы этого дыма могут служить ядрами для образования капелек облаков. Но если бы все печи на Земле вдруг погасли, уменьшилось бы количество дождей? Вероятнее всего, мы не заметили бы никакого эффекта. Ведь задолго до возникновения тяжелой промышленности, автомобильного транспорта и резкого роста атмосферных загрязнений количество осадков заметно не отличалось от того, что мы имеем сейчас. Природа как бы приспосабливается к тем частицам, которые имеются в наличии. Раньше, как и сегодня, горели леса, извергались вулканы.

Кроме того, некоторые виды частиц почвы могут служить ядрами конденсации, причем за последние десятилетия этот источник ядер почти не изменился.

Какова же роль этих ядер? Как они образуются? Каковы их размеры и основные свойства? Этим вопросам мы и посвятим следующие несколько страниц.

ДЛЯ ЧЕГО НЕОБХОДИМО ЯДРО?

Каждому известно, что в теплый сырой день наружная стенка стакана с ледяной водой мгновенно запотеет. Это значит, что происходит конденсация водяных паров, содержащихся в воздухе, на холодной поверхности стекла. Воздух, окружающий стакан, охлаждается, при этом возрастает его относительная влажность, т. е. отношение количества водяных паров, находящихся в воздухе при данной температуре, к тому количеству паров, которое могло бы содержаться в нем при той же температуре. Если относительная влажность достигла 100%, то воздух становится *насыщенным*. При дальнейшем незначительном понижении температуры начнется конденсация. Но что произойдет, если охлаждать воздух при отсутствии твердых предметов, вроде стакана? Для

выяснения этого вопроса было поставлено множество опытов, и мы теперь хорошо представляем картину явления.

Предположим, что мы тщательно очистили воздух от частиц любого вида, в том числе и от частиц с мельчайшими электрическими зарядами (такие частицы называются ионами). Тогда относительная влажность может повыситься до весьма значительной величины, прежде чем произойдет конденсация паров. По сути дела, в этом случае для начала конденсации, т. е. образования мелких капелек облака, необходимо, чтобы количество водяных паров в несколько раз превышало то количество, которое насыщает воздух при нормальных условиях. О воздухе, который содержит водяных паров больше, чем ему требуется для насыщения, говорят, что он *пересыщен*.¹ В воздухе, абсолютно свободном от частиц, можно получить пересыщение в несколько сотен процентов; это означает, что в нем находится в несколько раз больше молекул водяного пара, чем их было бы при насыщении. Многие ученые теоретически исследовали причины, почему требуется столь большое пересыщение для возникновения капелек.

Сущность процесса конденсации заключается в том, что большое количество молекул водяного пара сближается, образуя жидкость. При отсутствии посторонней поверхности, например поверхности холодного стакана или ядра, молекулы пара слипаются лишь в результате случайных соударений. Группы молекул непрерывно возникают и тотчас же распадаются, так как молекулы находятся в хаотическом движении. Однако ученые показали, что если имеются условия для объединения достаточно большого числа молекул, то они образуют частицу, которая уже не испаряется, а постепенно растет. Чтобы избежать неопределенного выражения «достаточно большое число молекул водяного пара», будем считать, что молекулы концентрируются, образуя мельчайшие шарообразные тела. Тогда можно говорить о радиусе этих шаров, который должен быть достигнут для формирова-

¹ Правильнее было бы говорить не о воздухе, пересыщенном водяным паром, а о некотором объеме, в котором наблюдается пересыщение. Это явление отмечается вне зависимости от того, заполнен ли этот объем воздухом или там содержатся только водяные пары. (Прим. ред.)

ния устойчивых капель воды. В 1870 году известный английский ученый Кельвин впервые получил уравнение, позволяющее вычислять эти критические радиусы. Они зависят от температуры воздуха, а также от степени пересыщения. Чем выше пересыщение, тем больше вероятность того, что критическое число молекул пара сгруппируется в каплю, которая будет постепенно расти.

Теоретические исследования, подкрепленные лабораторными экспериментами, показали, что при отсутствии поверхности, на которой может конденсироваться пар, необходимо весьма большое пересыщение для того, чтобы началось образование капель. В естественных условиях атмосферы даже в результате быстрого охлаждения воздуха может быть достигнуто пересыщение всего лишь 1—2% (а не несколько сотен процентов), и тем не менее облака представляют собой обычное явление. Это объясняется, очевидно, тем, что в атмосфере всегда присутствуют ядра, на которых могут собираться молекулы водяного пара в количестве, достаточном для образования устойчивых капель.

Мы уже говорили о ядрах, состоящих из мельчайших крупинок морской соли. Тот факт, что водяные пары легко конденсируются на соли, общеизвестен. Вам, конечно, приходилось солить пищу в сырой летний день, и вы замечали, что частицы соли, впитав в себя водяные пары из воздуха, слипались в крупные куски и, хотя вы встряхивали солонку, кусочки соли никак не могли пройти сквозь отверстия солонки. Дело в том, что стоит кристаллику соли намочить, как он растворяется в воде, причем образовавшийся раствор поглощает все больше и больше водяных паров и непрерывно увеличивается в объеме.

Кристаллики соли в атмосфере могут иметь самые различные размеры: от 0,01 до 10 микрон¹. В следующем разделе мы расскажем о методах улавливания этих маленьких частиц и их измерения.

Существует еще одна большая группа ядер, которая детально изучалась К. Э. Юнге (бывшим сотрудником Кембриджского научно-исследовательского центра военно-воздушных сил США). Это мельчайшие капельки, содержащие химические соединения типа сульфатов. Они

¹ 1 микрон равен 0,001 мм.

появляются в атмосфере в результате сжигания веществ, в которых содержится сера. Например, когда уголь сгорает в печи, вместе с дымом вылетает газообразная двуокись серы — соединение, состоящее из серы и кислорода. В присутствии кислорода этот газ постепенно превращается в трехокись серы, а та в свою очередь в присутствии водяного пара переходит в серную кислоту H_2SO_4 . Солнечный свет ускоряет процесс преобразования двуокиси серы в серную кислоту. Юнге показал, что многие ядра состоят из сульфата аммония.

Мелкие капельки азотной кислоты образуются путем соединения азота, кислорода и водяных паров при высоких температурах. Необходимые для этого условия возникают при лесных пожарах и особенно во время гроз. Кроме того, некоторые промышленные предприятия выбрасывают азотную кислоту в атмосферу.

Маленькие капельки кислоты служат ядрами конденсации, так как они, подобно соли, гигроскопичны, т. е. обладают сродством к воде. Пары начинают конденсироваться на них при относительной влажности, даже меньшей 100%. Размеры ядер этого типа всего несколько десятых долей микрона; они обнаружены в большом количестве на всем земном шаре.

Частицы почвы, уносимые ветром с поверхности земли, — третий важнейший тип ядер конденсации. Тяжелые частицы с диаметром, превышающим 10—20 микрон, быстро падают обратно на землю, зато меньшие частицы могут подниматься на большую высоту и переноситься на значительные расстояния. Эффективность частиц почвы как ядер конденсации зависит от их свойств. Наиболее активными являются те частицы, которые обладают гигроскопичностью, т. е. легко смачиваются водой и растворяются в воде.

Ядра конденсации удобно разделить на три группы (рис. 1). Наименьшие из них имеют диаметр менее 0,4 микрона; в 1 см³ может быть от 1000 до 5000 подобных ядер. Их обычно называют *ядрами Айткена* по имени ученого, который в 1880 году показал, что водяные пары конденсируются на ядрах. Вторая группа носит название *больших ядер*. Они имеют диаметр от 0,4 до 1 микрона, а концентрация их составляет несколько сотен частиц в 1 см³. Диаметр *гигантских ядер* лежит в пределах 1—10 микрон; они встречаются в количестве от 0,1

до 1 частицы в 1 см³. Большие ядра состоят в значительной части из сульфатов, а гигантские — главным образом из морской соли.

ИЗМЕРЕНИЕ ЯДЕР

В последние годы было предложено несколько остроумных схем для изучения свойств ядер конденсации. Ведь большинство ядер настолько мало, что их невозможно увидеть невооруженным глазом, а некоторые — даже при помощи обычного микроскопа.

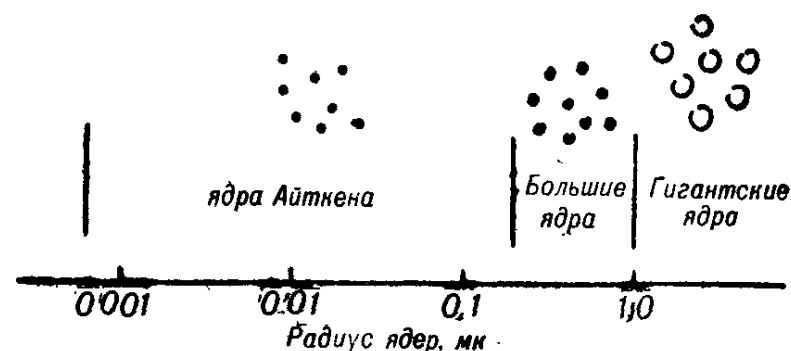


Рис. 1. Три группы ядер конденсации.

Нас будут интересовать следующие свойства ядер: размеры, число их в единице объема воздуха и химический состав. Мы уже отмечали, что в атмосфере обнаружены крупинки соли, капли кислоты и частицы почвы. Существует и много других типов частиц, но наиболее важны именно эти три группы.

Любопытно было бы вкратце познакомиться с некоторыми ранее применявшимися методами. В качестве одного из простейших устройств, предназначенных для измерения числа ядер конденсации в единице объема, т. е. их концентрации, можно назвать счетчик ядер Айткена. Он состоит из герметически закрытого сосуда, внутри которого создается давление, превышающее атмосферное. Когда температура в камере становится равной температуре окружающей среды, внезапно открывают клапан. Воздух вырывается из камеры, и давление в ней резко падает. Расширение приводит к столь же резкому понижению температуры, а следовательно, к быстрому возрастанию относительной влажности, поэтому наступает пересыщение, вполне достаточное для того, чтобы вы-

звать конденсацию фактически на всех частицах, находящихся внутри камеры. Если в камеру направить пучок света, то можно увидеть туман, состоящий из капелек воды. Измеряя ослабление пучка света при его прохождении сквозь туман, можно оценить концентрацию капель, а значит, и концентрацию ядер, так как каждая капля возникает на ядре.

Счетчик Айткена не дает информации о размерах и составе частиц. Зато он позволил установить, что концентрация мельчайших ядер конденсации над сушей примерно в пять раз выше, чем над морем. Следовательно, главные источники их должны находиться на суше, а не в океанах.

Для изучения отдельных ядер надо научиться «ловить» их. Но как улавливать частицы диаметром всего 1 микрон?

Если имеется фильтр с достаточно маленькими отверстиями, то можно пропустить сквозь него воздух и задержать частицы. Например, Дж. Лодж-младший для улавливания очень мелких частиц применял фильтры с порами размером около 0,3 микрона. В основе метода регистрации ядер лежит принцип соударения частиц с пластинкой, поставленной на их пути. Общая схема такого прибора показана на рис. 2. Воздух под таким давлением прогоняется через сопло, что в его конце создается высокая скорость течения. На небольшом расстоянии от сопла (примерно в 1 мм) располагается предметное стекло микроскопа — маленькая стеклянная или пластмассовая пластинка. Воздух при выходе из сопла обтекает пластинку. Частицы достаточно большого размера не могут настолько отклониться, чтобы избежать контакта с пластинкой: в этом случае они сталкиваются с пластинкой и оседают на ней. Чтобы

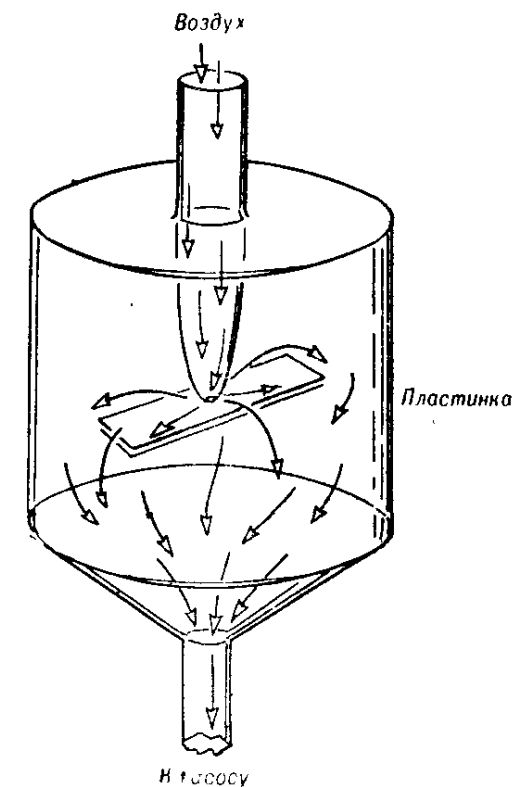


Рис. 2. Прибор для улавливания частиц диаметром более 1 микрона.

обеспечить прилипание их, пластинку иногда покрывают клейким веществом. Такое устройство способно эффективно захватывать частицы с диаметром, превышающим 1 микрон. Более мелкие частицы увлекаются струей воздуха и не попадают на стекло.

Техника анализа уловленных частиц довольно остроумна. В качестве клейкого вещества может быть использован специальный желатин, пропитанный химическим соединением, которое реагирует с веществом частиц. Б. Сили (Горно-технологический институт в штате Нью-Мексико, США) изучал частицы, содержащие хлориды, так как его интересовал хлористый натрий, или общеизвестная поваренная соль. Он добавил в желатин так называемый фторосиликат ртути. Когда частица соли попадает в желатин, она сразу же начинает реагировать с этим соединением; в результате образуется пятно, которое при просматривании под микроскопом имеет характерную голубую окраску. опыты показали, что голубое пятно расплывается до диаметра, который примерно в девять раз больше диаметра первоначальной частицы соли. Это свойство позволяет без труда определять те места, куда попали частицы соли, подсчитывать их количество на пластинке и определять размеры каждой частицы в отдельности.

В методе фильтров, разработанном Лоджем-младшим, также используется фторосиликат ртути. Фильтры окунаются в раствор этого реагента, с тем чтобы частицы соли могли прореагировать и оставить характерные голубые пятна.

Итальянский ученый О. Виттори применял в своей работе желатин, пропитанный нитратом серебра. При попадании на желатин частицы хлорида появляется почти идеально круглое пятно. Если пластинку выдерживать на свету, то это пятно можно четко увидеть под микроскопом. Сначала оно имеет желтую окраску, а затем постепенно становится коричневым.

Изумительную технику разработал А. Дессан (Франция). Он использовал паутину. Чтобы захватывать очень маленькие частицы при их ударе о поверхность, необходимо либо сообщать этим частицам большие скорости, либо применять очень узкую улавливающую поверхность. Дессан прибег к помощи одной из разновидностей паука, который вырабатывает чрезвычайно однородную

нить диаметром около сотой доли микрона. Пауку «предоставили возможность» навить свою паутину на рамку. Через сетку из этой паутины было пропущено определенное количество воздуха, а затем сетку поместили в специальную камеру под микроскоп. При изучении частиц, осевших на паутине, иногда обнаруживались твердые и сухие частицы, но большинство из них оказалось маленькими капельками даже в тех случаях, когда относительная влажность не превышала 50%. По мере уменьшения влажности вода испарялась, пока не оставались миниатюрные белые кубические кристаллы. Как удалось установить, это были кристаллы хлористого натрия. Дессан обнаружил частицы диаметром всего 0,5 микрона.

Для изучения ядер конденсации на больших высотах устройства для улавливания частиц поднимают на самолетах. Подобные исследования были выполнены А. Вудкоком и его сотрудниками из Вудскоулского океанографического института (США). Они брали стеклянные и серебряные стержни диаметром примерно 0,5 мм и помещали их в струю воздуха за самолетом. Частицы, ударившиеся о стержни, оставались на них. Затем стержни помещали в камеру, в которой можно было регулировать влажность и температуру. При просмотре стержней под микроскопом нетрудно было увидеть, что большинство «частиц» представляло собой мелкие водяные капли. Зная температуру и влажность воздуха в камере, можно по размерам капель определить размеры частиц соли. Поскольку стержни имеют сравнительно большой диаметр, этот метод не позволяет обнаруживать ядра диаметром меньше 1 микрона.

Существует множество других систем, но все они являются вариантами либо метода фильтра, либо принципа улавливания частиц на те или иные поверхности. В некоторых из них поток воздуха обеспечивает сортировку частиц по их размерам (рис. 3). В других способах сортировка обусловлена тем, что поверхность, о которую ударяются частицы, имеет форму кривой с возрастающей кривизной. Благодаря этому большие частицы ударяются в начале пластинки, а маленькие — ниже.

Для захвата особо мелких частиц — диаметром от 0,01 до 0,1 микрона — был разработан так называемый

мый термоосадитель (рис. 4). Две пластинки располагаются строго параллельно друг другу; между ними остается небольшой зазор. Одна пластинка нагревается,

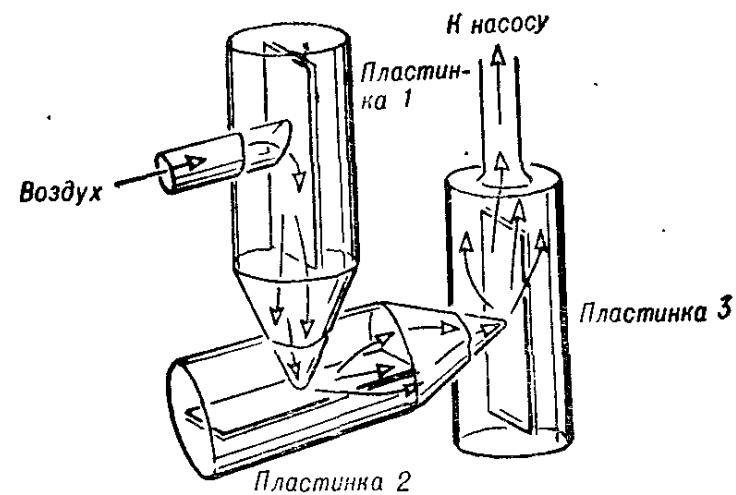


Рис. 3. Каскадный прибор. Воздух проходит через последовательно уменьшающиеся сопла, причем скорость его постепенно возрастает. На каждой пластинке оседают частицы различного диаметра.

вторая охлаждается. Воздух вблизи горячей пластинки, естественно, имеет более высокую температуру. Молекулы теплого воздуха движутся несколько быстрее и, сталки-

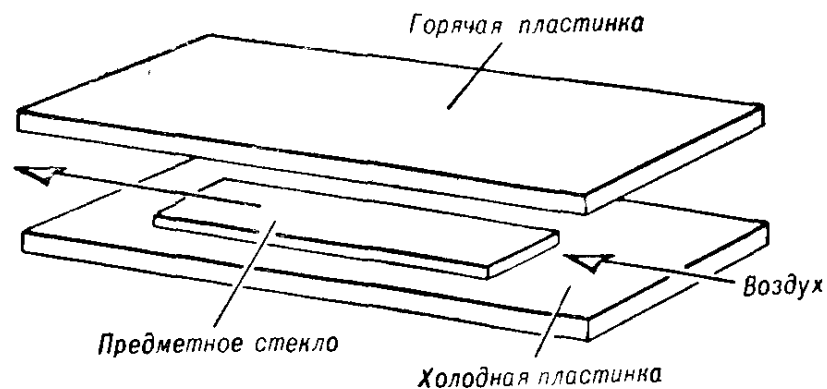


Рис. 4. Схематический чертеж термоосадителя для улавливания особо мелких частиц.

ваясь с мельчайшими частицами, подталкивают их к холодной пластинке. Если на эту пластинку положить предметное стекло микроскопа, то частицы будут прилипать к стеклу. В ряде работ использовались даже пред-

метные стекла электронного микроскопа, благодаря чему частицы рассматривались при увеличении во много тысяч раз.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ЯДРАХ КОНДЕНСАЦИИ

Как уже говорилось, ученые приступили к измерению ядер конденсации более 60 лет назад. Первые исследования Айткена и других дали сведения только о числе ядер, содержащихся в единице объема и участвующих в образовании капель воды при очень высоком пересыщении. О свойствах этих частиц было известно немного. Лишь созданная за последние 20 лет усовершенствованная техника позволила узнать об их размерах и составе.

Многочисленные измерения показали, что количество ядер изменяется в очень широких пределах в зависимости от места и времени наблюдения. В 1938 году Х. Э. Ландсберг сопоставил данные измерений ядер Айткена, произведенных в самых различных местах (табл. 2). Из табл. 2 следует, что число ядер в городах значительно больше, чем в сельской местности, и уж совсем велико по сравнению с количеством их над поверхностью океана. Фактическая концентрация в данный момент времени и в данном месте зависит от многих факторов, например от характера промышленных объектов, вида почвы, скорости ветра, от того, прошел ли недавно дождь или нет. Однако приведенные в табл. 2 данные показывают, что основные источники ядер Айткена находятся на континентах и что человеческая деятельность повышает число этих ядер в воздухе.

Таблица 2

Сравнение концентрации ядер Айткена

	Число замеров	Средняя концентрация (в 1 см ³)	Диапазон изменения концентрации (в 1 см ³)
Город	2500	147 000	3500—4 000 000
Сельская местность	3500	9 500	180— 336 000
Океан	600	940	2— 39 800

Еще раз отметим, что ядра Айткена обычно столь малы, что для начала конденсации на них требуется очень высокая степень пересыщения. Это следует хотя бы из того, что нормальная концентрация капель в облаке лежит в пределах 10—1000 на 1 см³, тогда как число ядер Айткена примерно в 100 раз больше. Только самые крупные и наиболее эффективные ядра Айткена могут участвовать в образовании облаков.

Концентрация крупных ядер уже приближается к числу капель в единице объема облака. В табл. 3 приведены результаты некоторых наблюдений, полученные Дессаном при помощи паутины. Паутиновая сетка экспонировалась при протекании определенного объема воздуха, причем число и размеры частиц регистрировались, когда относительная влажность в атмосфере составляла 78%. Даже вдали от населенных пунктов были обнаружены существенные колебания числа частиц в различные дни, но диапазон изменения этих величин оказался несравненно меньше, чем для ядер Айткена.

Таблица 3

Результаты подсчетов ядер конденсации по числу капель (в 1 см³). По А. Дессану

Радиус капль (микрон)	< 0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	Всего
Число капель	100	46	30	14	7	2	1	200

Из табл. 3 ясно, что, чем меньше частицы, тем больше их в известном объеме воздуха. Хотя гигантские ядра, т. е. частицы радиусом от 1 до 10 микрон, встречаются в концентрации не более одного в 1 см³, но именно они играют чрезвычайно важную роль в процессе образования осадков.

Мы уже отмечали, что Вудкок произвел многочисленные измерения частиц морской соли. На рис. 5 изображены графики, опубликованные в одной из его работ. Они показывают зависимость концентрации гигантских ядер от их радиуса, за который принят тот радиус, который должна иметь частица при относительной влажности 99%. В столь влажном воздухе частицы соли будут находиться в виде раствора.

По существу, для всех частиц в атмосфере справедлива следующая закономерность: по мере увеличения

размеров частиц число их в единице объема падает. Количество частиц радиусом 5 микрон колеблется от 10³ до 10⁵ на 1 м³ (т. е. от 0,001 до 0,1 на 1 см³). Таким образом, в обычном облаке гигантских ядер мало по сравнению с числом капель.

Твердо установлено, что океаны являются основными поставщиками гигантских солевых ядер. Вудкок производил наблюдения над океаном в самых различных условиях. Он обнаружил, что, чем выше скорость ветра, тем больше концентрация ядер. Этот результат легко объясним. Действительно, при сильном ветре выше вздымаются волны и больше капель морской воды попадает в атмосферу. Вудкок и ряд других ученых исследовали также ядра морской соли на различных высотах. Как и следовало ожидать, по мере подъема над поверхностью океана концентрация этих ядер уменьшается. А. Вудкок и А. Спенсер показали, что, когда горячая лава, образовавшаяся при извержении вулканов на Гавайских островах, падает в океан, в атмосферу выбрасывается очень много частиц морской соли.

Над континентами концентрация гигантских ядер ниже, так как они либо оседают на землю, либо вымываются из воздуха вместе с осадками. И тем не менее гигантские ядра соли иногда обнаруживаются и в глубине континентов. Х. Бауэрс и другие сотрудники Чикагского университета брали пробы с самолета над центральной частью Соединенных Штатов Америки. В отдельные дни они обнаруживали солевые ядра диаметром

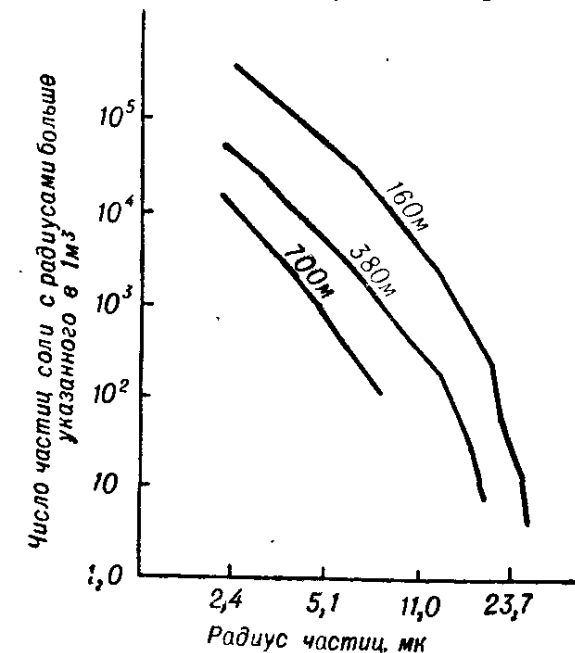


Рис. 5. Среднее распределение кристаллов морской соли различных размеров по высоте. Размеры частиц были определены после осаждения их в камере с относительной влажностью 99%. Измерения производились над океаном вблизи Гавайских островов на трех высотах: ниже основания облаков, в слое облаков, над верхней границей облаков (по А. Вудкоку).

более 5 микрон в концентрации от 100 до 1000 частиц на 1 м³.

Резюмируя, можно сказать, что атмосфера заполнена разнообразными частицами диаметром от 10 до 0,01 микрона и даже меньше. Чем меньше частицы, тем их больше. В облаках концентрация водяных капель колеблется от 10 до 1000 штук в 1 см³, а это значит, что лишь малая доля находящихся в воздухе ядер действительно принимает участие в образовании капель, из которых состоят облака. К важнейшим факторам, определяющим, станет ли данная частица ядром облачной капли, следует отнести размеры частицы и ее состав. Большие частицы, которые состоят из веществ, обладающих сродством к воде, находятся в наиболее благоприятном с этой точки зрения положении.

ГЛАВА 3

ОБЛАКА И ИХ ОБРАЗОВАНИЕ

Для разных людей облака имеют разный смысл. Поэты и художники находят вдохновение в красоте их форм и оттенков. Одни крестьяне с благодарностью смотрят на облака, когда они приносят с собой дождь изнывающей от жажды земле, другие потрясают кулаками, когда облака обрушивают град, который побивает поля и виноградники. Метеорологи взирают на облака с меньшими эмоциями, но то, что они видят, очень интересно.

ЧТО ТАКОЕ ОБЛАКО?

С точки зрения метеоролога, облако — это скопление мельчайших частиц воды или льда, которых достаточно много для того, чтобы их можно было видеть. Диапазон размеров капель, составляющих облако, очень широк: от нескольких микрон до сотни микрон. На фото I изображена группа капель облака, пойманных на предметное стекло микроскопа. В этом облаке большинство капель имели диаметры от 10 до 20 микрон. Как будет показано ниже, во многих облаках преобладают капли именно этого размера.

Капли облака, показанные на фото I, представляют собой почти идеальные сферы. В главе 4 мы увидим, что,

по мере того как водяные капли вырастают до больших размеров и становятся каплями дождя, их форма все более и более отличается от сферической. В чем разница между каплями облака и дождевыми каплями? Главное различие заключается в размерах. Чем больше капля, тем быстрее она падает и тем большее расстояние она успевает пройти до того, как испарится. Это отчетливо видно из табл. 4. Скорости испарения были вычислены

Таблица 4

Скорость падения капель и расстояния, проходимые ими до испарения

Радиус капли (микроны)	Скорость падения (см/сек.)	Расстояние, проходимое до испарения (м)
10	1	<1
100	76	150
1000	690	4200

немецким ученым В. Финдайзеном в предположении, что капли падают в воздухе с относительной влажностью 90%. Капли радиусом меньше 100 микрон падают очень медленно, и когда они выходят из облака, то чрезвычайно быстро испаряются. Наоборот, капли радиусом более 100 микрон падают очень быстро и, выйдя из облака, успевают пролететь несколько километров, прежде чем испарятся. Следовательно, они могут достигнуть поверхности земли в виде дождя. Ученые пришли к выводу, что радиус 100 микрон удобно считать границей между облачными и дождевыми каплями.

УЛАВЛИВАНИЕ КАПЕЛЬ ОБЛАКА

В последние годы было проведено много исследований размеров и числа капель, составляющих облака. Были разработаны самые различные методы улавливания капель. Наиболее удачные из них чрезвычайно просты. Предметное стекло микроскопа покрывается тонким слоем масла или вазелина и прикрепляется к концу стержня, устанавливаемого на самолете. Когда полет происходит в облаке, капельки ударяются о стеклянную пластинку и остаются на ней не растекаясь.

Затем пластинка просматривается под микроскопом или фотографируется. Фото I было получено именно таким образом.

Зная время, в течение которого пластинка экспонируется в облаке, и скорость самолета, легко вычислить объем воздуха, из которого взята проба, а следовательно, определить число капель в единице объема.

Этот метод имеет ряд недостатков, в частности, предметные стекла, покрытые слоем масла, необходимо просматривать под микроскопом сразу же после взятия пробы, т. е. на борту самолета. Иначе, несмотря на то что капли воды обволакиваются маслом, они довольно быстро испарятся. Прежде чем произвести фотосъемку, наблюдатель должен прижать свой глаз к окуляру микроскопа, чтобы получить необходимую резкость изображения. Однако, когда полет проходит в беспокойной атмосфере, например в летних облаках, эта операция не очень приятна для наблюдателя. Если в результате болтанки в этот момент самолет бросит вверх или вниз, то наблюдатель может вернуться домой с подбитым глазом.

Некоторые исследователи используют для покрытия предметных стекол не масло, а копоть. Копоть, состоящая из мельчайших частиц окиси магния, образуется при сжигании магниевой ленты. Когда стеклянная пластинка медленно пропускается через поток копоти, на ней образуется тонкая пленка из этих частиц. Каждая частица имеет размер около 0,5 микрона. Для исследования капель облака предметные стекла должны иметь такую толщину пленки копоти, которая превышала бы самые большие капли, которые могут присутствовать в облаке.

Если такое предметное стекло пронести сквозь облако, то капли при соударении с пластинкой будут погружаться в мягкий слой из частиц копоти. Испаряясь, капли оставляют вместо себя круглые устойчивые отверстия. Затем пластинки можно убрать и просматривать лишь после приземления самолета.

Ученые создали камеры, позволяющие непосредственно фотографировать капли облака с помощью микроскопа. Для обеспечения хорошей фокусировки необходимо, чтобы в поле зрения микроскопа находился очень маленький участок. В результате на каждом

снимке оказывается всего несколько капель. Так как в 1 см³ обычного облака содержится примерно 200 капель, нужно изучить тысячи капель (т. е. тысячи фотографий), чтобы получить представление о размерах капель в облаке. Это обстоятельство делает метод прямого фотографирования капель облака практически непригодным.

Существует много других способов отбора проб в облаках. Одни из них более удобны, чем другие, но самыми надежными остаются те методы, в которых капли улавливаются на предметное стекло. В последние годы было предложено множество схем, основанных на том, что рассеяние световых волн каплями зависит от размера последней. Если бы облака состояли из капель одинакового размера, то можно было бы создать устройство, в основе которого лежал бы принцип рассеяния света. Но, к сожалению, в любом облаке размеры капель колеблются в широких пределах.

Сейчас разрабатывается новый прибор, который, как можно надеяться, позволит решить эту проблему. В основе его лежит исследование света, рассеянного на индивидуальных каплях облака, по мере того как они пересекают очень узкий пучок света. Рассеянный свет регистрируется с помощью электронной схемы. Действительно, в этом случае в каждый момент времени исследуется только одна капля, но за минуту можно наблюдать огромное их число, часто несколько тысяч. В отличие от других схем, в которых требуется, чтобы каждая капля изучалась (в частности, измерялся ее размер) отдельно, новый прибор автоматически регистрирует число капель, проходящих на различные участки шкалы их размеров.

В ряде статей советских ученых, опубликованных в 1956—1959 годах, говорилось о создании прибора, работающего на этом принципе.¹ Однако пока он не будет испытан на практике, можно только питать надежды на его успешное применение. История создания приборов

¹ Автор, по-видимому, имеет в виду прибор, созданный А. Е. Мирковым. Этот оптический прибор построен и испытан. С его помощью получены данные о спектре капель в районе Эльбруса (см.: Физика облаков. Под ред. А. Х. Хргиана. Гидрометеиздат, Л., 1961). (Прим. ред.)

подобного типа показывает, что они часто хорошо работают в лаборатории, но оказываются неудачными в полевых условиях.

РАЗМЕРЫ И ЧИСЛО ОБЛАЧНЫХ КАПЕЛЬ

Кто не видел облаков самого различного типа — от огромных грозовых туч до тонких слоев тумана? Правда, туман обычно не относят к понятию «облако», но тем не менее он обладает большинством свойств облаков. Вы, вероятно, наблюдали тонкие темные однородные облака, получившие название «слоистых». Их можно рассматривать как туман, поднявшийся на несколько сотен метров над поверхностью земли.

Спектр размеров капель облака различен не только для разных типов облаков. Он различен и для облаков одного и того же типа. Фактически характеристики капель даже одного и того же типа облаков изменяются в широких пределах в зависимости от района и времени взятия пробы. Но при всех этих колебаниях спектры капель облаков различных типов существенно отличаются друг от друга. На рис. 6 показано число капель разных размеров для трех видов кучевых облаков.

Кучевые облака хорошей погоды — это небольшие белые пушистые облака. Их толщина редко достигает 1000 м, чаще же она не превышает 300 м. Эти облака никогда не дают дождя. Кучевые облака состоят из большого числа очень мелких капель. Максимальный диаметр их в большинстве облаков не превышает 50 микрон, а концентрация — более 300 капель в 1 см^3 .

В мощных кучевых облаках, дающих ливни в центральной части США, диаметр капель часто превышает 50 микрон.¹ Зато их концентрация меньше, чем в кучевых облаках хорошей погоды: она колеблется около 200 капель в 1 см^3 .

Размеры капель в кучевообразных облаках над тропическими районами океанов заметно отличаются от размеров, характерных для континентальных облаков. Впрочем, и сами облака во многих отношениях иные. В частности, они могут давать дождь даже при сравни-

¹ В СССР и Западной Европе мощные кучевые облака, как правило, осадками не сопровождаются. (Прим. ред.)

тельно небольшой вертикальной мощности. Наблюдения, выполненные с борта самолета, показали, что здесь основания облаков обычно находятся на высоте около 700 м и что если верхняя граница их простирается до 2500—3000 м, то часто выпадают осадки. Кучевые же облака над сушей редко дают дождь, пока их вершина

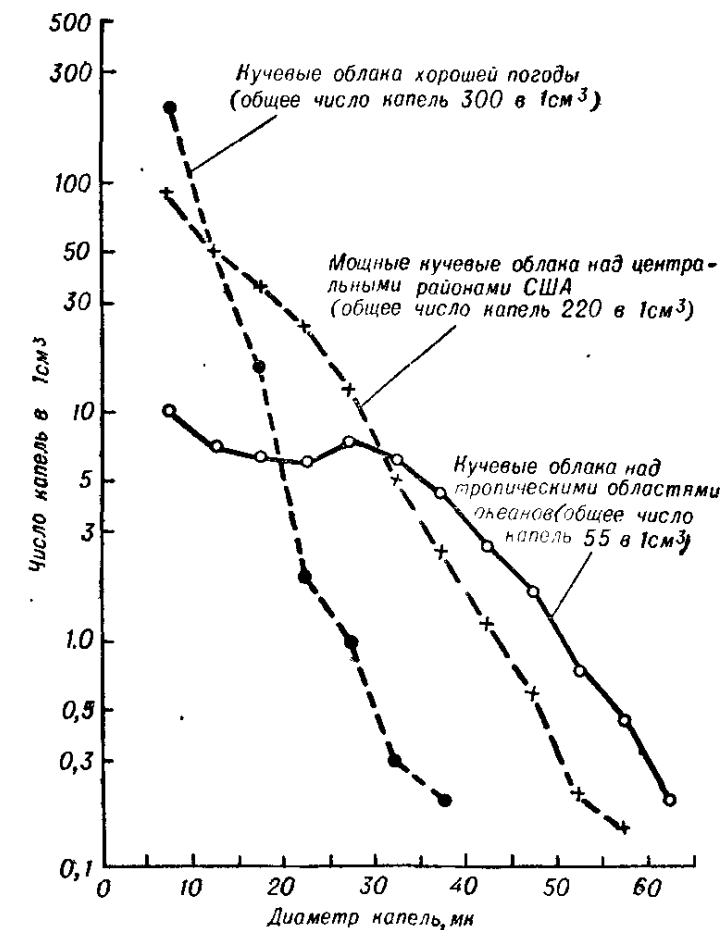


Рис. 6. Спектр размеров капель для трех различных видов облаков.

не достигнет уровня 5000—7000 м. В тропических облаках в 1 см^3 содержится всего лишь 60 капель, но зато в этих облаках обычно присутствует некоторое количество капель диаметром больше 50 микрон. Наличие значительного числа крупных капель в сравнительно тонких облаках может быть объяснено большим количеством гигантских солевых ядер конденсации. К этому вопросу мы подробнее вернемся ниже.

В слоистых облаках капель, как правило, меньше, чем в кучевых. Измерения, выполненные многими исследова-

дователями, показали, что в большинстве слоистых облаков средние радиусы капель лежат в диапазоне 4—10 микрон, а концентрация их колеблется от 200 до 600 в 1 см³. В ливневых облаках средний радиус капель около 20 микрон, концентрация 50—200 капель в 1 см³.

РОСТ ОБЛАЧНЫХ КАПЕЛЬ

Каждому знакомо явление конденсации. Мы уже говорили о простом опыте со стаканом ледяной воды. В холодный день вы можете легко наблюдать процесс конденсации: при дыхании образуется облачко, состоящее из мельчайших капелек воды. Водяные пары находятся в воздухе, выдыхаемом из ваших легких. Можно привести множество других примеров конденсации: белое облако над паровозом, жемчужно-белый след самолета, летящего на большой высоте.

Конденсация — это процесс, при котором молекулы водяного пара слипаются в достаточно большие группы, образуя жидкую воду. Когда мы имеем дело с большими поверхностями, достаточно знать свойства и температуру поверхности, а также температуру и относительную влажность воздуха, чтобы объяснить физическую сущность конденсации.

Представим себе теплый день, когда температура воздуха 26°С, а относительная влажность 50%. Возьмем стакан, наполним его ледяной водой и поставим на стол. Воздух, соприкасающийся со стаканом, тотчас же начнет охлаждаться. Но по мере охлаждения воздуха его относительная влажность повышается, даже если в него не поступают водяные пары.

Чтобы понять, почему это происходит, отвлечемся на время и исследуем свойства воздуха и водяного пара. Пусть у нас имеется закупоренная банка с небольшим количеством воды на дне. Если относительная влажность воздуха в банке, когда мы наливали в нее воду, составляла 50%, то вода должна испаряться. Молекулы водяного пара будут вырываться из жидкости в воздух, а некоторые молекулы водяного пара будут поступать из воздуха в воду, но таких окажется меньше. Постепенно число молекул водяного пара в воздухе будет возрастать, а относительная влажность повышаться. В результате будет уменьшаться разница

между количеством молекул, переходящих из воды в воздух и наоборот. Это в свою очередь приведет к тому, что скорость увеличения влажности воздуха будет уменьшаться. Рисунок 7 иллюстрирует процесс роста влажности со временем. Когда кривая достигает уровня, соответствующего 100%, воздух становится насыщенным. В этой точке создается равновесие: число молекул водяного пара, переходящих из воды в воздух, в точности равно числу молекул, поступающих из воздуха

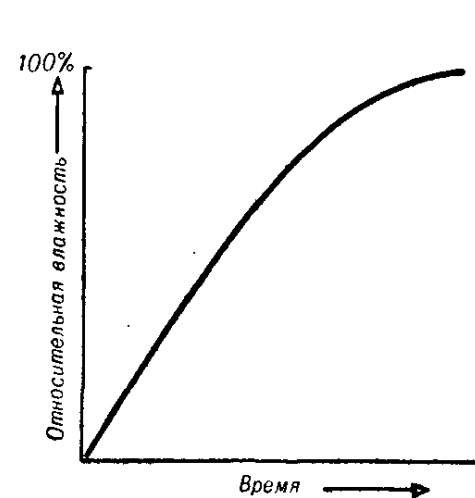


Рис. 7. Зависимость относительной влажности от времени при испарении воды в сухой воздух.

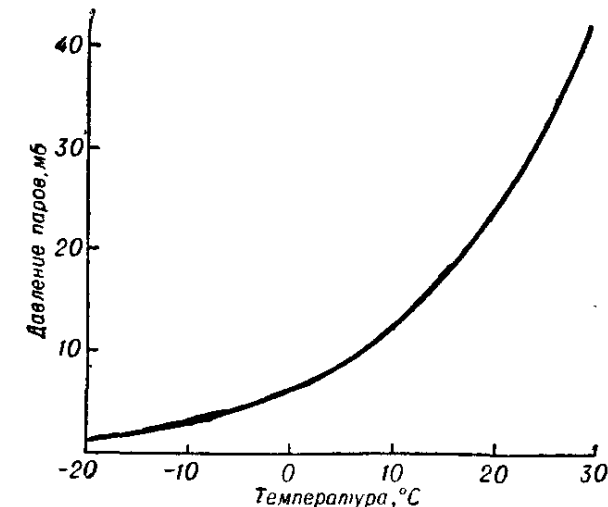


Рис. 8. Зависимость упругости насыщающих паров от температуры.

в воду. Количество водяных паров в воздухе можно определить, измеряя их давление (или, как часто говорят, упругость). При насыщении это будет так называемая упругость насыщающих паров.

Хорошо известно, что количество паров воды, которое может находиться в воздухе, зависит от его температуры. Чем выше температура, тем выше и упругость насыщающих паров (рис. 8).

В описанном выше эксперименте предполагалось, что температура остается неизменной. Если, после того как воздух достигнет состояния насыщения, банку поместить в холодильник, чтобы понизить ее температуру, молекулы водяного пара вновь начнут возвращаться в воду. При более низкой температуре упругость (давление) насыщающих паров в воздухе уменьшается, а следовательно, уменьшается и количество молекул водяных паров, которые он может содержать.

ТОЧКА РОСЫ

Вернемся теперь к примеру со стаканом ледяной воды. Так как воздух, окружающий стакан, охлаждается, его относительная влажность возрастает. Через некоторое время она достигнет 100% и наступит насыщение. Дальнейшее охлаждение означает, что воздух становится пересыщенным, т. е. в нем будет молекул пара больше, чем в условиях насыщения. Эти молекулы начинают оседать на поверхности стакана, чтобы вернуть воздух в насыщенное состояние. Все время, пока будет падать температура, будет продолжаться процесс конденсации. Конечно, в нашем примере влажный воздух вблизи стакана непрерывно замещается новыми порциями воздуха. Следовательно, процесс конденсации будет непрерывно продолжаться, и на скатерти образуется мокрое пятно. Если приток воздуха ограничен, то, несмотря на понижение температуры воздуха вокруг стакана, конденсация постепенно замедлится.

Тот момент в процессе охлаждения, при котором начинается конденсация, называется *точкой росы*. Он наступает тогда, когда относительная влажность достигает 100%. Температура воздуха, при которой начинается конденсация, носит название *температуры точки росы*. Эта величина зависит от температуры воздуха, содержания влаги и давления. В описанном выше случае, а именно когда температура 26°С и относительная влажность 50%, температура точки росы при нормальном атмосферном давлении равна 15°С.

На постепенно охлаждаемой совершенно чистой металлической или стеклянной поверхности конденсация начинается в тот момент, когда температура этой поверхности становится равной температуре точки росы воздуха. Правда, в случае очень маленьких поверхностей, которые образованы веществами, обладающими сродством к водяным парам, ситуация значительно усложняется.

Прежде всего отметим, что при очень мелких каплях (радиусом, меньшим приблизительно 1 микрона) размеры последних сказываются на значении упругости насыщающих паров. Для того чтобы маленькая капелька находилась в равновесии с окружающим воздухом, относительная влажность должна быть выше 100%.

Например, если имеется чистая вода, то лишь при относительной влажности выше 140% капли радиусом 0,003 микрона смогут избежать мгновенного испарения. По мере увеличения размера капель равновесная относительная влажность будет постепенно приближаться к 100%.

В атмосфере относительная влажность редко превышает 101%, и даже это однопроцентное пересыщение возникает только при очень больших вертикальных перемещениях воздуха во время гроз. Как же все-таки образуются капли? Дело в том, что стремлению очень маленьких капель испариться противостоит стремление некоторых веществ удерживать молекулы воды. Крупинка морской соли как бы испытывает особую любовь к воде. Как мы уже говорили, для того чтобы началась конденсация на чистой металлической или стеклянной поверхности, необходима относительная влажность 100%. На частице же морской соли или другого гигроскопического вещества конденсация может происходить уже при влажности 50—60%.

Рисунок 9 иллюстрирует роль, которую играет частичка соли в росте капли. Пунктирная кривая характеризует те значения относительной влажности над плоской поверхностью, которые необходимы для поддержания в равновесии водяных капель радиусами, показанными на горизонтальной прямой. Легко заметить, что, чем меньше размеры капель, тем выше должно быть пересыщение, чтобы «спасти» капли от испарения. Сплошной кривой показана относительная влажность, которая требуется для поддержания равновесия над каплей, начавшей расти на ядре соли радиусом 0,5 микрона.

Когда крупинка соли такого размера попадает

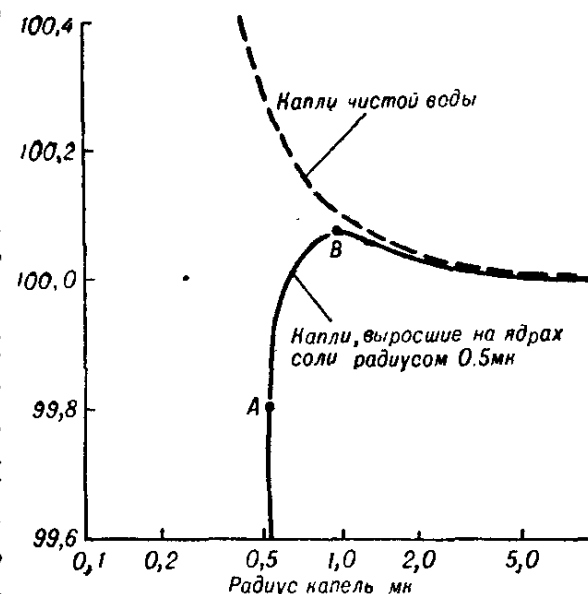


Рис. 9. Равновесная относительная влажность для капель воды и соляного раствора как функция диаметра капель (график построен для температуры 0°С).

В воздух с относительной влажностью 99,8%, конденсация будет происходить на ней до тех пор, пока капля не вырастет до размера, отмеченного точкой А. В этот момент капелька окажется в равновесии с окружающей средой и будет сохранять этот размер, пока не изменится влажность. Если влажность возрастет до 100,1%, конденсация и рост капли возобновятся. Как только радиус капли «перевалит через гребень» на кривой (точка В), капля будет продолжать расти все время, пока относительная влажность больше 100%. К тому моменту, когда размер капли превысит 2 микрона, влияние ее размера, а также раствора соли станет настолько малым, что капля будет вести себя так же, как ровная поверхность чистой воды. Когда это случится, создастся положение, в некоторых чертах напоминающее случай со стаканом ледяной воды. Конденсация будет продолжаться, пока воздух пересыщен (в отношении чистой воды).

До сих пор речь шла о поведении капель, обусловленном значением относительной влажности окружающего воздуха. Чтобы получить более ясное представление об этом процессе, вдумайтесь в эту формулу:

$$\text{Относительная влажность} = \frac{\text{Фактическая упругость паров}}{\text{Упругость насыщающих паров}} \times 100.$$

Уже отмечалось, что упругость паров служит мерой количества молекул водяного пара в воздухе. Можно также говорить об упругости пара у поверхности жидкости. Она равна упругости насыщающих паров в непосредственной близости от поверхности и зависит лишь от температуры. Когда воздух вокруг водяной капли пересыщен, т. е. когда относительная влажность больше 100%, упругость паров в воздухе выше, чем в случае насыщения. В результате возникает сила, заставляющая молекулы пара перемещаться из области более высокой упругости в область более низкой упругости, а именно из воздуха в воду. В этом и состоит динамика процесса.

Конденсацию и испарение капель любого размера, формы и состава можно рассчитать, если известно распределение упругости паров вокруг капли.

Резюмируя, можно сказать, что рост отдельной капельки зависит от ее размеров, состава ядра и влажности воздуха. Когда относительная влажность повышается до достаточно большой величины, начинается кон-

денсация паров. Если относительная влажность поддерживается на уровне, несколько превышающем 100%, конденсация будет продолжаться и могут образоваться капли, из которых состоит облако.

Здесь у любознательного читателя могут возникнуть вполне резонные вопросы. Что заставляет большие массы воздуха охлаждаться до температур, при которых образуются облака, застилающие небо? Что происходит, когда миллионы ядер почти одновременно активируются в охлаждающейся массе воздуха? Эти и некоторые другие вопросы будут рассмотрены в следующем разделе.

РОСТ ОБЛАКА

Природа располагает различными способами охлаждения воздуха до температуры, при которой могут образовываться облака. В ясные ночи большое количество тепла излучается вверх нижними слоями атмосферы. Когда слои воздуха вблизи земной поверхности достаточно влажные, а более высокие слои — сухие, наблюдается резкое охлаждение поверхности земли и приземного слоя воздуха. При некоторых условиях охлаждение продолжается до тех пор, пока не будет достигнута температура точки росы. Когда же это случается, образуется туман. Вы, вероятно, замечали, что туман возникает в первую очередь в низких местах — по обочинам дорог, в долинах и т. д. Это объясняется тем, что холодный воздух, как более тяжелый, заполняет впадины на местности.

Туманы возникают и тогда, когда теплый влажный воздух перемещается над холодной водой. В этом случае воздух охлаждается, отдавая свое тепло воде. Если температура воздуха понижается до точки росы, происходит конденсация и образуется туман.

Еще один вид тумана возникает при прохождении холодного воздуха над поверхностью теплой воды. В этом случае конденсация обусловлена тем, что холодный воздух получает дополнительное количество водяных паров, достаточное для его насыщения. Это напоминает эффект, создаваемый паровым двигателем.

Хотя перечисленные процессы, обуславливающие увеличение относительной влажности, часто приводят к образованию тумана, но наиболее важную роль в образова-

нии облаков, несомненно, играет вертикальное перемещение больших масс воздуха.

Хорошо известно, что с высотой давление падает. Когда массы воздуха поднимаются, они переходят из области сравнительно высокого давления в область более низкого давления. При этом воздух расширяется, значит, его температура понижается. Можно вычислить величину охлаждения воздуха в результате подъема его на определенную высоту. Сухой воздух, если он не получает и не отдает тепла во время перемещения, охлаждается на 1°C при подъеме на каждые 100 м. Эта величина называется сухоадиабатическим градиентом. Термин «адиабатический» означает, что данная масса воздуха не получает и не теряет тепла за счет излучения или теплопроводности. Термин «градиент» означает скорость, с которой температура изменяется в зависимости от высоты.

По мере того как воздух поднимается и его температура понижается, относительная влажность воздуха растет, пока не наступит насыщение и не начнется конденсация. Это обстоятельство можно использовать при определении высоты основания облаков. Замечали ли вы, что основание летних кучевых облаков обычно представляет собой ровную, почти горизонтальную поверхность? Это свидетельствует о том, что воздух вблизи нижней границы облаков довольно однороден; подъем повсеместно вызывает насыщение и конденсацию.

Когда облака начали образовываться, эффекты, вызываемые расширением поднимающегося воздуха, частично компенсируются за счет тепла, выделяющегося во время конденсации. Всем известно, что испарение приводит к охлаждению. Когда вы выходите из ванной или из бассейна на свежий воздух, испарение воды охлаждает ваше тело, иногда вызывая даже озноб. Конденсация же приводит к обратному эффекту — тепло выделяется. Количество тепла не зависит от того, происходит испарение или конденсация. Это так называемая *скрытая теплота испарения*; она равна приблизительно 600 кал. на 1 г воды.

Температура поднимающейся массы воздуха, в котором происходит конденсация, понижается со скоростью примерно $0,6^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м. Именно выделением скрытой теплоты объясняется тот факт, что градиент для

насыщенного воздуха на $0,4^{\circ}\text{C}$ меньше, чем при адиабатическом подъеме сухого воздуха.

Если скорость подъема воздуха, которую можно назвать *скоростью восходящего потока*, достаточно велика, охлаждение может происходить столь быстро, что конденсация будет запаздывать. В этом случае воздух становится пересыщенным. Однако, как мы уже отмечали, пересыщение даже в исключительных условиях вряд ли способно превысить 1%.

В движущемся вверх воздухе находятся миллионы ядер конденсации различных типов (глава 2). Некоторые из них гигроскопичны и притягивают молекулы водяного пара, другие же с трудом смачиваются. Тщательное изучение роста капель в таких условиях выполнил в 1948 г. У. Хауэлл из Массачусетского технологического института (США). Он взял фактическое распределение ядер и рассчитал, как они должны расти при той или иной скорости подъема. Эта работа сводилась к решению сложной системы уравнений, которые учитывали размер и состав ядер, изменение концентрации раствора солей в капельках, скорость переноса тепла во время их роста и взаимодействие капелек. Хауэлл установил, что вначале растут капли, возникшие на больших ядрах, но по мере того как воздух становится слабпересыщенным, конденсация начинается и на ядрах меньшего размера.

Из уравнений следует, что, когда процесс начался, меньшие по размеру капли растут быстрее, чем более крупные. В конце концов облако оказывается состоящим из капель, размеры которых близки друг к другу.

Как упоминалось выше, в действительности размеры облачных капель колеблются в гораздо более широких пределах. Этот результат противоречит расчетам Хауэлла и других исследователей. Однако Хауэлл не учитывал наличия гигантских ядер, а ведь их присутствием можно было бы объяснить существование наиболее крупных облачных капель. Другие ученые предполагают, что разнообразие размеров облачных капелек объясняется также столкновением между ними.

В итоге можно сделать вывод, что облака, которые мы видим ежедневно, обычно являются указателями областей, где воздушные массы поднимаются и где происходит конденсация на ничтожно маленьких ядрах кон-

денсации. Форма облаков зависит от характера вертикальных движений. В следующей главе будут рассмотрены типы облаков и причины их образования.

ГЛАВА 4 ТИПЫ ОБЛАКОВ

Облака различаются по размерам, форме и составу. Временами небо выглядит как беспорядочная смесь облаков белого и серого цвета, при этом различные их виды движутся в разных направлениях в зависимости от ветра, наблюдающегося на той или иной высоте. Изучение внешнего вида облаков убедительно показывает, что существуют четко различающиеся типы. Этот факт был использован в 1803 г. Л. Говардом (Англия), который предложил свою классификацию облаков. За год до этого известный французский ученый Ж. Ламарк также разработал схему классификации облаков.

Система Говарда быстро получила признание; по существу, именно этой системой пользуется наблюдатель погоды в настоящее время.

На основании внешнего вида облаков Говард предложил выделить три основных класса: слоистые, кучевые и перистые. Слоистые облака — это вытянутые по горизонтали плоские образования, которые кажутся совсем однородными. Кучевые облака — это индивидуальные облачные массы, которые развиваются по вертикали в форме вздымающихся холмов, куполов или башен, часто с вершинами, которые похожи на цветную капусту. Перистые облака состоят из ледяных кристаллов; они образуются на большой высоте и обычно похожи на пряди шелка или волос.

Если облака обладают признаками двух из этих основных классов, то это отражается в их названии. Например, когда поверхность облачного покрова волниста или имеет форму сбившихся вместе кучевых облаков, облака называются слоисто-кучевыми.

Новейшая классификация принимает во внимание также высоту облаков. Если облака расположены ниже примерно 2000 м, они именуется облаками нижнего яруса. Если облака расположены на высоте между 2000 и 6000 м, они называются облаками среднего яруса

и к основному наименованию облаков прибавляется приставка «высоко». Поэтому слоистообразные облака на высоте 3000 м называются высоко-слоистыми. Облака, которые лежат выше 6000 м, приобретают приставку «перисто». Например, кучевообразные облака на большой высоте называются перисто-кучевыми.

Когда из слоистого или кучевого облака выпадают осадки в виде дождя или снега, к основному наименованию добавляется слово «дождевой». Это дает такие типы облаков, как слоисто-дождевые и кучево-дождевые.

Как было отмечено выше, разделение облаков на различные категории, о которых мы рассказали, основывается на внешнем виде облаков.

Ф. Ладлем (Англия) рекомендовал классифицировать облака в соответствии с характером движения воздуха, которое ведет к их образованию и росту. Он предлагает четыре основных класса: 1) орографические облака, образующиеся в результате вертикального движения, вызываемого горами или холмами; 2) слоистые облака, возникающие вследствие крупномасштабного неупорядоченного движения воздуха; 3) слоистые облака, появляющиеся в результате крупномасштабного упорядоченного подъема воздуха; 4) кучевообразные облака, возникающие вследствие «проникающей конвекции» — термин, который будет пояснен в дальнейшем.

ОРОГРАФИЧЕСКИЕ ОБЛАКА

Когда воздух движется над горным районом, происходит нарушение его горизонтального течения и возникает волнообразное искривление линий тока (рис. 10).

Облака, похожие на гигантские линзы, часто зарождаются в районе подъема воздуха (фото II). Если эти облака исследовать при помощи киносъемки, которая ускоряет ход процесса, то окажется, что они образуются на наветренной стороне и исчезают на подветренной. В восходящем потоке скорость от 60 до 600 м/мин. — обычное явление. Хотя облако может «стоять» над какой-либо точкой местности часами, время жизни любой облачной капельки составляет лишь 10 минут.

Важную роль играют горы и в образовании кучевых и кучево-дождевых облаков. Дело в том, что горы действуют еще и как источник тепла. Освещенные солнцем

склоны нагреваются до температуры более высокой, чем температура воздуха в атмосфере на той же высоте над равниной. В результате более теплый и, естественно, более легкий воздух приобретает дополнительное ускорение, вследствие чего могут сформироваться большие облачные массы.

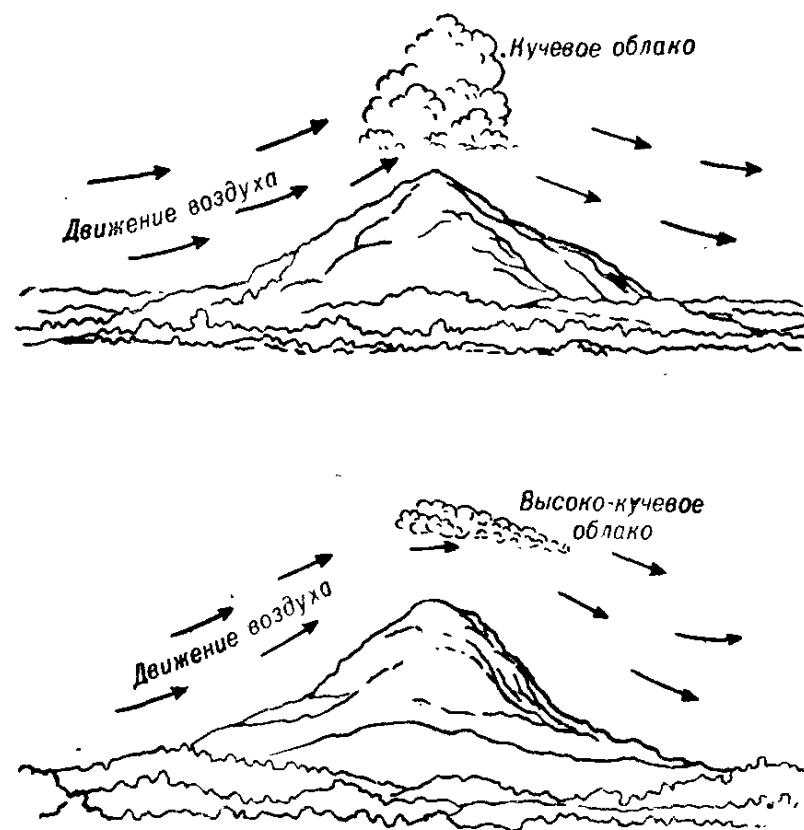


Рис. 10. Воздействие гор на образование облаков.

Вверху — летом при натекании влажного и неустойчивого воздуха образуются кучевообразные облака.

Внизу — при натекании устойчивого воздуха возникают облака в виде линзы.

СЛОИСТЫЕ ОБЛАКА

В предыдущей главе мы установили, что в результате охлаждения воздуха у земной поверхности может образоваться туман. Когда наблюдается умеренный или сильный ветер, движение воздуха вблизи поверхности вынуждает туман подниматься вверх и может возникнуть вытянутый по горизонтали однородный облачный слой (слоистое облако). Изменения в характере верти-

кальных движений воздуха может привести к возникновению волн или «гряд», и облако станет слоисто-кучевым (фото III).

На картах погоды почти всегда можно увидеть области низкого давления и так называемые фронты. Фронт — это граница, разделяющая теплый и холодный воздух. В зоне фронта теплый воздух скользит вверх вдоль фронтальной поверхности (рис. 11). Это приводит к возникновению упорядоченного восходящего движения воздуха над очень большими площадями. Скорость подъема равна всего 6—12 м/мин.,¹ но поскольку она может сохраняться в течение многих часов, воздух поднимается на несколько тысяч метров. Перед теплым фронтом часто можно видеть перистые облака, подобные показанным на фото IV. Чем ближе фронт, тем плотнее и ниже облака.

Мощная облачность иногда бывает связана с областями низкого давления даже тогда, когда никакого фронта нет. Это происходит в результате сходимости воздушных потоков вблизи от поверхности земли. При этом воздушные массы, избегая сжатия, начинают подниматься. Как и в случае теплого фронта, подъем происходит достаточно медленно и может продолжаться долгое

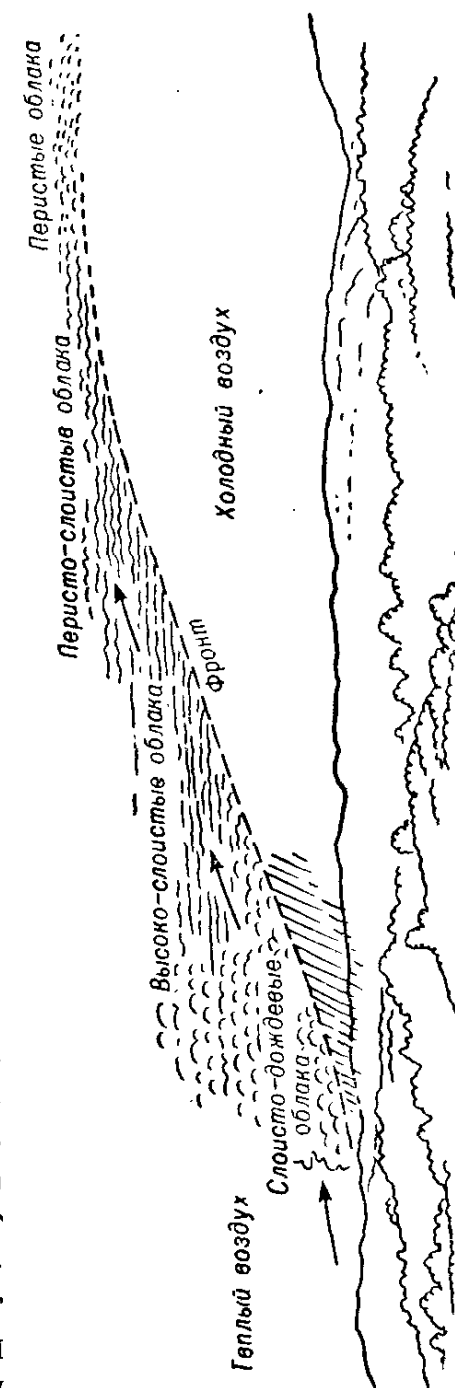


Рис. 11. Схема облачной системы теплого фронта.

¹ Вертикальные скорости в области фронта автором явно преувеличены. Обычно они не превышают 1—3 м/мин. (Прим. ред.)

время. Таким путем могут возникать слоистые облака над большой территорией, вызывая пасмурную погоду в течение ряда дней.

КУЧЕВООБРАЗНЫЕ ОБЛАКА

Наиболее эффективные облака — это кучево-дождевые, или грозовые. Летом они часто приносят ливни, град и грозы. Такие облака порождаются быстрым подъемом сравнительно небольших масс воздуха. Мы используем термин «проникающая конвекция», чтобы подчеркнуть ту мысль, что малый объем поднимающегося воздуха (облака) пронизывает по вертикали большую область относительно спокойной окружающей среды. Началом возникновения облаков этого типа обычно является движение вверх относительно перегретого воздуха от поверхности земли. После начала подъема масса теплого воздуха может оказаться в неустойчивом состоянии и продолжать свое движение вверх. Это связано с меньшей плотностью, а значит, и весом теплого воздуха в сравнении с окружающей средой.¹

Иногда образуются только плоские кучевые облака. Обычно, по мере того как облака вырастают до больших высот, окружающий сухой воздух смешивается с облачными массами, что приводит к их охлаждению вследствие испарения облачных капелек. Когда это случается, облако перестает расти и испаряется. Малые кучевые облака обычно существуют лишь 5—15 минут.

В тех случаях, когда атмосфера очень влажна и неустойчива, скорость подъема воздуха с высотой может увеличиваться (фото V). В результате этого возникает вертикальный поток воздуха со скоростью 1200 м/мин. Облако при своем развитии может достичь высоты 18 км и таким образом как бы встает в стратосферу.² Поскольку нижняя часть стратосферы состоит из очень устойчивого воздуха, здесь вертикальные движения замирают. Часто это заставляет вершину облака растечься

¹ Для более подробного ознакомления с развитием грозовых облаков см.: L. J. Battan. The nature of violent storms. Science Study Series, New York, 1961.

² Высоты, приведенные автором, относятся только к тропической и субтропической зонам. Севернее широты 40—45° верхняя граница конвективной облачности почти никогда не превышает 12 км. (Прим. ред.)

в стороны, вследствие чего образуется «наковальня» (фото VI). Нижняя часть облака, подобного показанному на фото VI, состоит из водяных капелек, а «наковальня» — из ледяных кристаллов. Процесс образования ледяных кристаллов мы рассмотрим в следующей главе.

ГЛАВА 5

ЛЕДЯНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Рост ледяных кристаллов в атмосфере — одно из чудес природы. Мы увидим дальше, что основная форма кристаллов льда шестиугольная, но она может бесконечно видоизменяться — от плоских пластинок с шестью совершенно прямыми и равными сторонами до шестиконечных звездочек, каждый луч которых состоит из одинаково расположенных сплетенных ледяных игл. Иногда вам попадаются кристаллы в виде шестиугольных призмочек; эта форма называется иглами или столбиками.

Весьма редко можно увидеть правильные ледяные кристаллы.

Атмосферные условия, в которых образуются кристаллы, могут вызвать их неравномерный рост. Столкновения кристаллов между собой и частичное таяние также являются причиной неправильной формы кристаллов. Правильные кристаллы можно наблюдать в очень холодные дни, когда кристаллы поодиночке, далеко друг от друга медленно падают из облаков. Вы иногда получаете возможность поймать их на рукав вашего пальто и рассмотреть их. В одном из следующих разделов приведены фотографии некоторых типов кристаллов — простого и очень сложного строения. Но давайте сначала выясним, почему вода замерзает, а затем вернемся к ледяным кристаллам.

ЗАМЕРЗАНИЕ ВОДЫ

Если «абсолютно чистую» воду налить в «абсолютно чистый» сосуд и охладить их до «точки замерзания», т. е. до 0° С, то вода не замерзнет. Более того, если продолжать понижать температуру, то вода может не замерзнуть и при —10° С и даже при —32° С. Правда, опыт, подобный описанному, никогда не был осуществлен. Никто не представляет себе, где взять «абсолютно чистую» воду

или «абсолютно чистую» посуду. Новейшие лабораторные методы позволяют получить очень чистую воду и очень чистую стеклянную посуду, но нет никакой уверенности, что все примеси полностью удалены.

С помощью самой стерильной аппаратуры удалось установить, что воду можно переохладить до температур значительно ниже 0°C . Величина переохлаждения зависит от количества воды: чем меньше воды, тем ниже температура, при которой наступает замерзание. Рисунок 12 показывает зависимость средней температуры замерзания от размера водяных капель. Опыты многих ученых во всем мире, в особенности Дорча и Хэккера (США) и Бигга (Австралия), дали следующую картину. Когда температура понижается примерно до -39°C , то те капельки, которые еще не замерзли, быстро превращаются в лед. В. Шефер из лаборатории «Дженерал электрик» (Нью-Йорк) первым обнаружил в 1946 г., что даже мельчайшие водяные капли замерзают при этой температуре.

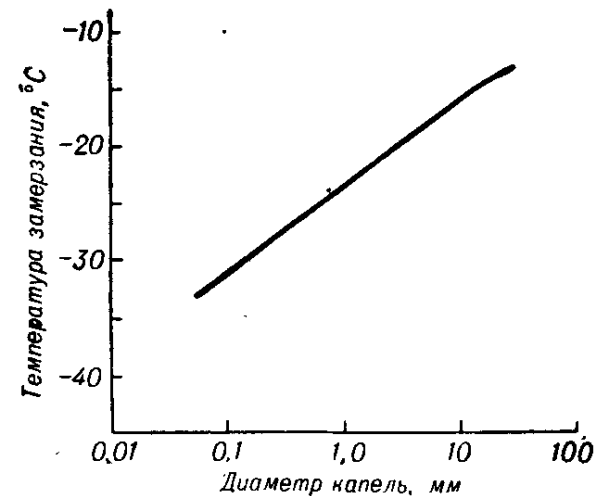


Рис. 12. График приближенной зависимости температуры замерзания чистой воды от размера капли (по Биггу).

чайшие водяные капли замерзают при этой температуре.

Есть основания считать, что к постепенному понижению температуры замерзания с уменьшением диаметра капли и к внезапному замерзанию капелек при температуре примерно -39°C приводят различные причины.

Было высказано предположение, что, чем больше объем воды, тем больше вероятность присутствия в ней особого типа частиц, на которых лед начинает расти уже при умеренном переохлаждении. Такие частицы называются ядрами кристаллизации.

При отсутствии таких ядер лед может возникать только путем случайной группировки большого числа молекул воды в агрегаты, напоминающие лед. Б. Дж. Мэйсон, выдающийся английский специалист по физике облаков,

был одним из первых исследователей, кто подробно изучил это явление.

Выясним, как идет процесс замерзания «чистой» воды.

Водяной пар состоит из отдельных молекул, расположенных далеко друг от друга и не связанных между собой; другими словами, молекулы пара могут двигаться, не оказывая влияния друг на друга. Когда молекулы водяного пара объединяются, образуя жидкость, т. е. воду, они становятся более связанными друг с другом. Молекулы могут свободно перемещаться, например, когда сосуд с жидкостью наклоняется. Когда вода замерзает, молекулы ее жестко связываются в конфигурацию, определяемую структурой молекул. Атомы водорода и кислорода, которые составляют молекулу воды H_2O , выстраиваются в плотную, упорядоченную структуру.

Переход из жидкого состояния в твердое сопровождается понижением температуры вещества. По мере того как вода становится холоднее, отдельные молекулы ее движутся медленнее и для атомов водорода и кислорода увеличивается вероятность занять то положение, которое соответствует жесткой правильной структуре. Когда заметное количество молекул занимает подобное положение, они действуют как ядро, к которому присоединяются другие молекулы, и вода начинает замерзать. Чем ниже температура, тем больше вероятность образования ядер такого типа.

Расчеты показывают, что вероятность быстро увеличивается, когда температура падает ниже -39°C . Вот почему невозможно переохладить чистую воду ниже этой температуры. При более высокой температуре образование льда обычно вызывается твердыми частицами, на которых молекулы воды могут принимать нужное положение.

ЯДРА ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Примерно 50 лет назад немецкий ученый А. Вегенер первым предположил, что определенные мельчайшие частицы в атмосфере могут вызывать образование ледяных кристаллов. Он наблюдал образование ледяных кристаллов, когда температура падала ниже точки замерзания и влажность была достаточной для насыщения воздуха. Вегенер назвал эти частицы *ядрами сублимации*. Он счи-

тал, что ядра сублимации действуют так же, как ядра конденсации, описанные в главе 2. Вегенер предполагал, что вода переходит из газообразного в твердое состояние, если воздух насыщен по отношению ко льду. Что же все это значит?

В главе 3 мы познакомились с понятием «воздух, насыщенный водяным паром». Когда воздух насыщен, над поверхностью воды в закрытом сосуде содержится максимальное число молекул воды. Если с поверхности воды вырывается некоторое количество молекул, то такое же их число переходит из воздуха в воду. Давление пара в этом случае зависит только от температуры и может быть определено из хорошо известного уравнения.

Если сосуд внезапно охладить до температуры, скажем, -10°C и вода сразу замерзнет, то давление пара в воздухе на очень короткий промежуток времени останется прежним. Но у поверхности льда давление пара будет меньше, чем оно было у поверхности воды. В замерзшей воде молекулы связаны прочнее, чем в жидкой, поэтому они не могут вырываться изо льда так же легко, как из воды. В результате упругость пара над поверхностью льда окажется меньше, чем над поверхностью воды при той же температуре. Поскольку упругость пара в воздухе выше, чем у поверхности льда, молекулы водяного пара должны перемещаться в направлении льда. Эта «миграция» молекул воды будет продолжаться до тех пор, пока упругость пара в воздухе не выравняется с упругостью над поверхностью льда. Когда это состояние будет достигнуто, воздух окажется насыщенным по отношению ко льду.

На рис. 13 показано давление насыщающего пара по отношению к воде и льду в определенном интервале температур. Из хода кривых можно сделать вывод, что при одинаковых температурах упругость насыщающего пара больше над поверхностью воды, чем над поверхностью льда. Этот факт крайне важен для объяснения возникновения ледяных кристаллов и снежинок.

Вернемся теперь к открытию ядер кристаллизации. Вегенер пришел к заключению, что такие частицы действуют как ядра сублимации, когда воздух, окружающий их, насыщен по отношению ко льду. После опубликования первого исследования Вегенера ряд ученых поддерживал его идеи. Другая группа исследователей на

основании своих собственных работ пришла к выводу, что кристаллы редко удается получить, если не достигнуто насыщения по отношению к воде. В одной из теорий предполагается, что кристаллизация происходит тогда, когда ядро кристаллизации захватывается переохлажденной каплей воды.

Согласно современным представлениям, переохлажденная капля замерзнет, если она захватит частицу

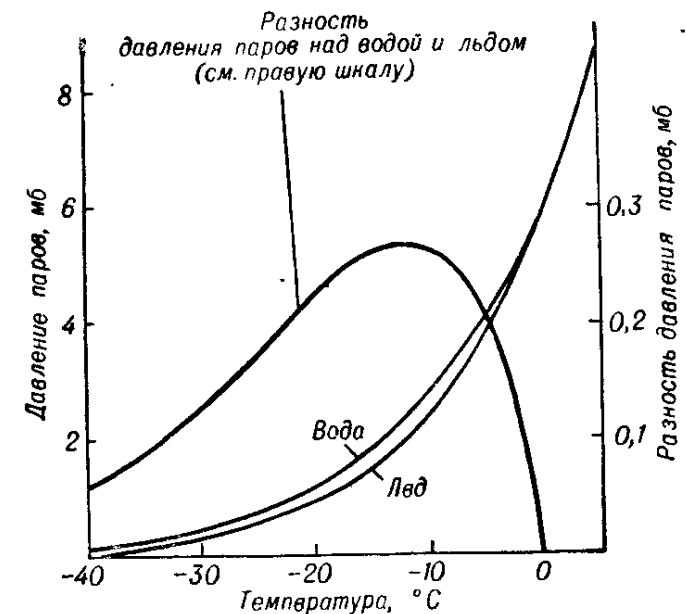


Рис. 13. Изменение упругости насыщающего пара над поверхностью льда и воды.

Жирная кривая показывает разность давлений над льдом и водой. Эта разность достигает максимального значения при -12°C .

определенного типа. Однако на некоторых ядрах при наличии очень тонкой пленки воды, покрывающей их поверхность, ледяные кристаллы возникают непосредственно. Толщина такой пленки пока неизвестна, но есть основание считать, что на ядре должен быть слой воды толщиной примерно в пять молекул. Такой тонкий слой воды может быть даже в том случае, если воздух полностью насыщен по отношению к воде. В условиях низких температур такая пленка может замерзнуть и стать основой, на которой могут нарастать новые слои льда.

Количество ядер кристаллизации в атмосфере тесно связано с температурой. С понижением температуры все больше и больше частиц становятся ядрами. Ри-

сунок 14 показывает, как изменяется концентрация ядер с изменением температуры, измеренной летом в штате Аризона (США). Подобные же наблюдения неоднократно проводились во многих районах мира. Не все они согласуются между собой. Эти расхождения вызыва-

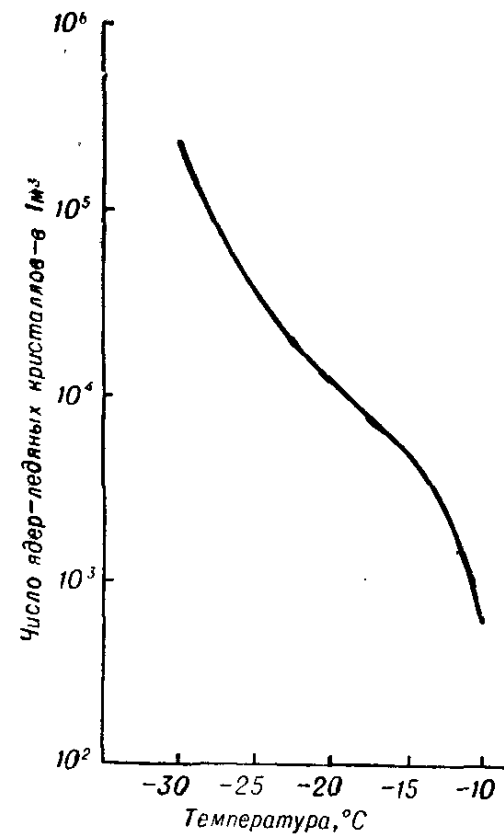


Рис. 14. Среднее распределение природных ядер кристаллизации при различных температурах (штат Аризона, США).

Недавно Боуэн (Государственная научная и промышленная исследовательская организация, Австралия) высказал гипотезу, что главным источником ядер является космическая пыль. Он предположил, что, поскольку Земля движется через области метеорных потоков, она «сметает» огромное количество мельчайших частиц, которые оседают в атмосфере и действуют как ядра кристаллизации. В этой гипотезе не доказывается, что частицы

¹ В настоящее время установлено, что и конденсация и замерзание обусловлены наличием только ядер конденсации при соответствующих условиях температуры и влажности. (Прим. ред.)

ваются разными причинами, и прежде всего физико-географическими различиями районов наблюдений. Кроме того, существенно различаются методы наблюдений. Тем не менее большинство наблюдений показывает, что пока температура не упадет ниже -15°C , концентрация ядер редко превышает 10 000 в 1 м^3 , а обычно бывает много меньше этого значения. При более низких температурах концентрация ядер увеличивается.

ИСТОЧНИКИ ЛЕДЯНЫХ ЯДЕР¹

Основные источники атмосферных ледяных ядер пока неясны. Откуда они поступают — с поверхности Земли или из космического пространства?

метеорной пыли являются хорошими ядрами кристаллизации. Основное обоснование гипотезы Боуэна — статистика выпадения дождей. Боуэн и другие исследователи нашли, что если принять во внимание дожди, выпадающие на всем земном шаре, то можно выявить отчетливые максимумы, приходящиеся на определенные даты, например 2 февраля или 13 марта. В общем максимумы дождей наступают примерно через 30 дней после того, как Земля проходит через область скопления метеорной пыли. Хотя взгляды Боуэна и не получили поддержки, однако считать их опровергнутыми нельзя.

Вероятнее всего, что ядра кристаллизации состоят из частичек загрязнений определенного типа. Наиболее важный шаг к разгадке этой тайны природы сделали японские ученые, в особенности М. Кумаи. Он помещал ледяные кристаллы на экран электронного микроскопа. После таяния этих кристаллов Кумаи обнаружил ядра и сумел проанализировать большинство из них.

В своей первой работе на эту тему (1951 год) Кумаи сообщил, что 35 из 43 ядер состояли из частичек загрязнений.

Эффективность частичек загрязнений в качестве ядер кристаллизации была исследована и с другой точки зрения. В. Шефер собрал образцы различных типов загрязнений и исследовал их в лаборатории. Он нашел, что частицы различных видов глины являются активно действующими ядрами кристаллизации. Наиболее эффективными оказались частицы каолина и монтмориллонита. Дж. Мак-Дональд (Аризонский университет) провел подобное же исследование и сумел доказать, что поднимаемой и переносимой ветрами пыли из пустынь всего мира было бы в общем достаточно для образования в атмосфере ядер, которые порождают ледяные кристаллы при температуре около -15°C .

РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В природе ледяные кристаллы имеют очень разнообразную форму. Фото VII наглядно показывает это разнообразие. Наиболее четко выделяются иглы, пла-

стинки и так называемые дендритные кристаллы¹, имеющие лучи.

Было доказано, что форма кристалла не зависит от природы или размеров ядер. В этом случае определяющими факторами являются влажность и особенно температура воздуха, в котором происходит рост кристаллов. Игольчатые кристаллы возникают чаще всего при температуре около -5°C . Пластинки, как правило, образуются при температурах от -10 до -20°C , особенно если упругость паров не слишком велика. Дендритные кристаллы образуются во влажном воздухе с температурой около -15°C .

При падении на землю кристаллы могут проходить через слои воздуха с различной температурой и влажностью. В результате их рост может происходить весьма различно. Иногда наблюдаются иглы с плоскими пластинками, выросшими на концах иголок перпендикулярно к ним. Бывают и другие, еще более сложные формы.

Когда ледяные кристаллы сталкиваются, они часто примерзают друг к другу. Если их слипается много, то образуются снежные хлопья. В тех случаях, когда температура достаточно низка и во время падения хлопьев таяние не происходит, в хлопьях удается различить отдельные кристаллы. При температуре выше 0°C снежные хлопья тают и достигают земли в виде дождя. В главе 6 процесс образования дождя будет рассмотрен подробнее.

ГЛАВА 6

ОБРАЗОВАНИЕ СНЕГА И ДОЖДЯ

Для человека атмосфера — источник хорошего и дурного. Нас восхищают своей красотой облака, когда во время заката они окрашиваются в сверкающие оранжевые и красные тона. Не меньше радости доставляет нам филигранная красота ледяных кристаллов. С другой стороны, свирепый ураган, гроза или градины величинной с апельсин могут испугать кого угодно.

¹ Дендритные кристаллы представляют собой звездочку. Нарастание новых ледяных отложений происходит в направлении радиусов. (Прим. ред.)

Пожалуй, самое обычное явление погоды — это дождь. Конечно, сельский житель, чей урожай гибнет на полях из-за засухи, или жители города, источники водоснабжения которого иссякают, с радостью приветствуют ливень, но обычно реакция на дождь не столь эмоциональна. Снег и дождь похожи на старых друзей. Все мы всегда рады еще раз встретиться с ними, даже если они не приносят с собой ничего особенного. Подобно старым друзьям, они играют крайне важную роль в нашей жизни.

ДОЖДЕВЫЕ КАПЛИ И ОБЛАЧНЫЕ КАПЕЛЬКИ

Что такое дождевая капля? Чем она отличается от капельки в облаке? Прежде чем говорить о том, как образуется дождевая капля, следует дать ответы на эти вопросы.

Обычно дождевую каплю рисуют в виде груши. Однако теперь мы знаем, что большие дождевые капли больше напоминают круглую булочку (фото VIII). Они плоские у основания и округлые у вершины. Когда капли падают, их форма меняется, как будто вода в капле «пульсирует» вверх и вниз. Поверхностное натяжение воды делает поведение капли чем-то похожим на поведение наполненного водой шара на конце веревки. У очень больших капель пульсация иногда становится настолько сильной, что капля разбрызгивается на множество мелких капелек. Когда мы говорим о поверхностном натяжении, то имеем в виду силу, действующую между молекулами воды и стягивающую их вместе. Вы можете познакомиться с проявлением этой силы, если наполните стакан водой так, чтобы уровень воды стал выше края стакана. Конечно, лить воду надо медленно и осторожно.

Когда капельки воды очень малы (их диаметр меньше нескольких сотых микрона), поверхностное натяжение стягивает воду к центру капельки. В результате капельки приобретают форму правильного шара. Когда капли становятся больше, они деформируются. При диаметре в несколько миллиметров форма, показанная на фото VIII, становится уже правилом.

Типичная дождевая капля имеет радиус 1 мм, т. е. 1000 микрон. В главе 3 уже отмечалось, что средний ра-

диус капельки в облаке примерно 10 микрон. Предположим для простоты, что дождевые капли и облачные капельки шарообразны. Из геометрии известно, что объем шара вычисляется по формуле

$$\text{Объем} = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3,$$

где π — постоянная, равная 3,14, а r — радиус капельки. Подставив в эту формулу величины радиусов облачной капельки и дождевой капли, можно вычислить объем каждой из них. Оказывается, дождевая капля имеет объем, в миллион раз больший, чем облачная капелька. Отсюда следует, что для образования одной дождевой капли должен слиться миллион облачных капелек.

Как отмечалось в главе 3, число облачных капелек в 1 см³ воздуха изменяется примерно от 50 до нескольких сотен. Будем считать, что 100 капелек в 1 см³ — средняя величина. Конечно, дождевые капли гораздо малочисленнее: в 1 м³ их содержится от нескольких сотен до нескольких тысяч. Примем в качестве среднего значения 500 дождевых капель в 1 м³. Эти данные показывают, что облачных капелек примерно в 200 000 раз больше, чем дождевых.

Читатель с математическим складом ума может подумать, что для образования дождевых капель вода должна поступать откуда-то извне. В самом деле, если дождевая капля содержит воду миллиона облачных капелек, но число последних в 1 м³ только в 200 000 раз больше, чем число дождевых капель, то сразу возникает вопрос: хватит ли воды для образования фактически наблюдаемого числа дождевых капель? Это кажущееся противоречие разрешается тем, что область, содержащая облачные капельки, более чем в 10 раз превышает по размерам область, содержащую дождевые капли среднего размера.

Теперь перед нами встает вопрос: каким образом природа объединяет миллион облачных капелек, чтобы образовать каплю дождя?

КОНДЕНСАЦИЯ И ДОЖДЕВЫЕ КАПЛИ

Раньше считали, что дождевые капли по размерам близки к большим облачным капелькам. Конечно, вполне разумно предположить, что если за 10 минут в

результаты конденсации диаметр капелек можно увеличить до 20—30 микрон, то за длительное время капельки могли бы вырасти и до 100 или 1000 микрон в диаметре. Однако на самом деле дождевые капли таким путем не образуются.

По причинам, упомянутым выше, когда рассматривалось образование облачных капелек, процесс конденсации не может продолжаться бесконечно. Мы говорили, что конденсация происходит, когда воздух пересыщен по отношению к растущим каплям облака. Частицы морских солей в растворе притягивают молекулы воды даже тогда, когда относительная влажность меньше 100%. Это происходит потому, что мы измеряем относительную влажность по отношению к чистой воде. Как уже отмечалось, равновесная влажность над раствором соли меньше, чем над чистой водой. По мере того как капля растет, концентрация раствора непрерывно уменьшается. К тому времени, когда капельки вырастут до диаметра в несколько микрон, раствор соли, как правило, становится таким слабым, что капельки, по существу, состоят из чистой воды. При таких условиях капельки будут продолжать расти только тогда, когда воздух пересыщен по отношению к чистой воде, или, другими словами, если относительная влажность превышает 100%. Подобные условия могут наблюдаться в быстро поднимающемся воздухе. Однако чем выше влажность, тем большее число крошечных ядер включается в процесс конденсации. Эти частицы начинают расти и как бы делят между собой избыточный запас имеющейся в облаке парообразной воды.

Эффект этих процессов двоякий: 1) чем больше капля, тем медленнее она растет; 2) чем выше пересыщение, тем больше облачных капелек. Поэтому становится понятным, почему при наличии ядер конденсации, обычно находящихся в воздухе, один процесс конденсации сам по себе не может привести к дождю. Правда, из этого правила есть одно исключение. Когда воздух содержит гигантские ядра конденсации, состоящие из морской соли, конденсация может привести к образованию капелек диаметром около 100 микрон. Если облака формируются вблизи земли, то некоторые капли могут выпасть на землю. Но этот процесс обеспечивает только ничтожную часть всех осадков.

Если конденсация не может привести к дождю, то как же тогда возникает дождь? Метеорологи выяснили, что здесь природа действует как бы двумя путями.

ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ СНЕГА И ДОЖДЯ

В начале 30-х годов XX века известный норвежский метеоролог Т. Бергерон предложил теорию осадков, которая в основном остается справедливой и теперь. Он обратил внимание на тот важный факт, что упругость насыщающих паров над водой и над льдом при температурах ниже точки замерзания различна. Вспомните (рис. 13, стр. 47), что упругость насыщающего пара над водой выше, чем над льдом, при одной и той же температуре ниже точки замерзания. Эта разность достигает максимума при температуре примерно -12°C . В результате если в облако из переохлажденных водяных капель попадают ледяные кристаллы, то они будут расти, в то время как водяные капли будут испаряться. Давайте рассмотрим этот процесс по этапам.

Предположим, что при температуре -12°C образовалось облако, состоящее из водяных капелек. Через короткое время воздух, окружающий капли, станет насыщенным по отношению к воде. В этих условиях капельки будут устойчивыми: они не будут ни расти, ни испаряться, потому что на каждую испарившуюся молекулу воды придется другая молекула, которая сконденсировалась.

Предположим далее, что в облако внезапно попало некоторое количество ядер кристаллизации и возникло небольшое число ледяных кристаллов. Как только это произошло, облако становится неустойчивым. Воздух насыщен по отношению к воде, но он пересыщен по отношению к ледяным кристаллам. В результате молекулы водяного пара начнут отлагаться на ледяных кристаллах и воздух перестанет быть насыщенным по отношению к воде. Вследствие этого некоторое количество воды испарится из облачных капелек для восполнения потери пара, вызванной осаждением на кристаллы. Это испарение снова ведет к пересыщению по отношению к льду, кристаллы вырастают еще больше, и цикл продолжается.

Переход воды из жидкой фазы в газообразную (пар), а затем в твердую (лед) осуществляется непрерывно. Ледяные кристаллы при этом растут очень быстро. За несколько минут они могут вырасти в диаметре до 100 микрон и больше. Пока кристаллы остаются в переохлажденном облаке, они растут.

До сих пор мы не рассматривали вертикального движения капелек и ледяных кристаллов. Пока капельки малы, можно без существенной ошибки пренебречь эффектами вертикального движения. Например, облачная капелька радиусом 10 микрон могла бы падать в спокойном воздухе со скоростью около 1 см/сек. Эта скорость так мала, что можно считать каплю парящей в воздухе. Когда же возникают ледяные кристаллы с поперечником в несколько сотен микрон, их скоростями падения пренебрегать нельзя. Плоский кристаллик (пластинка) шириной 20 микрон падает со скоростью около 20 см/сек. Тот факт, что ледяные кристаллы падают быстрее, чем облачные капельки, очень важен для образования осадков.

Когда кристаллы начинают падать сквозь облако, они сталкиваются с облачными капельками и другими ледяными кристаллами различных размеров. При столкновении с кристаллами переохлажденные капельки мгновенно замерзают. Метеорологи называют такой процесс слияния частиц *коагуляцией*.¹

Было доказано, что, когда ледяные кристаллы имеют диаметр более 200 микрон, скорость их роста за счет коагуляции превышает скорость роста вследствие конденсации, т. е. отложения молекул непосредственно на ледяном кристалле. Чем больше размеры ледяной частицы, тем больше скорость роста путем коагуляции. Зимой, когда температуры у поверхности земли ниже точки замерзания, группы ледяных кристаллов достигают земли в виде снега. Когда же температуры у земли выше 0°C , снег тает и выпадает дождь.

Иногда при температуре у поверхности земли ниже 0°C на некоторой высоте могут быть слои теплого

¹ Коагуляция происходит не только в результате различия скоростей падения частиц. Причиной ее может быть броуновское движение, электрические силы и беспорядочное (турбулентное) движение воздуха. (Прим. ред.)

воздуха (рис. 15). Например, температура вблизи земли может быть -2°C , в то время как температура на высоте 1200 м равна $+3^{\circ}\text{C}$. Когда снежные хлопья проходят через слой, где температура выше 0°C , они тают и превращаются в дождевые капли. Затем при дальнейшем опускании капли попадают в охлажденный ниже точки замерзания слой воздуха. Здесь они могут замерзнуть, и на землю выпадут маленькие ледяные шарики — *крупы*.

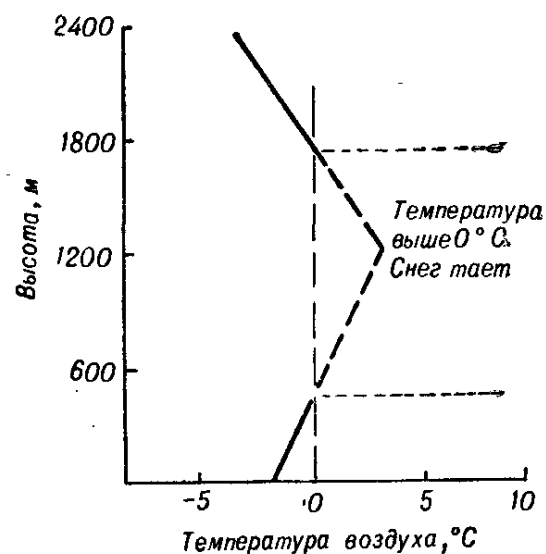


Рис. 15. Изменение температуры с высотой, типичное для образования гололеда.

ются слоем льда. Гололед может породить «страну чудес», красоту которой создает сверкающий лед, свисающий со всех предметов. К сожалению, как это часто случается в жизни, у гололеда есть своя «оборотная сторона медали»: он может причинить огромный ущерб. Иногда под тяжестью льда рвутся провода. Ветви деревьев часто обламываются. Наконец, последними по счету, но не по значению являются ужасные аварии и катастрофы на покрытых льдом дорогах.

Несомненно, что процессы, в которых участвуют ледяные кристаллы, могут объяснить большую часть осадков, особенно тех, которые выпадают в зимние месяцы в умеренных широтах. Достаточно внимательно рассмотреть несколько снежных хлопьев, состоящих из совершенно симметричных кристаллов, чтобы получить убедительное свидетельство о реальности этих процессов.

Лет двадцать назад казалось, что атмосферными про-

цессами с участием ледяных кристаллов как будто можно объяснить все осадки, выпадающие на Земле. Однако среди ученых было несколько скептически настроенных людей, в частности Г. Симпсон (Англия).

Во время второй мировой войны метеорологам пришлось побывать во многих странах, включая тропики, и вот тогда-то они обнаружили, что не только процессы с участием ледяных кристаллов могут быть причиной дождя. Самолеты часто летали над облаками, температура в которых была значительно выше 0°C , но которые тем не менее давали дождь.

В конце 40-х — начале 50-х годов появились убедительные доказательства того, что в конвективных облаках дождь часто образуется при отсутствии ледяных кристаллов. Это открытие привело к так называемой коагуляционной теории образования дождя.

В конце 40-х — начале 50-х годов появились убедительные доказательства того, что в конвективных облаках дождь часто образуется при отсутствии ледяных кристаллов. Это открытие привело к так называемой коагуляционной теории образования дождя.

ОБРАЗОВАНИЕ ДОЖДЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОАГУЛЯЦИИ

В кучевых облаках над тропическими областями океанов дождевые капли обычно образуются без участия ледяных кристаллов. Ледяные частицы могут находиться в воздухе над вершинами облаков, не оказывая на них никакого влияния. Над Карибским морем облака сначала появляются на высоте примерно 600 м. Их вершины растут со скоростью около 120 м/мин., и к тому времени, когда они достигают высоты 3000 м, в облаках часто содержатся дождевые капли диаметром около 500 микрон. Для жителей умеренных широт необычны ливни из облаков толщиной всего 2500 м, но такое явление часто наблюдается в тропиках. Температура у вершин подобных облаков около 7°C . Нет никаких сомнений, что в этих облаках дождевые капли возникают при процессах, в которых принимает участие только жидкая вода.

Возникает вопрос: как же образуются такие дождевые капли? Это сразу приводит к другому вопросу: бывают ли такие же явления и не в тропиках?

Мы уже говорили, что если все капельки в облаке малы и одинаковы по размерам, то облако представляет собой устойчивую систему. В этом случае все капельки падают очень медленно и с одинаковой скоростью. В результате количество столкновений капелек друг с дру-

гом невелико: понадобилось бы очень длительное время для того, чтобы слился миллион капелек.

С другой стороны, когда при тех же условиях в облако попадает некоторое количество капель, которые больше обычных облачных капелек, ситуация может существенно измениться. Капелька радиусом 10 микрон падает со скоростью 1 см/сек., в то время как капелька радиусом 50 микрон падает со скоростью 26 см/сек. Более крупные капли, падающие быстрее, чем облачные капельки, будут достигать их и сталкиваться с ними.

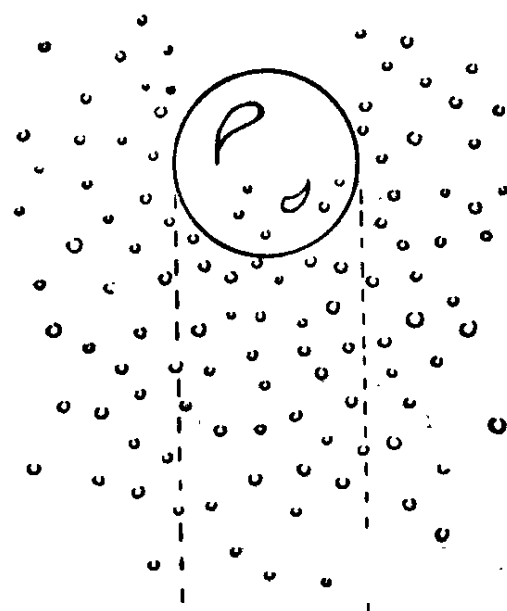


Рис. 16. Схема роста крупной капли в результате столкновения ее с маленькими облачными капельками.

Если предположить, что капельки падают по прямой линии, то можно легко вычислить число столкновений. Как показано на рис. 16, большие падающие капли «захватывают» вертикальный цилиндр, площадь поперечного сечения которого такая же, как у капли. За минуту капля падает на расстояние, которое легко вычислить, если известна скорость падения капли. Для капли радиусом 50 микрон объем «захвата» за 1 минуту должен составлять 0,1

Если в 1 см^3 содержится 100 10-микронных облачных капелек, то число столкновений будет равно $0,1 \text{ см}^3 \times 100 \text{ см}^{-3}$. На самом деле это число больше, поскольку капельки сталкиваются и сливаются с падающей каплей, последняя увеличивается в размере, и поперечное сечение области «захвата» увеличивается.

По существу, вместо цилиндра нам следовало бы вести расчет для слегка расширяющегося конуса. Но мы пренебрежем этим эффектом, поскольку он только усложняет описание.

Если бы все сталкивающиеся капельки сливались с падающей каплей, то было бы нетрудно подсчитать скорость, с которой растет большая капля. Однако при исследованиях было обнаружено, что не все столкнове-

ния ведут к слиянию. Вы, вероятно, удивитесь, если узнаете, что две капли воды могут отскакивать друг от друга, но именно это иногда происходит. Когда вы будете купаться, шлепнете по воде рукой или ногой и внимательно последите за маленькими капельками воды. Нетрудно заметить, что некоторые капельки отскакивают от поверхности воды один или два раза, прежде чем сливаются с водой бассейна.

Тот факт, что не все столкновения ведут к слиянию, наиболее отчетливо выявляется при киносъемках, производимых с очень большой скоростью.

При скорости съемки 7000 кадров в минуту на экране видно, что меньшие капли иногда как бы погружаются в большие, а затем отскакивают обратно, напоминая гимнаста на трамплине. Малая капля деформирует поверхность большой, не прорывая ее поверхностную пленку. Еще не вполне ясно, почему некоторые капельки ведут себя таким образом, тогда как другие просто сливаются с большими каплями. Предполагают, что от слияния их предохраняет очень тонкий слой воздуха, находящийся между двумя поверхностями воды. Опыты в лаборатории показывают, что, если капли сталкиваются в сильном электрическом поле, они в большинстве случаев сливаются. Этот факт приводит некоторых ученых к мысли, что электрические силы могут играть важную роль в процессах образования осадков.

Во всяком случае, ясно, что если захват капелек, изображенный на рис. 16, действительно имеет место и известна доля столкновений, ведущих к слиянию, то нетрудно рассчитать скорость роста капли, первоначальный радиус которой был 50 микрон. К сожалению, в действительности положение не так просто, как показано на рис. 16. В то время как большая капля падает, воздух впереди нее тоже движется и уносит некоторые ма-

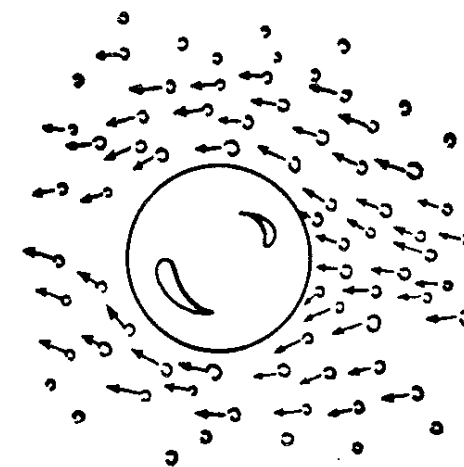


Рис. 17. Более близкая к действительности картина движения маленьких капелек при падении крупной капли через облако.

ленькие капли. Рисунок 17 дает более правдоподобную картину. Из облачных капелек, находящихся в вырезанном большой каплей цилиндре, одни столкнутся с большой каплей, а другие нет. Доля капелек внутри цилиндра, действительно попадающих в большую каплю, называется *эффективностью столкновений*. Она зависит от различных факторов, в том числе от размеров капель, а также от свойств воздуха. На рис. 18 изображена кривая, показывающая эффективность столкновений для капли радиусом 100 микрон в облаке с капельками различных размеров. Когда облачные капельки очень малы, они в основном движутся мимо большой капли. По мере того как капли увеличиваются в размере, все возрастающая часть их сталкивается с большой каплей. Для капель различных размеров получена серия кривых, подобных кривой, показанной на рис. 18.

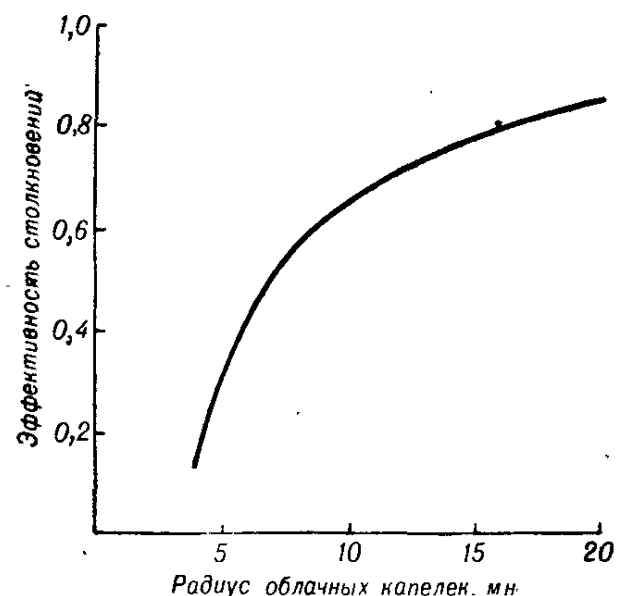


Рис. 18. Эффективность захвата для капли радиусом 100 микрон при ее падении сквозь облако, состоящее из капелек с радиусами, указанными на нижней шкале (по И. Лэнгмюру) (при эффективности 1,0 все капли, находящиеся в цилиндрическом объеме, столкнутся с большой каплей).

По известной эффективности столкновений можно вычислить скорость роста больших капель. Если в кучевом облаке возникли капли диаметром 100 микрон, то они могут вырасти в дождевые капли диаметром 1 мм за 15—20 минут (если в облаке много облачных капелек). В облаках с очень маленькими капельками рост капель путем слияния происходит слабее.

Но откуда же попадают в облако большие капли?

В главе 2 мы обсуждали вопрос о гигантских солевых ядрах. Эти частички соли, радиус которых в сухом состоянии больше нескольких микрон, могут обеспечить образование сравнительно редких больших капель, ко-

торые и приводят к осадкам. В этой гипотезе, впервые высказанной Ф. Ладлемом (Англия), допускается, что радиус гигантских солевых ядер может расти до 30—50 микрон только за счет одной конденсации. Кроме того, их должно быть около 100—1000 в 1 м³ — величина, сходная с концентрацией дождевых капель.

Ряд ученых указал другие возможные пути для начала слияния капель. В частности, некоторые исследователи предполагают, что притяжение в результате действия электрических сил может привести к столкновению и слиянию очень маленьких капелек, вследствие чего образуются капельки радиусом 30—50 микрон. Если это верно, то нет необходимости в наличии упомянутых выше гигантских солевых ядер.

В итоге можно с уверенностью утверждать, что в тропических кучевых облаках дождевые капли образуются путем *слияния*, хотя ряд деталей процесса мы изучили еще недостаточно.

Разумно предположить, что если процессы слияния эффективны в тропических облаках, то они могут оказаться эффективными и в сходных типах облаков в других районах мира. То, что это действительно так, было установлено только в последнее десятилетие.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

До тех пор пока метеорологи для наблюдения за облаками не начали использовать радиолокаторы, было почти невозможно узнать, в какой части облака образуются осадки. Когда вы наблюдаете за облаком визуально, нельзя быть уверенным в том, что дождь образовался до того, как вы его увидели. Однако наблюдатель должен понимать, что на самом деле дождевые капли образовались на 5—10 минут раньше. За время, необходимое для того, чтобы капли пролетали от центральной части облака до его основания, вершина облака может вырасти с 1500 до 3000 м. Поэтому трудно изучить процессы, протекающие в облаках, в момент первоначального образования дождевых капель.

Радиолокатор помог решить эту задачу. Большинство радиолокаторов, обычно используемых метеорологами, не позволяет «видеть» облачные капельки, но с помощью

радиолокаторов удается наблюдать выпадающие осадки.¹ Поэтому, если наблюдатель, изучающий растущее облако, отметил первое радиолокационное отражение от него, он может сказать, что это радиолокационное эхо соответствует области, содержащей первые капли дождя.

Радиолокатор еще раньше применялся для определения высоты первоначального эхо. Фото X показывает изменение радиолокационных отражений от осадков в облаке, которое образовалось над юго-западной частью штата Огайо (США). Каждая секция соответствует вертикальному разрезу облака. Горизонтальный масштаб каждой секции 12 миль (20 км), а вертикальный масштаб дает протяженность от уровня земли до высоты 6000 м. Под каждой фотографией указано время в минутах и секундах. Эти наблюдения, проведенные через короткие интервалы времени, показывают, что первое эхо появилось на высотах 2100—3500 м. Температура у вершины первого отражения была около 6°С. Область дождевых капель быстро росла до тех пор, пока нижний уровень отражений (и дождя) не достиг земли.

Радиолокационные наблюдения, подобные упомянутым выше, уверенно доказывают, что даже в областях, далеких от тропических широт, осадки могут возникать скорее путем слияния капелек, чем в результате процессов с участием ядер кристаллизации. Таким путем было проведено систематическое изучение зависимости между протяжением облака по вертикали и вероятностью осадков. Ранее уже упоминалось, что над тропическими областями океанов основания облаков обычно расположены на высоте примерно 600 м. В процессе изучения было обнаружено, что в центральных штатах США основания конвективных облаков часто располагаются на высоте около 1500 м и что активные облака растут со скоростью от 150 до 300 м/мин. В противоположность их тропическим «родственникам», в этих облаках, как правило, дождевые капли не образуются до тех пор, пока их вершины не достигнут уровня 4500 м, где температура ниже 0°С. Например, наблюдения показывают, что только 20% облаков, достигающих уровня 5500 м, способны дать осадки.

¹ См.: Л. Дж. Баттан. Радиолокатор наблюдает за погодой. Гидрометеониздат, Л., 1964.

В полупустынных районах США, таких, как штаты Нью-Мексико и Аризона, для образования дождя необходимы еще более мощные облака. Здесь основания облаков обычно лежат на высоте от 3000 до 3500 м и только 20% облаков, достигающих уровня 7500 м, дает дождь.

На рис. 19 схематически показана высота и мощность облаков, которые дают радиолокационные отражения в 20% случаев. На рисунке видно, что в центральных районах США облака выше, а на юго-западе страны еще выше, чем над тропическими областями океанов. Также

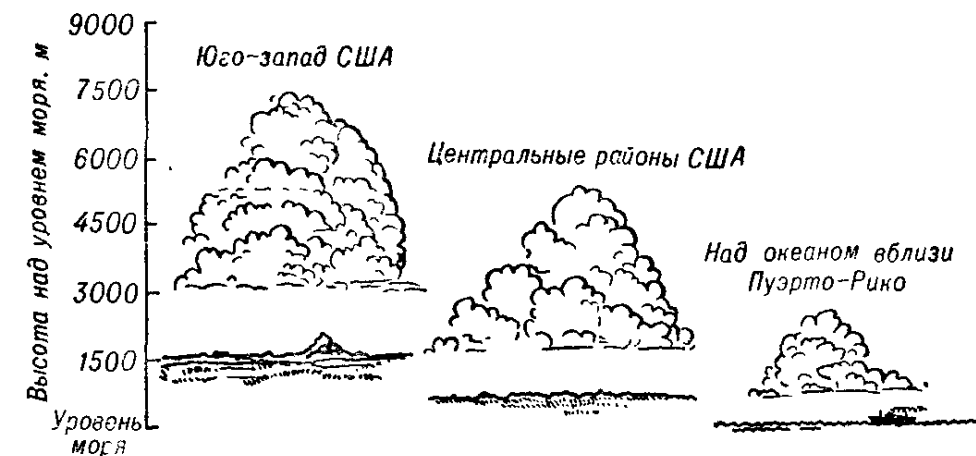


Рис. 19. Схема, показывающая обычную высоту оснований кучевых облаков и их толщину в трех различных географических районах.

очевидно, что для образования осадков в менее влажных районах необходимы гораздо более мощные облака, чем во влажных.

Из рис. 19 можно заключить, что процесс слияния нередко вызывает выпадение осадков из конвективных облаков во всех трех районах. В центральных частях США воздух суше, чем над океанами в тропиках, поэтому для образования облака он должен подняться на большую высоту. Далее, чем выше (и холоднее) основание облака, тем выше должна быть его вершина, чтобы сконденсировалось то же количество жидкой воды. Таким образом, в центральных районах США облака, дающие дожди, больше по размерам, чем в тропиках. В засушливых районах, для того чтобы создалась концентрация жидкой воды, подобная встречающейся в тропических кучевых облаках, воздух должен подняться на еще большую высоту.

В настоящее время большинство специалистов по физике облаков считает, что, если основания конвективных облаков находятся в области высоких температур, осадки могут образоваться в результате процессов слияния. С другой стороны, когда основание облака имеет низкую температуру, ледяные кристаллы могут возникнуть в облаке при мощности его только 2000—3000 м. Образовавшись, кристаллы могут за минуту вырасти в поперечнике до нескольких сотен микрон. После этого вследствие столкновений с другими кристаллами и облачными капельками быстро образуются крупные частицы, выпадающие из облака как осадки. Установлено, что если растущие частицы достигли в диаметре нескольких сотен микрон, то в любом случае (будь это частицы воды или льда) процесс слияния является единственным, который следует принимать во внимание.

Процессы формирования осадков из слоистых облаков не изучены так подробно. Однако многие данные говорят о том, что в них преобладают процессы с участием ледяных кристаллов.

В этой главе внимание было сконцентрировано на образовании осадков, состоящих из элементов обычных размеров — скажем, водяных капель, диаметр которых не больше нескольких миллиметров, или снежных хлопьев эквивалентных размеров. Теперь обратимся к изучению града.

ГЛАВА 7

ГРАД

Столетиями град привлекал внимание людей. Когда при грозе начинается град, многие поднимают градины и рассматривают их. В большинстве стран мира градины обычно бывают маленькими — примерно величиной с горошину. Но в некоторых несчастливых местах градины размером с грецкий орех не редкость. Иногда попадаются градины еще большего размера — с теннисный мяч. Конечно, такие градины причиняют огромный ущерб.

Крупный град может за несколько минут уничтожить урожай на полях. От высокой и густой кукурузы могут остаться только обрубленные стебли. Плодовые деревья, которым потребовалось несколько лет, чтобы достигнуть зрелости, могут полностью лишиться листьев

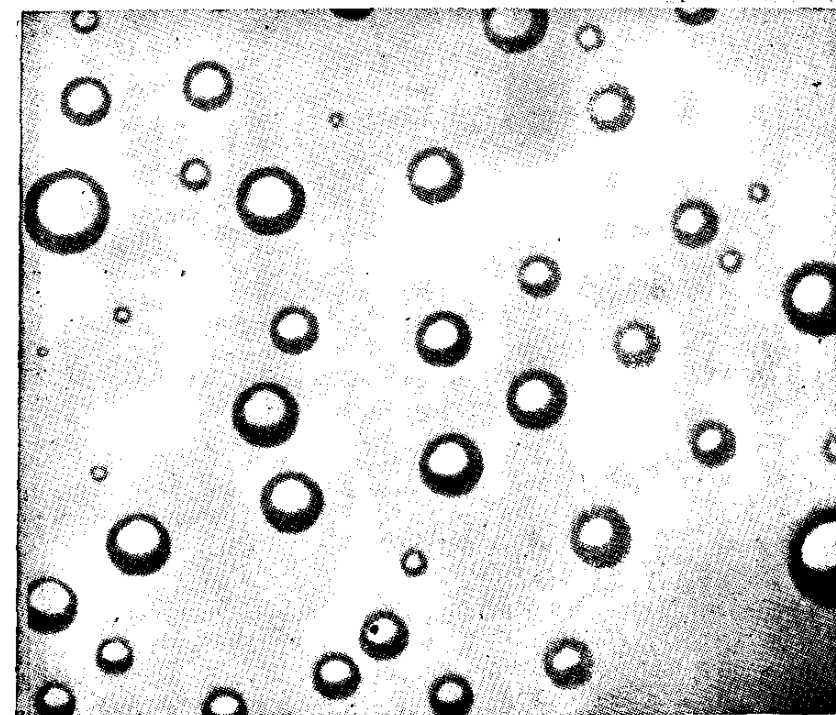


Фото I. Облачные капельки под микроскопом. Самые большие капельки имеют в диаметре 40 микрои.



Фото II. Высоко-кучевые чечевицеобразные облака, образовавшиеся в потоке воздуха над горами. Облака в центральной части фотографии состоят в основном из водяных капелек.



Фото III. Слоисто-кучевые облака. Облака, подобные этим, встречаются на небольших высотах и состоят из капелек воды.



Фото IV. Перистые облака. Они появляются на больших высотах и состоят из ледяных кристаллов. Последние при падении переносятся в горизонтальном направлении ветром, вследствие чего образуются характерные изогнутые облачные пряди.



Фото V. Быстро растущее кучевое облако. Непрерывный рост этих облаков ведет к образованию кучево-дождевых облаков.



Фото VI. Кучево-дождевое облако с хорошо развитой наковальнеобразной вершиной «Наковальня» состоит из ледяных кристаллов, тогда как нижняя часть облака образована водяными капельками. Такое облако является типичным грозовым облаком.



Фото VII. Различные типы ледяных кристаллов: а) плоские пластинки, б) звездочки, в) столбики.

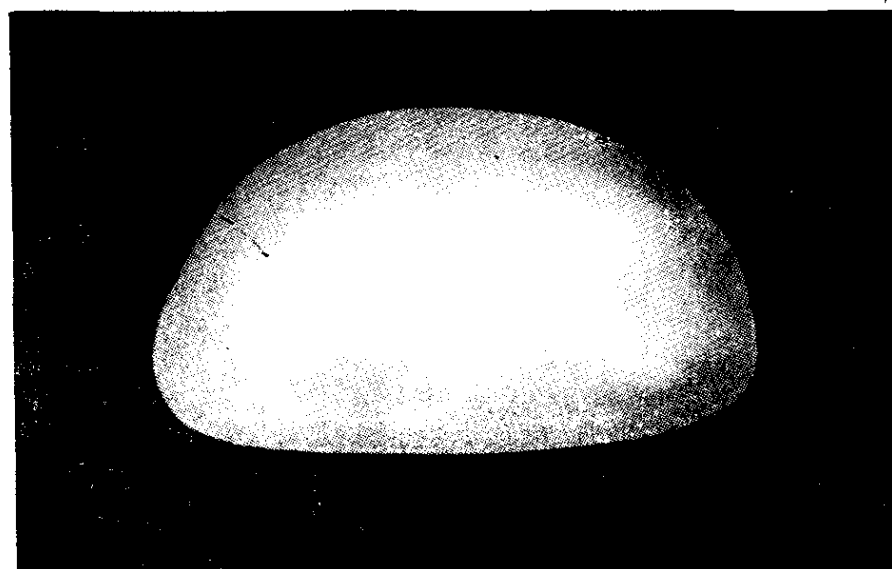


Фото VIII. Водяная капля, падающая в спокойном воздухе. Горизонтальный диаметр этой капли 6,5 мм; она падает со скоростью 8,9 м/сек.

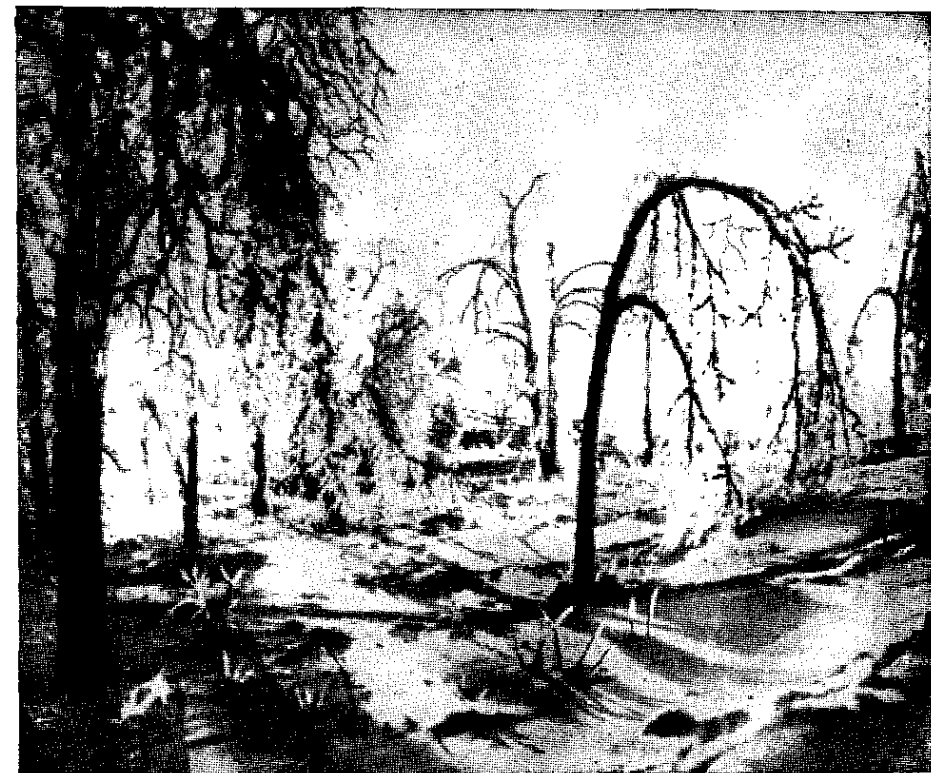


Фото IX. Гололед одевает сплошным покровом ветви деревьев, и этот покров иногда такой тяжелый, что вызывает картину, изображенную на снимке.

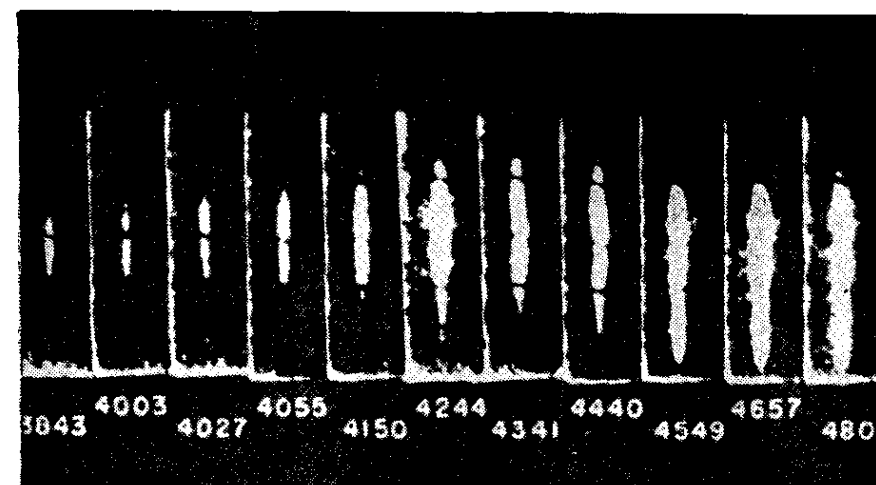


Фото X. Образование и рост «дождевого» эха в кучевом облаке над юго-западом штата Огайо. Цифры внизу — время в минутах и секундах. Верхняя часть записи эха соответствует высоте примерно 6000 м. нижняя — уровню земли.

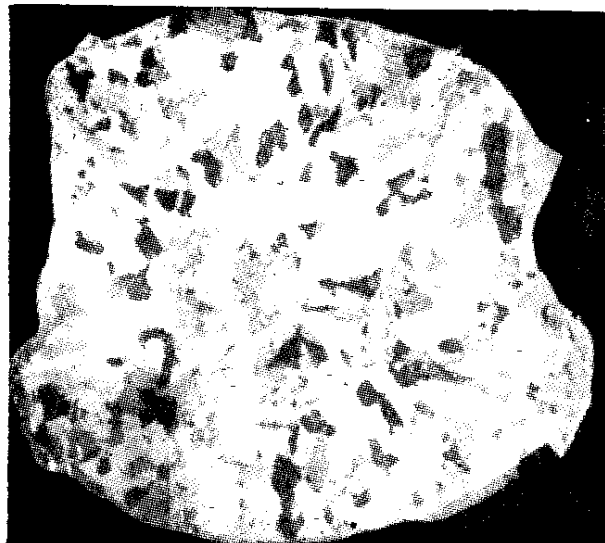


Фото XI. Тонкий срез с градины диаметром 4,5 см. Срез был сфотографирован в проходящем поляризованном свете.



Фото XII. Верхняя часть слоя переохлажденного слоистого облака примерно через 20 минут после сбрасывания в него дробленного сухого льда с самолета, путь которого четко виден на снимке.

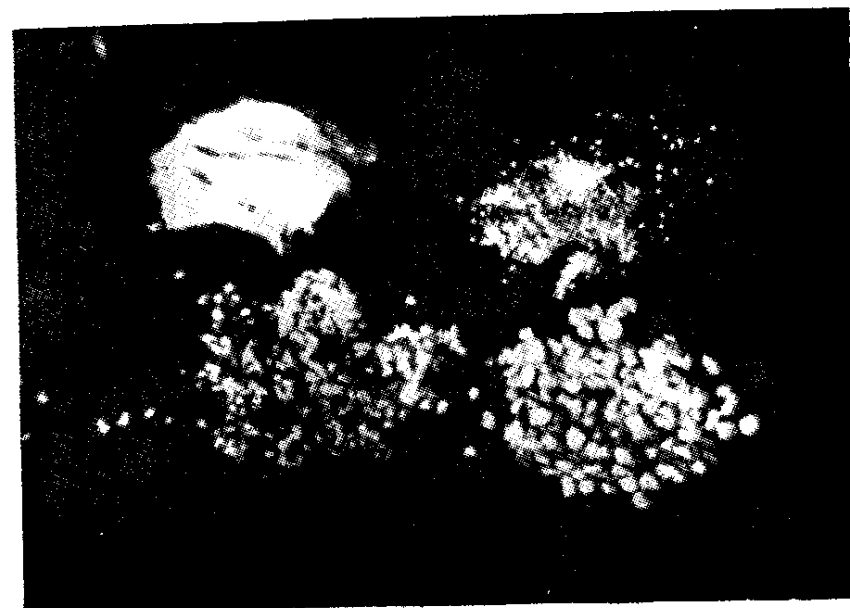


Фото XIII. Кусочки сухого льда из льдодробилки, применявшейся в нескольких опытах по засеву облаков.

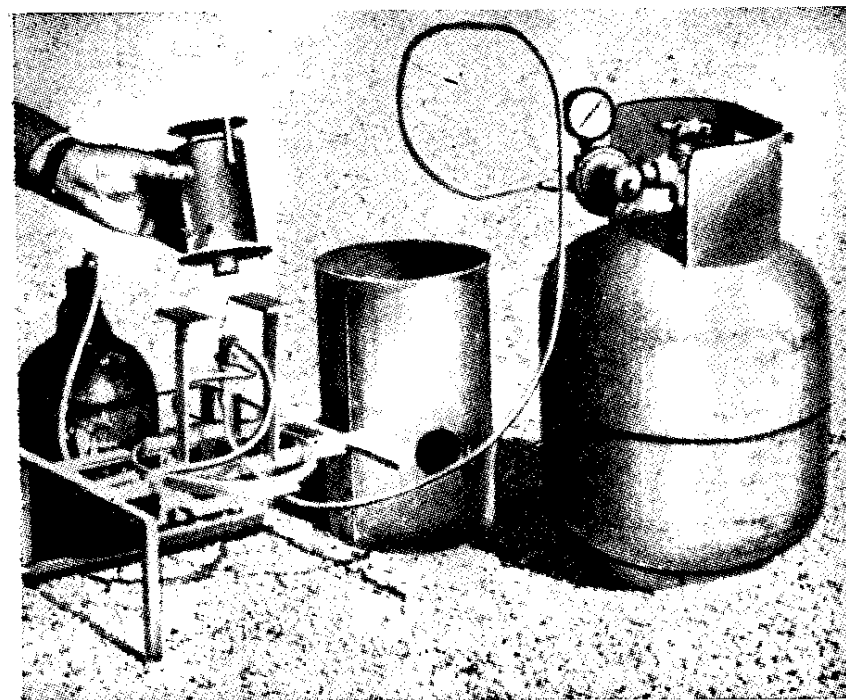


Фото XIV. Первая модель наземного генератора йодистого серебра, разработанная Лесной службой США (проект «Скайфайр»).

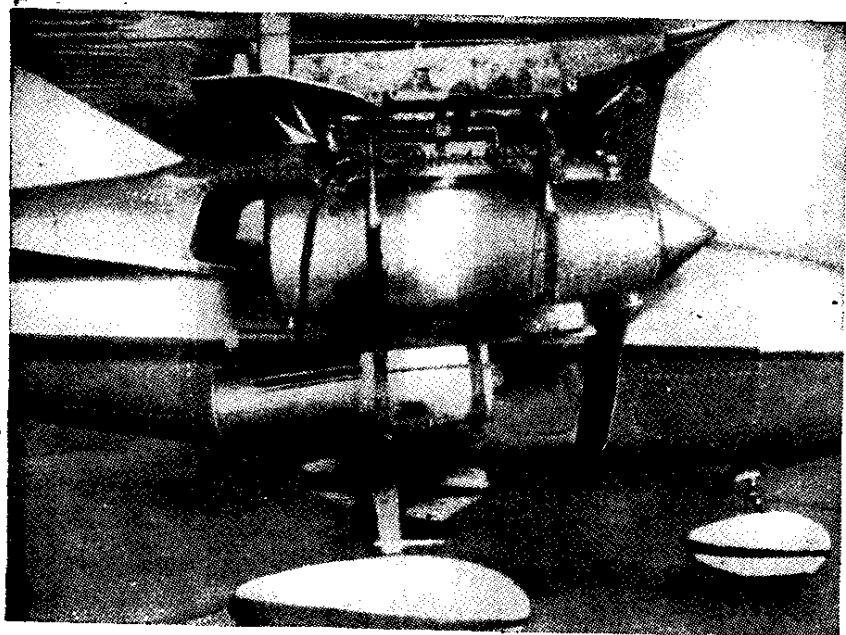


Фото XV. Самолетный генератор йодистого серебра, разработанный Лесной службой США (проект «Скайфайр»).

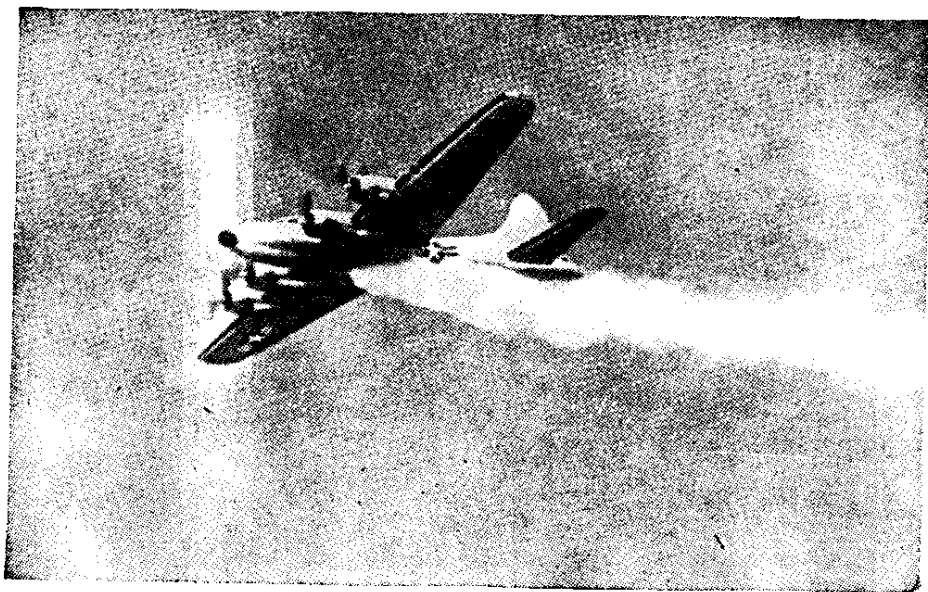


Фото XVI. Самолет Б-17, использовавшийся Чикагским университетом для засева теплых облаков брызгами воды.

и ветвей. Убытки, приносимые градом сельскому хозяйству, огромны. Но крестьяне не единственные люди, которые страдают от этой ледяной бомбардировки.

Каждый год град разбивает тысячи окон. Черепичные крыши трескаются. Когда автомобили попадают под крупный град, они покрываются выбоинами. И, наконец, последнее по порядку, но не по значению — тяжело повреждаются самолеты. Град неприятен даже тогда, когда самолет находится на земле; в полете же это может кончиться катастрофой.

ГДЕ ВОЗНИКАЕТ ГРАД?

Град выпадает в разное время, но почти всегда он сопровождает грозы. В одной местности град бывает очень редко, в другой он обычное явление.

Среднее число гроз и случаев выпадения града за год в США показано на рис. 20. В штате Флорида наблюдается больше гроз, чем в любом другом штате, однако случаи выпадения града здесь редки. На Великих равнинах (США) гроз меньше, чем во Флориде, но град выпадает гораздо чаще.

В некоторых других районах мира также необычайно велико число случаев выпадения губительного града. К таким районам в первую очередь относятся Северная Италия и Кавказ (СССР).

Как уже отмечалось, размер градин сильно изменяется.

Рисунок 21, взятый из работы Б. Бесквита, показывает повторяемость размеров градин, найденных вблизи города Денвера (штат Колорадо). В этом районе крупные градины — обычное явление. В среднем каждый год поступает до семи сообщений о градинах больше 2,5 см в диаметре.

В течение многих лет метеорологов интересует ряд важных вопросов. Почему одни грозы дают град, а другие нет? Почему некоторые районы, например Великие равнины, благоприятствуют образованию града?

Не так давно большинство гипотез по интересующим нас вопросам были чисто умозрительными. Теперь мы довольно много знаем об условиях образования града и о грозах, при которых бывает град. В значительной степени этому способствовало использование радиолокации при изучении гроз и специальные измерения с борта са-

молетов. Кроме того, новые методы изучения строения градин, выпавших на землю, дали много сведений о том, как они образуются.

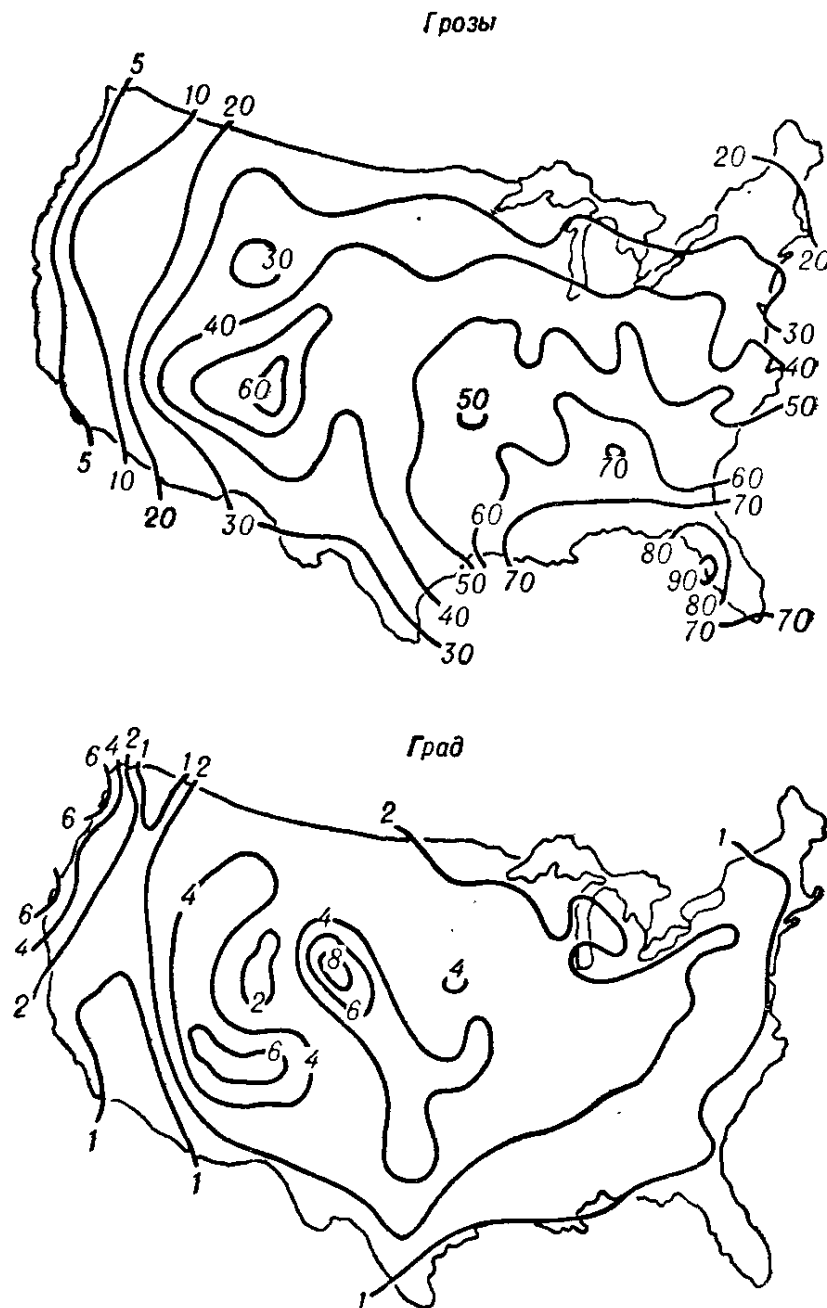


Рис. 20. Географическое распределение гроз и случаев выпадения града в США (цифры указывают среднее число дней в году с грозами или градом).

Вот что известно об условиях образования гроз с градом в США.

Атмосфера должна быть неустойчивой, другими словами, она должна иметь такие температуру и влажность,

которые способствуют развитию сильных вертикальных движений воздуха.¹

Когда у поверхности земли на север движется теплый влажный воздух, а на высоте с запада перемещается сравнительно узкий поток сухого воздуха, создаются условия для возникновения наиболее интенсивных гроз. Такие условия складываются над Великими равнинами; если с Мексиканского залива на север течет влажный воздух, а на высоте с запада, от гор движется сухой воздух.

Указанное распределение потоков в атмосфере может вызывать подъем больших масс находящегося в неустойчивом состоянии теплого воздуха. Это сравнимо с плохо уравновешенным камнем на склоне горы. Он может оставаться в таком положении долгое время, если его покой не нарушать. Но если камень слегка подтолкнуть, он покатится с горы вниз со все возрастающей скоростью, пока не достигнет дна долины.

В неустойчивой атмосфере некоторый объем воздуха, смещенный вверх, будет подниматься с ускорением. Иногда ускоренное движение продолжается до тех пор, пока поднимающийся воздух не достигнет основания стратосферы, т. е. высот более 13 000 м.² Таким путем

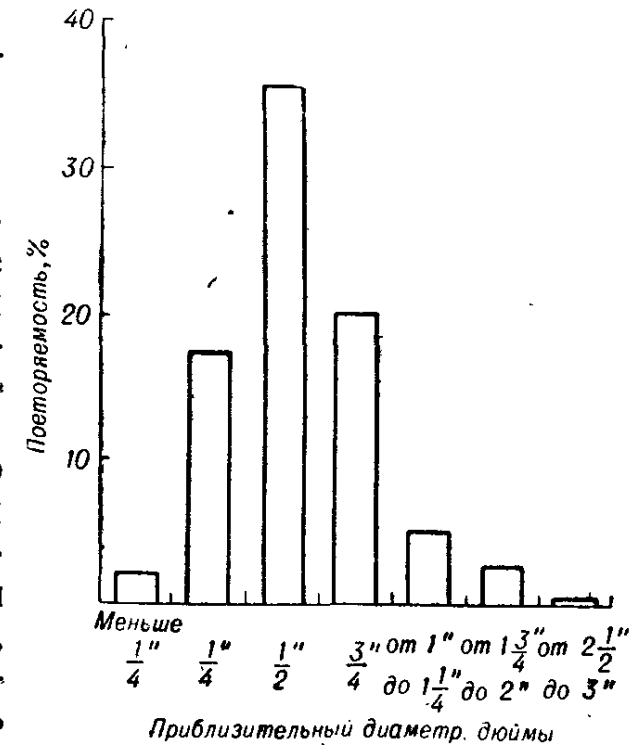


Рис. 21. Повторяемость очень крупных градин в восточной части штата Колорадо. Например, в 20% случаев выпадения града градины имеют диаметр от 3/4 до 1 дюйма (1 дюйм = 2,5 см).

¹ См.: L. J. Battan. The nature of violent storms. Science Study Series, New York, 1961.

² В нижней стратосфере температура с высотой практически не изменяется. В СССР летом нижняя граница стратосферы лежит на уровне 11—12 км. Только на юге нашей страны в теплое время года довольно часто высота границы стратосферы достигает 13 км. (Прим. ред.)

могут образоваться сильные грозы, охватывающие значительную территорию. Они сопровождаются многочисленными молниями, ливнями, а иногда градом. Неясно, почему это происходит только *иногда*. Некоторые исследователи предполагали, что наиболее важно то, насколько нулевая изотерма располагается выше основания облаков. Например, во Флориде основания облаков лежат примерно на высоте 600 м над уровнем моря, в то время как нулевая изотерма находится примерно на высоте 4800 м. Здесь грозы редко сопровождаются градом. На востоке штата Колорадо основания облаков часто располагаются на высоте 2700 м, тогда как нулевая изотерма находится примерно на высоте 4200 м. При таком распределении температуры грозы часто сопровождаются градом. Г. Эпплмен высказал предположение, что в тонком теплом облаке дождь образуется прежде, чем начинает образовываться град.

В последние годы возрос интерес к роли, которую могут играть при этом ветры верхней тропосферы. Этот интерес поддерживался прогнозистами, которые заметили, что при сильных грозах часто наблюдаются на большой высоте значительные скорости ветра. Ф. Ладлем высказал гипотезу, близкую к ранее сформулированным взглядам Дж. Фалкса (Бюро погоды США). Эта гипотеза подчеркивает роль последовательных подъемов и опусканий ледяных частиц, благодаря которым растущие градины могут достаточно долго находиться в грозовом облаке и достигать значительных размеров. В таком случае для обеспечения достаточной поддерживающей силы восходящие движения в облаке должны быть необычно интенсивными. Так, в верхней части грозовых облаков скорость подъема должна достигать 100 м/сек.

Совершенно очевидно, что необходимы более широкие исследования для того, чтобы привести в согласие противоречивые точки зрения на грозы, сопровождаемые градом. Во всяком случае, ясно, что для образования крупного града должны существовать мощные грозовые облака с интенсивным вертикальным подъемом воздуха.

СВОЙСТВА ГРАДИН

Обычно лед, из которого состоят градины, неоднороден. Почти каждая градина частично состоит из чистого

льда, частично из мутного. Непрозрачность льда вызывается захваченными пузырьками воздуха. В больших градинах иногда чередуются слои прозрачного и непрозрачного льда.

Тот, кто рассматривал градины, знает, что они часто бывают не круглой формы. Многие градины похожи на грушу. Поскольку они падают узкой частью кверху, замерзающая вода накапливается на сравнительно плоской нижней поверхности.

Подробности внутреннего строения градин были изучены путем оптического исследования их срезов. Этот метод, впервые разработанный в Швейцарии М. де Квервайном и Р. Листом, дал очень ценные результаты. На фото XI представлен тонкий срез с градины, рассматриваемый в поляризованном свете.¹ Градина состоит из многих сотен ледяных кристаллов. Поверхности каждого кристалла образуют характерные углы с лучом света, проходящим сквозь тонкий слой льда. Цвет прошедшего луча зависит от этого угла. Крупный кристалл выглядит как большая, однородно окрашенная поверхность, малый кристалл — как маленькая область одного цвета. Включения непрозрачного льда создаются маленькими кристаллами с пузырьками воздуха, тогда как область прозрачного льда состоит только из больших кристаллов. Центр круглой градины, показанной на фото XI, образован множеством маленьких кристаллов и воздушных пузырьков. Он окружен слоем больших кристаллов (прозрачный лед), затем идет толстый слой маленьких кристаллов (непрозрачный лед), и, наконец, имеется еще один толстый слой прозрачного льда.

Почему же образуются чередующиеся слои больших и маленьких кристаллов? Объясняется это различием скоростей, с которыми захватывается и замерзает вода. Когда градина падает сквозь слой облака, бедный водой, и встречается с мелкими переохлажденными капельками, последние могут замерзнуть почти мгновенно. Если же падающая градина сразу собирает большое ко-

¹ Поляризованным светом называются электромагнитные колебания, происходящие в одной плоскости. Естественный свет также представляет собой электромагнитные колебания, но эти колебания происходят хаотически, в разных плоскостях, перпендикулярных направлению светового луча. (Прим. ред.)

личество переохлажденной воды, эта вода не может замерзнуть моментально. Градина покрывается слоем воды без воздушных включений, и замерзание идет медленно, в результате чего образуются крупные кристаллы, не содержащие воздушных пузырьков.

Чтобы лучше разобраться в этих вопросах, познакомимся с тем, как растут градины в атмосфере.

РОСТ ГРАДИН

Для того чтобы получить представление о процессах, приводящих к образованию градины, необходимо принять во внимание значительное число фактов. Прежде всего надо учесть размеры и кристаллическую структуру самих градин. Любая теория образования града должна объяснить их рост до 5 см в диаметре и более. Кроме того, теории должны объяснить, как образуются слои прозрачного и непрозрачного льда.

Из опыта известно, что грозы с градом отмечаются при наличии кучево-дождевых облаков с сильными вертикальными движениями воздуха. Для быстрого роста градины путем коагуляции в облаке должно быть большое количество переохлажденной воды. Это количество, называемое *водностью*, обычно колеблется от 0,01 до 1,0 г/м³, но в грозовых облаках водность может достигать 4—5 г/м³. Теоретически возможно содержание жидкой воды примерно 8 г/м³, но такие большие величины никогда не были измерены.

Другой важной особенностью грозы является характер восходящих движений. По новой теории образования града, предложенной Ф. Ладлемом, эти движения должны быть наклонными (см. рис. 22). Согласно теории, восходящие движения должны быть достаточно устойчивыми в течение 30 минут — 1 часа.

Легко показать, что в кубическом метре облака при любой грозе может вырасти очень немного крупных градин (скажем, 3 см в диаметре). В главе 6 отмечалось, что средняя по размеру облачная капелька имеет диаметр 20 микрон, тогда как средняя капля дождя достигает в поперечнике 2 мм. Поскольку объем капель пропорционален их диаметру в кубе, для образования одной дождевой капли должен объединиться миллион облачных капелек. Градина диаметром 3 см имеет объем,

примерно в 10 миллиардов раз больший объема облачной капельки. Другими словами, примерно 10 миллиардов капелек должны объединиться, чтобы образовалась одна трехсантиметровая градина.

Ранее упоминалось, что в 1 см³ обычного облака содержится примерно 100 капелек. Таким образом, для образования одной трехсантиметровой градины должны быть собраны вместе облачные капельки из 100 миллионов кубических сантиметров облака. Это дает одну градину на каждые 100 м³ облака.

Такие простые подсчеты показывают, почему большие градины — в общем редкость: для их возникновения в облаке должно накопиться чрезвычайно большое количество жидкой воды, а это случается нечасто.

Теперь вернемся к рассмотрению первой стадии роста градины. Возможно, «зародышем» градины является большая капля воды, которая замерзла в то время, когда она с восходящим потоком попала в холодные области облака. Ряд исследователей считает, что «зародыш» состоит из скопления ледяных кристаллов. Исследование градин с помощью микроскопа не дало окончательного ответа на этот вопрос.

Во всяком случае, когда замерзшая частица с диаметром примерно 1 мм появляется в холодной области грозового облака, она может очень быстро вырасти за счет столкновения с переохлажденными каплями. Одно время предполагали, что переохлажденные капельки замерзают при столкновении, образуя непрозрачный лед. Такой процесс может продолжаться до тех пор, пока градина не опустится ниже уровня нулевой изотермы и лед не начнет таять, образуя слой жидкой воды. Вследствие внезапного усиления восходящего движения градина может снова попасть в холодные области облака, где вода, покрывающая градину, замерзает, образуя прозрачный лед. Затем, прежде чем градина снова упадет ниже уровня нулевой изотермы, образуется второй слой непрозрачного льда. Такие путешествия вверх и вниз через уровень нулевой изотермы могут объяснить образование слоев прозрачного и непрозрачного льда по мере роста градины.

Впоследствии некоторые положения этой теории были отвергнуты. Должно быть слишком много совпадений, чтобы градина могла то подниматься над уровнем замер-

зания, то падать ниже его. Кроме того, фактически наблюдаемые слои прозрачного льда слишком толсты, чтобы они могли образоваться путем замерзания тонкой пленки воды. Более того, образование слоев прозрачного и непрозрачного льда можно объяснить и не предполагая, что градина долетает до уровня, где лед тает.

Во второй теории допускается, что градина может образоваться, когда ледяная частица падает непосредственно от вершины облака до его основания. Наличие слоев прозрачного льда объясняется тем, что при накоплении слишком большого количества воды градина становится мокрой и процесс замерзания замедляется. Было найдено, что вода содержит растворенный в ней воздух. Когда вода замерзает медленно, воздух высвобождается из нее. Когда же замерзание происходит быстро, растворенный в воде воздух образует маленькие пузырьки, которые заключены внутри льда.

На первый взгляд кажется удивительным, что вода при температуре -10°C замерзает медленно. Но вспомним, что для замерзания необходимо куда-то отвести так называемую скрытую теплоту плавления, которая выделяется при замерзании воды. Каждый грамм замерзающей воды выделяет примерно 80 калорий тепла. Это тепло идет на нагревание льда и воды. Чтобы процесс замерзания шел непрерывно, тепло от градины должно уноситься воздухом. В точности такой же, но обратный по знаку эффект наблюдается при таянии льда. Лед в стакане воды тает медленно, потому что на плавление каждого грамма льда при температуре 0°C должно быть затрачено 80 калорий. Поскольку необходимое тепло поступает медленно, и само таяние идет медленно.

Когда при падении ледяная частица захватывает большое количество переохлажденной воды, быстрый отток выделяющегося при замерзании тепла становится невозможным. Температура на поверхности градины повышается, замерзание замедляется, в результате чего образуется чистый лед. Исходя из этого, образование на градине прозрачного льда можно объяснить и не предполагая, что градина должна обязательно попадать в слои с положительной температурой. Описанная картина имеет место, когда градина падает сквозь ту область облака, где велико содержание переохлажденной воды.

Если водность облака мала, падающая градина захватывает относительно небольшое количество переохлажденной воды. В этом случае замерзание может произойти быстро и воздушные пузырьки не смогут выделиться. Следовательно, когда число и размер переохлажденных облачных капелек очень малы, капельки могут замерзнуть почти мгновенно, образуя непрозрачный лед.

Процессом, при котором растущая ледяная частица проходит через облако только один раз, можно объяснить возникновение градин диаметром около 1 см. Для образования очень больших градин, диаметр которых превышает 3—4 см, этого уже недостаточно: за одно прохождение сквозь облако частица не сможет захватить нужное количество воды. Растущая градина должна совершить несколько путешествий вверх и вниз. Однако не обязательно, чтобы при подъеме и опускании растущий кусок льда проходил через уровень нулевой изотермы, как предполагалось раньше. Существенно лишь, чтобы градина оставалась в переохлажденной части облака.

ТЕОРИЯ ЛАДЛЕМА

Уже отмечалось, что Ф. Ладлем предложил теорию образования града, в которой принимаются во внимание все известные факты и учитываются новые данные об атмосферных движениях. На рис. 22 показана упрощенная схема грозового облака с градом (по Ладлему). Облако развивается при условии, если ветер усиливается с высотой. В результате восходящий поток приобретает наклон в направлении ветра. Важная особенность этой схемы состоит в том, что движения воздуха согласуются с зонами дождя, кроме того, холодный воздух, подтекающий к основанию облака, непрерывно поддерживает восходящее движение. В свою очередь это движение будет увлекать с собой воздух верхних уровней. В таком облаке восходящее движение в течение 30 минут практически остается неизменным.

Градина образуется в переохлажденной части облака и начинает расти путем коагуляции. По мере роста градины скорость, с которой она падает сквозь облако, тоже увеличивается. Однако поддерживающее усилие со стороны восходящего потока еще настолько велико, что по-

отношению к земле градина продолжает подниматься (рис. 23). Все время, пока происходит такое относительное падение градины, отмечается ее коагуляционный рост.

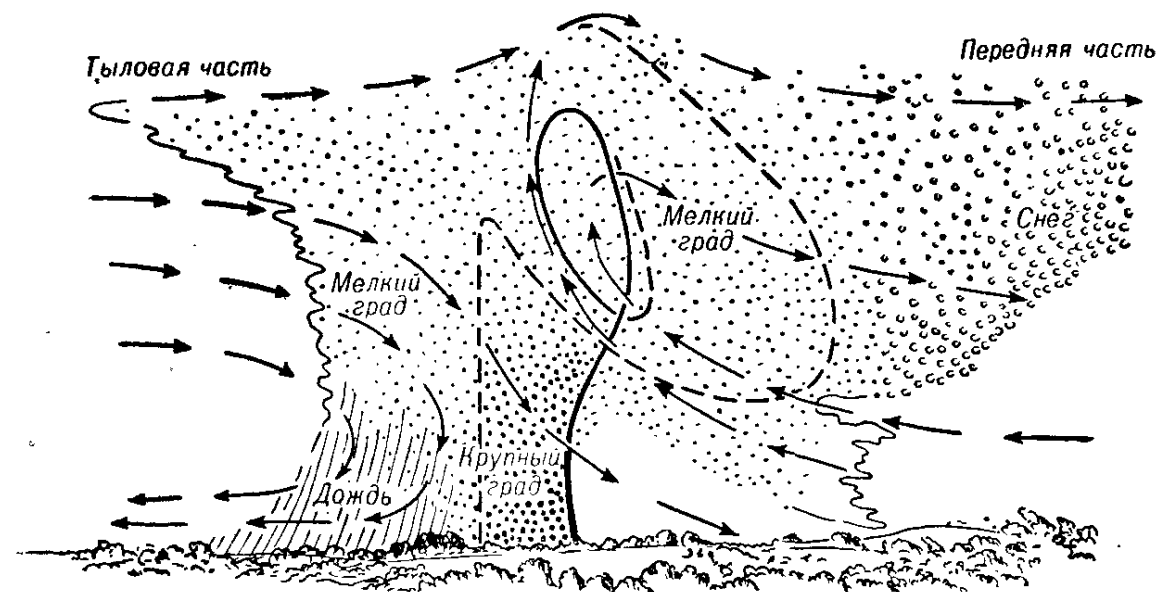


Рис. 22. Модель градобойного облака по Ф. Ладлему. Стрелки — потоки воздуха в облаке. Тонкая пунктирная линия показывает путь мелких градин, толстая пунктирная линия, переходящая в сплошную, — путь крупных градин.

К моменту, когда восходящий поток перенесет градину в верхнюю часть облака, ветер сместит ее в область

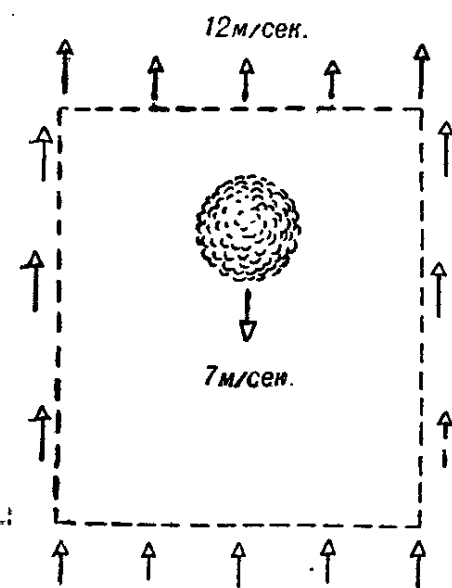


Рис. 23. Восходящий поток увлекает падающую градину.

с более слабым восходящим движением. Здесь градина начнет опускаться к земле. Затем, опустившись на несколько тысяч метров, она снова попадет в основную часть восходящего потока, и начнется ее второе путешествие через переохлажденную часть облака. Несколько таких путешествий может привести к образованию очень крупного града. При большой водности облака и сильном восходящем потоке ледяная частица с первоначальным диаметром 1 мм за 30 минут может вырасти до 3 см. В настоящее время основные

положения теории Ладлема продолжают исследоваться, хотя, по-видимому, эта теория объясняет известные сейчас факты. К сожалению, достаточно хороших наблюдений за градом очень мало. Для того чтобы дать удовлетворительную оценку теории, необходимо наблюдать градины в облаке. Еще несколько лет назад это представлялось безнадежной задачей. Однако в последние годы разработана новая радиолокационная техника, которая делает ее разрешимой. При помощи трех радиолокационных станций и при тщательных наблюдениях сейчас можно получить достаточно точные данные о размере и количестве градин в облаке.

Учитывая возросшее во всем мире внимание к этой проблеме, можно быть уверенным, что в ближайшем будущем наши знания о граде возрастут настолько, что появится возможность предсказывать его более точно. Вероятно, скоро будут разработаны методы эффективной борьбы с градом. В этом направлении ведутся интенсивные работы, но пока они не дали еще ощутимых результатов. К вопросу управления погодой мы вернемся в главе 10.

ГЛАВА 8

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА

Можно не сомневаться, что первый пещерный человек, обнаружив в своей пещере дождевую воду, захотел что-либо сделать для изменения погоды. Многие первобытные племена в различных частях света возносили богам дождя молитвы о воде. «Танцы дождя» у американских индейцев передаются из поколения в поколение. На ежегодных праздниках во Флагстаффе (штат Аризона) индейцы исполняют колоритные танцы для вызывания дождя, причем иногда дождь начинается даже до того, как они окончат свой танец.

Сегодня мы смеемся над этим предрассудком местных жителей. Всем ясно, что барабанный бой и пляски вокруг горящего костра не могут оказать какое-либо воздействие на погоду.

В более близком прошлом многие люди, не верившие в таинственных богов, считали, что на погоду можно воздействовать шумом и взрывами. Во время наполеонов-

ских войн было замечено, что после больших сражений часто шел дождь. Утверждали, что его причиной были выстрелы из пушек и ружей. Однако последующие исследования убедили почти всех, что наблюдавшиеся после сражения дожди имеют другое объяснение.

Дожди и в самом деле часто следовали за битвами. Однако объяснить загадку будет проще, если сказать, что сражения происходили до дождей. Во времена Наполеона войска и орудия перевозились с помощью лошадей, поэтому для быстрого передвижения было необходимо, чтобы земля была сухой. В результате генералы старались приурочить сражения к периодам сухой погоды. Однако, как мы знаем (если исключить районы пустынь), сухие периоды могут длиться несколько дней, возможно, несколько недель, но рано или поздно дожди пойдут снова. Таким образом, то, что дождливые дни часто следовали за битвами, просто объясняется нормальным развитием явлений природы.

Отсюда вытекает важный вывод: связи между погодой и человеческой деятельностью не так очевидны, как иногда кажется.

Погода изменчива всегда, или, цитируя известное изречение, «самое постоянное свойство погоды — это ее непостоянство».

Обычно говорят о средних характеристиках, например о «среднем дожде». Многие, по существу, не осознают значения этого понятия. Например, после 50 дней без дождей и после 50 дней с дождями, дававшими по 2 см осадков, среднее выпадение осадков составляет 1 см. Таким образом, среднее значение соответствует количеству, которое никогда не отмечалось в действительности. На самом деле в любом месте количество осадков обычно меняется от нуля до нескольких сантиметров за день. Эта изменчивость создает значительные трудности при попытках выявить изменения количества осадков, связанных с теми или иными причинами. К этому вопросу мы вернемся в следующей главе.

Большие трудности, связанные с объективной оценкой влияния различных факторов на осадки, не прерывают исследований, направленных на поиски средств активных воздействий на погоду.

Первый шаг на пути к изменению погоды был сделан в 1946 г. В то время В. Шефер и И. Лэнгмюр из лабора-

тории «Дженерал электрик» (штат Нью-Йорк) провели ряд экспериментов, которые вызвали громадный отклик во всем мире. Они убедительно продемонстрировали, что некоторые виды облаков могут быть искусственно рассеяны. Несколько пригоршен сухого льда, выброшенного с самолета в подходящее облако, быстро вызывали исчезновение той части облака, где был произведен засев, при этом на землю медленно опускались снежинки. Эти эксперименты создали то, что иногда называется «научными основами изменения погоды».

ПРИМЕНЕНИЕ СУХОГО ЛЬДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫЕ ОБЛАКА

Чтобы спланировать разумные и выполнимые эксперименты, в том числе и эксперименты с облаками, важно отчетливо понимать, как интересующее нас явление развивается в природе. Если это установлено, то следующий шаг иногда чрезвычайно прост; по крайней мере он кажется простым после того, как кто-либо уже добился успеха. Это справедливо и относительно работы Шефера и Лэнгмюра. Давайте познакомимся с тем, что они сделали на пути к своему выдающемуся открытию.

Многие облака состоят из маленьких водяных капелек, которые довольно однородны по размерам и переохлаждены. Такие облачные системы устойчивы и могут существовать в течение многих часов и даже дней. Как уже отмечалось в главе 6, один из путей нарушения равновесия состоит во введении в облако ледяных кристаллов. Шефер и Лэнгмюр, как и многие другие ученые, знали об этих фактах, но они не остановились на этом. Они спросили себя, почему бы не ввести некоторое количество ледяных кристаллов до того, как это сделает природа, и не посмотреть, что произойдет.

Вот почему следующий шаг в исследовании состоял в нахождении способа образования множества ледяных кристаллов. Было решено использовать сухой лед — твердую углекислоту (CO_2). Несложный опыт в домашнем холодильнике показывает, что если маленький кусочек сухого льда бросить в переохлажденное водяное облако, то образуются крошечные кристаллы льда. Домашний холодильник, кусок черной материи, лампа-вспышка и, конечно, несколько кусочков льда — вот и все, что необ-

ходимо для опыта. Сначала закройте материей внутреннюю часть холодильника, пол морозильной камеры и одну из ее сторон. Затем поместите лампу так, чтобы можно было видеть пучок света, направленный на черную материю. Теперь сделайте выдох в камеру. Вы увидите серое тусклое облачко из крошечных водяных капелек, которое во многом похоже на естественное облако. Движение воздуха в холодильнике заставляет облачные частицы перемещаться вверх и вниз, но они не меняют своего вида.

Теперь бросьте в камеру кусочек сухого льда так, чтобы он пересек пучок света, и внимательно наблюдайте, потому что должны произойти важные события. В облачке из капелек начнут появляться сверкающие точки. Число их будет быстро увеличиваться, и они будут опускаться на дно камеры. Вероятно, вы уже догадались, что произошло.

Сверкающие частицы — это кристаллы льда. Объяснение ярких искорок очень простое: ледяные кристаллы имеют плоские поверхности и свет отражается от них, как от зеркала, а сферические водяные капельки рассеивают свет во всех направлениях. Кристаллы опускаются на дно камеры, потому что они быстро растут в насыщенном водяным паром и охлажденном твердой углекислотой воздухе (см. главу 6).

Некоторое время детальный ход процесса, при котором воздействие сухим льдом порождает кристаллы льда, был не ясен. Теперь известно, что сухой лед понижает температуру до такого уровня, при котором ледяные кристаллы могут образовываться непосредственно из водяного пара. Число ледяных кристаллов, возникающих при внесении кусочка сухого льда, зависит от температуры воздуха и его влажности, а также от размеров кусочка. Например, шарик диаметром 1 см, прежде чем полностью испариться, создаст примерно 10^{11} кристаллов при -10°C .

После того как Шефер и Лэнгмюр осуществили свои опыты, они перешли к воздействиям в атмосфере. Однажды вблизи города Скеннектеди был обнаружен однородный слой переохлажденных слоистых облаков. Маленький самолет, на котором летали исследователи, описал фигуру, напоминающую беговую дорожку. Вдоль пути с самолета были сброшены мелкие кусочки сухого

льда. Затем самолет летал по кругу, в то время как ученые следили за облаками. Через несколько минут стало заметно, что облака изменились: они приобрели вид, характерный для облаков, состоящих из ледяных кристаллов.

С огромным волнением исследователи наблюдали затем, как перед их глазами в огромном масштабе повторялись события, происходившие в лабораторном холодильнике. Когда прошло 20 минут, они убедились, что вызвали в облаке огромные изменения. Как показано на фото XII, сухой лед разрушил облако в его верхней части. Этот эксперимент повторялся много раз. Когда самолет снизился и совершил полет в области воздействия, обнаружилось, что ледяные кристаллы опускались к земле. Некоторые из таких кристаллов иногда достигают земли в виде снега.

Когда Шефер и Лэнгмюр сообщили о своем открытии, они встретились, с одной стороны, со скептиками, а с другой — с необузданными энтузиастами. К последней категории принадлежала небольшая группа людей, которые немедленно ухватились за вывод, что если можно вызвать небольшой снег из тонкого облака путем сбрасывания сухого льда, то таким же путем можно получить много снега из достаточно мощного облака. С 1946 г. прошло много лет, а справедливость этого вывода еще не доказана. Более того, некоторые метеорологи полностью отвергают такую возможность. Мы вернемся к этому вопросу, когда будем знакомиться с искусственным вызыванием дождя. А теперь продолжим наше знакомство с научными основами активных воздействий на облака.

ЧАСТИЦЫ ЙОДИСТОГО СЕРЕБРА КАК ЯДРА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

После того как было убедительно доказано, что строение переохлажденного слоистого облака можно изменить при помощи сухого льда, ученые начали исследовать и другие вещества, которые могли бы способствовать образованию ледяных кристаллов при температуре, близкой к 0°C . В главе 5 мы упоминали о различных природных веществах (в частности, о глинистых частицах), которые вызывают образование ледяных кристаллов. Однако они мало эффективны до тех пор, пока температура не упадет ниже -10 , -15°C . Для воздействия на облака нам

нужны вещества, активно действующие при более высоких температурах. Открытие наиболее эффективного вещества принадлежит Б. Воннегуту, который работал с Шефером и Лэнгмюром в «Дженерал электрик». Учитывая, что ледяной кристалл имеет гексагональную структуру, Воннегут пересмотрел таблицы кристаллической структуры сотен химических веществ и обнаружил, что йодистое серебро имеет кристаллическую структуру, очень похожую на структуру льда.

По примеру Шефера и Лэнгмюра он проделал множество опытов в лабораторной холодильной камере. Первой задачей было создание мельчайших кристаллов йодистого серебра. Перебрав множество способов, Воннегут обнаружил, что пары йодистого серебра, полученные при нагревании этого соединения, по мере охлаждения конденсируются в крошечные частицы диаметром 0,01—0,1 мк. Когда эти частицы в виде тончайшего дыма вдвухались в переохлажденное водяное облако, они превращали его в облако, состоящее из ледяных кристаллов, причем события развивались почти так же, как при опытах с сухим льдом.

Частицы йодистого серебра действовали как семена, из которых выростали ледяные кристаллы. Отсюда и появился термин «засев облаков», такой обычный сегодня.

Не совсем еще ясен механизм воздействия йодистого серебра на структуру облака. Сначала считали, что ледяные кристаллы образуются путем прямого отложения льда на кристаллах йодистого серебра. В настоящее время убедительно доказано, что на частицах йодистого серебра образуется тончайшая пленка воды (толщиной менее 5 молекул). Молекулы, из которых состоит эта пленка, располагаются в соответствии со структурой льда и замерзают. Последующий рост идет путем прямого нарастания льда. В настоящее время этот процесс активно изучается.

Б. Воннегут и другие исследователи показали, что частицы йодистого серебра вызывают кристаллизацию, когда температура в облаке падает ниже -5°C . Они также нашли, что кристаллы йодистого свинца эффективны примерно при тех же температурах, но это вещество не так удобно в обращении, как йодистое серебро.

Некоторое преимущество йодистого серебра перед сухим льдом состоит в том, что оно хорошо сохраняется

и может быть распылено или с земли, или с самолета так, чтобы потоки воздуха переносили частицы в облака. По этим причинам йодистое серебро интенсивно используется во всем мире в опытах по воздействию на облака.

ТЕХНИКА РАСПЫЛЕНИЯ СУХОГО ЛЬДА И ЙОДИСТОГО СЕРЕБРА

Засев переохлажденных облаков — достаточно простое дело. Требуется лишь разбить сухой лед на мелкие кусочки и сбросить их с самолета в облако. Это легко сделать при помощи дробилки льда, установленной на самолете. Обычно применяемая дробилка размельчает лед на кусочки размером от миллиметра до сантиметра. На фото XIII показан конечный продукт одного из видов разбрасывателя сухого льда. Раздробленный лед пропущался через ряд сеток для сортировки кусков по размерам. Самые большие куски имеют в диаметре примерно 1 см, тогда как самые маленькие — величиной с песчинку.

Количество сухого льда, необходимого для воздействия, зависит от толщины облака и цели засева. В общем оно составляет несколько килограммов на 1—2 км полета.

Советские исследователи использовали другую технику воздействия сухим льдом.¹ На самолете оборудуется специальная установка, заполненная кусками сухого льда. Когда самолет летит сквозь переохлажденные облака, воздух, обтекая куски сухого льда, дополнительно охлаждается, вследствие чего образуются ледяные кристаллы. Заметьте, что при этом методе самолет должен лететь сквозь облако. Если же лед разбрасывается, самолет может летать над облаком.

По количеству образующихся ледяных кристаллов и скорости воздействия сухой лед превосходит все реагенты, используемые сейчас при температуре ниже 0°C . Однако серьезное затруднение кроется в необходимости прямого внесения сухого льда в то облако, структуру которого требуется изменить. Далее, раз лед сброшен, он

¹ В СССР исследовали различные методы внесения твердой углекислоты. Метод, о котором говорит автор, применялся для раскрытия взлетной полосы аэродромов от низкой облачности и туманов. (Прим. ред.)

испаряется и в дальнейших процессах не участвует. Йодистое серебро обладает рядом преимуществ: его кристаллы так малы, что они движутся вместе с воздухом. Они могут долго находиться в воздухе, всегда готовые образовать ледяные кристаллы, когда на их пути попадается подходящее облако, правда, если частички йодистого серебра не потеряют своей активности из-за действия солнечного света. Скорость распада ядер зависит (в определенных пределах) от способа их получения. Но в общем число образующих лед частиц уменьшается примерно в 10 раз за каждый час воздействия солнечного света. Например, один из типов генераторов образует 10^{13} частиц на каждый кубический метр воздуха. Это число активных частиц уменьшится до 10^{12} после воздействия солнечного света в течение часа. Поэтому один генератор, выбрасывающий ядра непосредственно в облако, создает столько же активных ядер, сколько 10 генераторов, продукт которых в течение часа освещается солнцем до того, как частицы йодистого серебра попадут в облако.

Генераторы частиц йодистого серебра очень разнообразны. В большинстве случаев сжигается раствор йодистого серебра в сильно воспламеняющейся жидкости — ацетоне. Следует заметить, что йодистое серебро ядовито и с ним необходимо обращаться осторожно. Кроме того, распыленное йодистое серебро не растворяется в чистом ацетоне, но оно растворяется в растворе йодистого калия в ацетоне.¹ Сначала готовится раствор йодистого калия, а затем к нему прибавляется йодистое серебро. На практике применяется концентрация от 5 до 20 частей йодистого серебра на 100 частей раствора.

Приготовленный раствор йодистого серебра в ацетоне (который мы будем называть просто «раствор») может быть сожжен различными путями. Например, можно пропитать этим раствором древесный или каменный уголь. При горении образуются мельчайшие кристаллы йодистого серебра.

В распространенной конструкции наземных генераторов используется пламя газа пропана, в которое при помощи иглы от шприца впрыскивается раствор. По-

¹ Может быть использован и йодистый натрий.

скольку ацетон — легко воспламеняющаяся жидкость, раствор быстро загорается. Йодистое серебро в пламени испаряется. Когда дым охлаждается, образуются кристаллы йодистого серебра диаметром 0,01—0,1 микрон. На фото XIV показан генератор йодистого серебра пропанного типа. Обычный расход раствора составляет 13 кг в час.

Засев облаков при помощи наземных генераторов имеет очень серьезный недостаток. При воздействии трудно быть уверенным, что частички йодистого серебра с земли попадут на высоты, где температура ниже -5°C , и достигнут этих высот над требуемым районом (глава 9). Последнее особенно важно, когда засев производится в летнее время. В этот период года над большей частью США уровень температуры -5°C находится на высотах 5000—6000 м. Поэтому, когда генераторы йодистого серебра находятся на земле, частицы должны подняться на несколько тысяч метров, прежде чем они достигнут тех слоев, в которых смогут проявить активность. Разумеется, частички не поднимаются прямо вверх с достаточно большой скоростью. Они переносятся ветром в горизонтальном направлении и поднимаются только в областях с восходящими потоками или в результате турбулентного перемешивания воздуха. Напомним еще раз, что, чем больше времени затрачивают частицы для достижения ими зоны воздействия, тем больше вероятность того, что солнечный свет «убьет» их эффективность.

Засев с земли не осложняется этими трудностями, когда он производится в горных районах зимой. В некоторых местах облака могут окутывать горные вершины. Если температура воздуха на этих высотах ниже -5°C , то генераторы йодистого серебра, помещенные на вершинах, будут обеспечивать превращение переохлажденных водяных капелек в кристаллы.

САМОЛЕТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ЙОДИСТОГО СЕРЕБРА

Самый надежный способ внесения частичек йодистого серебра в нужную часть облака и в нужный момент времени основывается на использовании генераторов, смонтированных на самолетах. В течение многих лет един-

ственными удовлетворительными по конструкции генераторами были приборы, разработанные австралийскими учеными, работавшими совместно с Боуэном в Государственной научной и промышленной исследовательской организации. Недавно Лесная служба США также разработала достаточно хороший бортовой самолетный генератор.

Одной из причин задержки конструирования самолетных генераторов был тот факт, что ацетон чрезвычайно огнеопасен. Кроме того, раствор йодистого серебра в ацетоне ядовит и обладает сильными коррозирующими свойствами. Обычно в качестве вещества, которое будет соприкасаться с раствором, применяется нержавеющая сталь.

Новый прибор Лесной службы США (фото XV) имеет ряд ценных особенностей. Как и в генераторе австралийских ученых, в нем не используется вспомогательное горючее (в частности, пропан). Топливом является сам ацетон. Сначала ацетон разбрызгивается на мелкие капельки и только затем поступает в горелку. Запальная свеча поджигает эти брызги. В известной степени горелка действует, как реактивный двигатель. Воздух всасывается из набегающего на самолет потока, смешивается с ацетоном, который сгорает, а затем выбрасывается в атмосферу. Когда испарившееся йодистое серебро выносится воздушным потоком из камеры сгорания, оно сублимируется в миллиарды кристаллов.

Рисунок 24 дает представление о числе кристаллов, образующихся из 1 г йодистого серебра. Из рисунка следует, что, чем ниже температура, тем больше число эффективных ядер. Как было отмечено в главе 5, эта закономерность справедлива и для природных ядер.

Если нужен более эффективный засев облаков, то необходимо увеличить число ядер, особенно если температура выше -15°C . Рисунок показывает, что при -10°C число возникающих ядер уменьшается до 10^{13} — 10^{12} на 1 г.

Самолетный генератор (фото XV) за час расходует примерно 20 литров 10-процентного раствора йодистого серебра в ацетоне. В результате на 1 км полета при скорости 145 км/час в атмосферу выбрасывается примерно 25 г йодистого серебра. Можно вычислить, что при данной мощности генератора количество ядер составляет

около 10^{13} на 1 м^3 . Так как для выпадения осадков в 1 м^3 должно содержаться от 10^3 до 10^4 активных частиц, в нашем случае концентрация вблизи генератора окажется излишне большой, она превысит расчетную в 10^9 — 10^{10} раз. Для уменьшения концентрации необходимо лететь в зоне восходящих потоков так, чтобы частицы могли распространиться на больший объем. Если

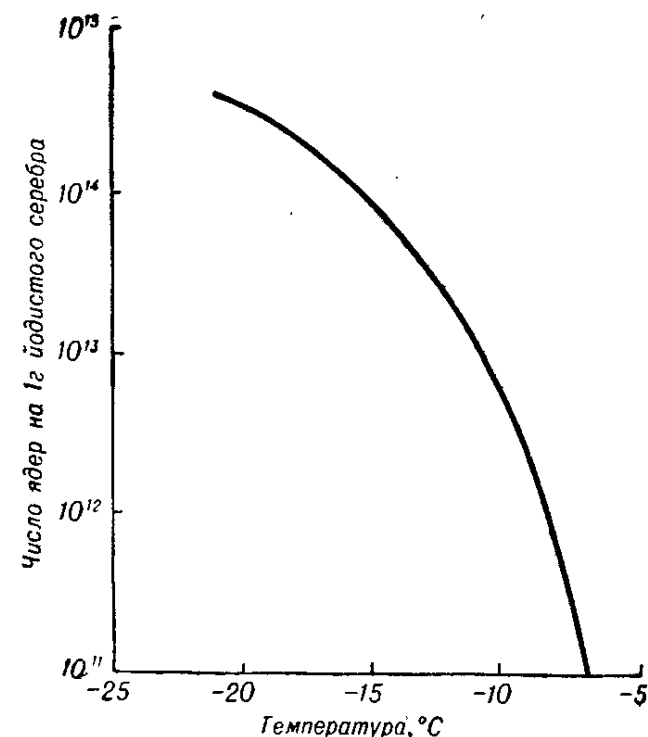


Рис. 24. Число ядер, образующихся из 1 г йодистого серебра, в зависимости от температуры (генератор Лесной службы США).

ядра будут распылены в цилиндре диаметром 2 км, то концентрация их изменится с 10^{13} до $4 \cdot 10^4$ на 1 м^3 , т. е. до величины, близкой к требуемой. Представляется, что для такого рассеяния необходимо 1—2 часа. Однако скорость рассеяния частиц в воздухе выяснена еще недостаточно.

Фото XV дает представление о генераторе, разработанном Д. Фиквеем и Г. Уэллсом (Лесная служба США). Цель этой конструкции — обеспечить максимальные удобства и безопасность. Вся система расположена вне самолета и крепится на бомбодержателе. Резервуар, содержащий раствор ацетона, находится в верхней части

прибора; под ним — камера сгорания. В системе нет никаких насосов. Когда самолет летит, рассекая воздух, на конце соединительной трубки возникает повышенное давление. Это избыточное давление оказывает воздействие на верхнюю часть жидкости, выжимая ее в камеру сгорания. Поток ацетона перекрывается специальным клапаном.

Генераторы для засева облаков, описанные в настоящей главе, — это лишь несколько примеров из большого количества применявшихся приборов. Нет сомнения в том, что распыление частичек йодистого серебра этими генераторами может вызывать образование ледяных кристаллов в переохлажденных облаках. Однако остается еще много нерешенных вопросов о воздействии ледяных кристаллов на выпадение дождя или града, а также на другие явления погоды. Мы вернемся к этому вопросу в следующих двух главах.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА „ТЕПЛЫЕ“ ОБЛАКА

Для того чтобы сухой лед или йодистое серебро оказали свое воздействие, облака должны быть переохлажденными. Нет ли какого-либо пути воздействия на облака, температура которых выше 0°?

В главе 6 указывалось, что естественный дождь может быть следствием как процессов с участием ледяных кристаллов, так и процессов коагуляционного слияния капель. Сухой лед и йодистое серебро используются для засева тех облаков, в которых в естественных условиях активно развиваются процессы при наличии ледяных кристаллов. Процесс слияния является причиной дождя из теплых облаков. Раньше мы упоминали, что этот процесс эффективен тогда, когда, кроме облачных частиц, есть небольшое количество гигантских ядер с диаметром около 100 микрон. Этот факт дает необходимую путеводную нить для воздействия на теплые облака. Надо ввести в них небольшое количество крупных облачных капелек. При организации таких воздействий были применены две схемы.

Если облака засеваются гигантскими солевыми ядрами, то облачные частицы могут вырасти до больших размеров путем конденсации. Опыты по такой методике были проделаны в различных странах мира. Ф. д'Альб

выполнил серию экспериментов в Пакистане. В ходе этих опытов в нижних слоях воздуха производилось распыление солевых частиц. Считалось, что восходящие потоки могут занести эти частицы в облака. В нескольких странах Африки частицы соли забрасывались в облака при помощи ракет. Целью экспериментов являлось увеличение количества осадков, однако их результаты оказались неубедительными. Только в нескольких случаях опыты как будто удались.

Второй путь воздействия на теплые облака был разработан в 1948 г. И. Лэнгмюром. Он предложил стимулировать процесс слияния облачных капелек путем добавления водяных капелек диаметром от 50 до 150 микрон. Группы исследователей в США и Австралии провели несколько пробных засевов, при которых в конвективные облака вводились мелкие капли воды. На фото XVI показано распыление воды из 1800-литрового резервуара в бомбовом люке на самолете Б-17 во время одного из экспериментов, проведенных учеными Чикагского университета. Вода, вылившаяся через отверстие площадью около 625 см², распылялась ударом воздушного потока. Другие исследователи для разбрызгивания пользовались форсунками. Расход воды при засеве менялся от 30 до 1400 литров на 1 км полета. Боуэн (Австралия) сообщил о некоторых итогах своих опытов. Исследовательская группа из Чикагского университета выполнила серию опытов, которые привели к выводу, что распыление воды в облако может положить начало дождю. Подробности этих опытов будут рассмотрены в следующей главе.

ГЛАВА 9

ИСКУССТВЕННОЕ ВЫЗЫВАНИЕ ДОЖДЯ

Когда распространилось известие о том, что Шефер и Лэнгмюр удачно воздействовали на облака путем сбрасывания в них сухого льда, почти сразу же были осознаны потенциальные возможности этого метода. Во всем мире росла потребность в воде. Многие города и сельские районы уже страдали от острого недостатка воды. Фермеры, бизнесмены и политики сразу оценили огромные практические преимущества надежных способов увеличения осадков. Когда было открыто действие

йодистого серебра, настроение поднялось еще выше. Ведь использование этого реагента не требовало даже самолета. Растущие надежды поддерживались несколькими сумасбродными метеорологами, которые учредили компании по искусственному вызыванию дождя.

КОММЕРЧЕСКИЙ ЗАСЕВ ОБЛАКОВ

В начале 1950-х годов в США несколько коммерческих фирм по воздействию на облака утверждали, что осадки могут быть увеличены на 50—100% и даже больше в зависимости от местных условий. Конечно, основания для подобных заявлений были не слишком надежными, но фермеры, урожай которых засыхал на полях, хотели собрать не только одну солому. Города, вынужденные нормировать расход воды, тоже были готовы рискнуть, приняв на себя часть расходов.

В конце 1940-х — начале 1950-х годов мы не знали почти ничего об эффектах воздействия с земли на облака с целью вызывания дождя. Правда, при опытах ученых из «Дженерал электрик» было получено небольшое количество снежинок, выпавших из тонкого слоя облаков. Но осадков было так мало, что они по большей части не поддавались измерению.

Когда результаты опытов были опубликованы, большинство ученых признало их интересными, но неубедительными. Позиция была такой: «Покажите мне больше — и вы убедите меня». Однако некоторые ученые не проявили должной осторожности.

Результаты первых опытов были немедленно истолкованы в самом широком смысле. Казалось, что если небольшое количество снега удастся вызвать из тонкого облака, то из мощных облаков можно получить много осадков. На основании этого предположения развернулись коммерческие воздействия с целью получения осадков.

Некоторые коммерческие попытки воздействия на облака были весьма успешными. В ряде мест, подверженных продолжительным засухам, начало засева облаков совпало с началом дождей, что было неправильно истолковано.

Люди начинают беспокоиться о дожде, когда он не идет в нужное время и в нужном месте. Никто не будет заботиться о дожде, если в осадках нет недостатка.

Когда же осадков выпадает значительно меньше обычного, этот факт становится хорошо известен. Во время обычных коротких сухих периодов в газетах, по радио и телевидению часто сообщают о числе дней без дождя. По мере того как число таких дней растет, растет и внимание к подобным сообщениям. Естественно, что в этих случаях некоторые люди спрашивают: «Почему мы не можем что-либо сделать?»

И вот некоторые коммерческие фирмы по воздействию на облака начали распыление йодистого серебра как раз при такой ситуации. Если пошел дождь, все счастливы и «делатель дождя» вознаграждается за заслуги. Но прежде чем поздравлять, следовало бы спросить, действительно ли дождь вызван распылением йодистого серебра.

Характерная особенность погоды, которая хорошо известна, но часто упускается из виду, состоит в том, что погода необычайно изменчива. Чередование теплых и холодных, дождливых и сухих, облачных и ясных периодов является скорее правилом, чем исключением. Эти периоды длятся неделями, годами и столетиями. Наблюдения за количеством осадков показывают, что нет такого места, где дожди внезапно прекратились бы и никогда не начались снова. Если наступил сухой период и день за днем нет дождей, то можно быть уверенным, что засуха не будет продолжаться вечно. Она может длиться до тех пор, пока трава на полях не выгорит или в городах будут умываться лишь два раза в неделю, но рано или поздно дождь пойдет снова.

Из этих фактов становится понятно, почему некоторые коммерческие воздействия по засеву облаков имели успех: они производились после продолжительных периодов засушливой погоды. За сухими периодами следовали периоды с нормальным выпадением дождей. Воздействие, которое, казалось, вызвало осадки, могло быть простой случайностью. Природа действовала по-своему.

Можно не сомневаться, что здесь у читателя возникнет вопрос: доказано ли, что засев облаков может увеличить количество осадков?

К сожалению, ответа на этот вопрос нет. Сейчас известно, что в определенных случаях путем активных воздействий можно получить небольшое увеличение количества осадков, но достаточно убедительно не доказано,

что засев облаков может явиться причиной выпадения дождя.

Давайте рассмотрим, с чем связан такой неутешительный ответ, а затем вернемся к поискам более удовлетворяющих нас решений.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Слово «статистика» имеет разный смысл для различных людей. Для некоторых оно означает «вводить в заблуждение других». Мы часто слышим: «Вы можете доказать что угодно при помощи статистики». С другой стороны, говорят: «Вы не можете ничего доказать при помощи статистики».

На самом же деле, когда законы статистики выяснены и правильно применяются, статистика не лжет и не вводит в заблуждение. Она не доказывает строго наличия чего-либо. Но статистика дает единственно удовлетворительное средство для опровержения чего-либо. Прежде чем возмущаться таким утверждением, подумаем, что оно значит.

Предположим, у вас есть монета и вы подозреваете, что она не уравновешена так, чтобы при ее падении решетка появлялась столь же часто, что и герб. Для удобства будем называть правильно уравновешенную монету «правильной». Если вы подбросите монету 100 раз и 50 раз она упадет на герб и 50 раз на решетку, вы будете вправе заключить, что монета «правильная». С другой стороны, пусть при 100 подбрасываниях 55 была решетка и 45 раз — герб. Подобный результат мог бы привести вас к заключению, что монета неправильно уравновешена, потому что решетка выпала на 10 раз больше. Однако вам следует поинтересоваться, не случайна ли эта разница. Статистика дает возможность ответить на такой вопрос.

Ход рассуждений достаточно прост. Предположим, что монета «правильная». Если это так, то вероятность выпадения герба или решетки при одном подбрасывании равна $\frac{1}{2}$. Вероятность любой комбинации выпадений герба и решетки может быть вычислена по формуле, выведенной очень давно. Из формулы следует, что, если 100 бросаний монеты 50 раз дают герб и 50 раз — решетку, вы можете быть уверены в «правильности» мо-

неты. Значит, предположение о том, что монета «правильная», не может быть отвергнуто, и поэтому мы принимаем его.

Вероятность получения в 55 случаях решетки и в 45 случаях герба при «правильной» монете составляет $\frac{32}{100}$. Отсюда следует, что результат 55 на 45 может быть случайностью. Поэтому вы не можете отвергнуть гипотезу, что монета «правильная».

Пусть какая-то монета дает 60 раз решетку и 40 раз герб. Вероятность получения такого результата с хорошо уравновешенной монетой составляет примерно $\frac{4}{100}$. Поскольку это вряд ли возможно, мы приходим к заключению, что, если монета «правильная», результат 60 на 40 не мог бы иметь места. Поэтому приходится отбросить гипотезу, что монета должным образом уравновешена. Мы говорим, что эта гипотеза опровергнута. Заметьте, однако, что теперь известна вероятность того, что наше заключение ошибочно. Чем меньше вероятность, тем меньше возможность ошибки. Величина вероятности, при которой гипотеза считается опровергнутой, — величина, называемая *уровнем значимости*, — не может быть заранее твердо установлена. Она зависит от типа задачи. В большинстве задач метеорологии число $\frac{5}{100}$ обычно берется как величина вероятности, при которой любая гипотеза отвергается.

В дополнение заметим, что исследование монеты включало следующие этапы: 1) установление гипотезы (статистики называют ее первоначальным предположением); 2) разработку и выполнение серии опытов; 3) вычисление вероятности события в этой серии в предположении, что гипотеза верна; 4) опровержение гипотезы, если вероятность окажется меньше $\frac{5}{100}$.

При оценке эффектов воздействия на облака следует рассуждать в такой же последовательности. Гипотеза до испытания состоит в том, что засев не дает эффекта. Если статистический анализ приведет к опровержению этой гипотезы, значит, засев либо увеличивает, либо уменьшает количество осадков. Окончательное решение определяется тем, что физически более обоснованно, а также наблюдениями за выпадением осадков.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ЗАСЕВА ОБЛАКОВ

В начале 50-х годов в США коммерческие воздействия на облака производились следующим образом.

Если группа владельцев ранчо была заинтересована в увеличении осадков на их землях, то вокруг их владений на земле устанавливались батареи генераторов йодистого серебра. При появлении облаков часть генераторов включалась, причем выбирались те генераторы, которые находились с наветренной стороны по отношению к владениям. Регистрация осадков велась в различных местах той территории, где требовалось увеличить количество осадков, и вокруг нее.

В конце сезона (например, в июле и августе) количество осадков на площади засева суммировалось. Это число сравнивалось с осредненным за длительный период количеством осадков (так называемым нормальным количеством осадков¹) за те же месяцы. Если осадков за период засева было больше «нормального», сам собой напрашивался вывод, что воздействие было эффективным. Однако, как мы отметили, такой ход рассуждений может сбить нас с правильного пути. Тот факт, что нормальное количество осадков вычислялось путем осреднения за периоды с большим и меньшим, чем «нормальное», количеством осадков, делает результаты эксперимента, подобного описанному, мало убедительным.

Когда это было учтено, предложили новую схему для оценки эффектов засева облаков. Вместо одной площади стали использовать две. Одна называлась *контрольной площадью*, другая — *опытной*. Над опытной площадью производили распыление йодистого серебра. Допустим, что нам удалось найти рядом расположенные площади со сходными условиями погоды. Это означает, что, когда количество осадков на опытной площади велико, оно должно быть большим и на контрольной площади; то же самое должно иметь место и в случае малого количества осадков. Говоря языком статистики, необходимо, чтобы количество осадков на двух площадях имело тесную корреляционную связь. В идеальном случае линия, показывающая связь количества осадков на двух площадях,

¹ Автор имеет в виду среднее многолетнее количество осадков. (Прим. ред.)

имела бы вид линии на рис. 25. Точки, соответствующие количеству осадков за какой-либо период времени, должны лежать на прямой линии. Такая линия должна соответствовать условиям, когда не производили воздействия. Во время дождливых лет обе площади должны быть влажными, во время засушливых — сухими.

Напомним, что проведение мероприятий по засеву облаков ограничивалось только опытной площадью.

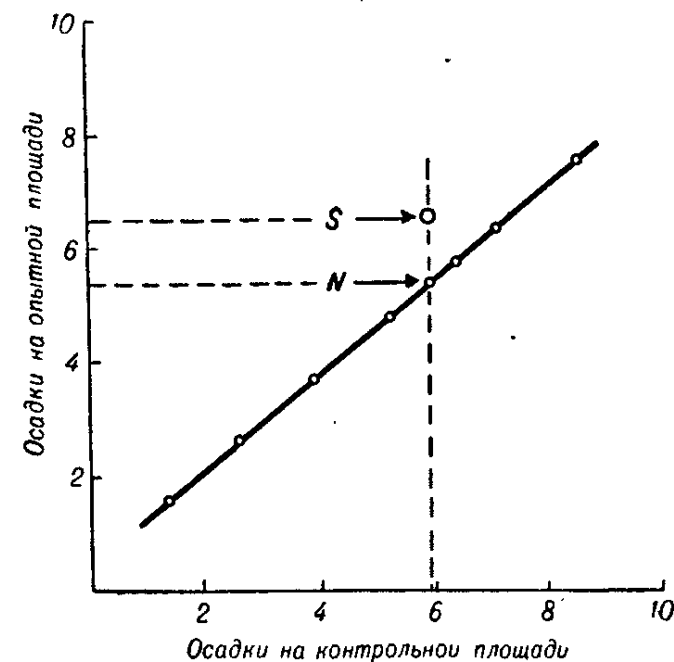


Рис. 25. Корреляционный график, показывающий количество осадков на контрольной и опытной площадях в идеальных условиях.

Если засев был эффективным, следует ожидать увеличения осадков на опытной площади, но не на контрольной. Тогда связь между осадками станет другой (большой кружок на рис. 25).

Если в идеальном случае действительно имел бы место подобный эффект, мы пришли бы к заключению, что засев вызвал увеличение осадков. Тот факт, что данный год был излишне сухим или дождливым, найдет свое отражение в количестве осадков на контрольной площади.

Ожидаемое количество осадков при отсутствии воздействий над опытной площадью отмечено на графике точкой N. Если количество осадков на опытной площади

при воздействии на облака было таким, как указано точкой S , то на графике видно, что засев вызывает увеличение осадков, определяемое разностью $S-N$.

Эта как будто совершенно понятная схема оценки эффективности засева облаков широко применялась на практике. Однако в действительности она не так хороша, как кажется на первый взгляд. Здесь тоже не исключены ошибочные выводы.

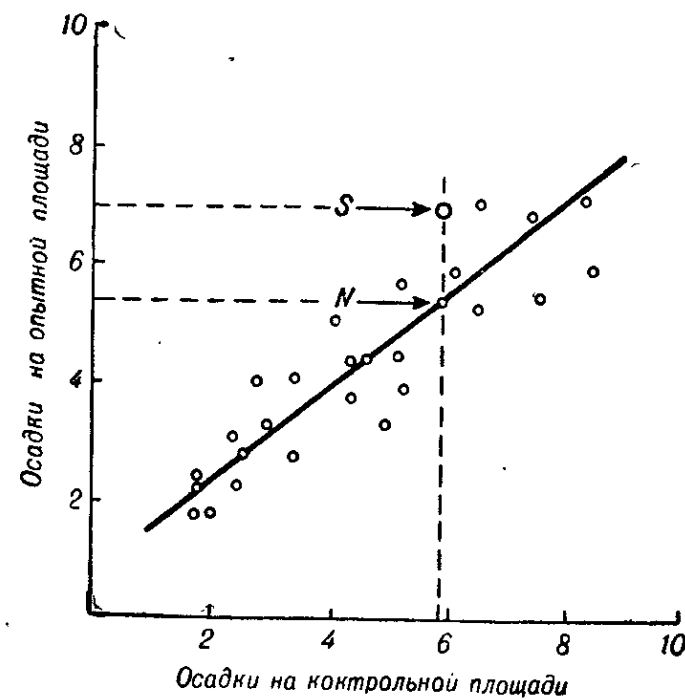


Рис. 26. Реальный корреляционный график количества осадков на опытной и контрольной площадях. Прямая, проведенная через точки (линия регрессии), построена так, чтобы точнее всего учесть отношение количества осадков на двух площадях.

Самая большая трудность состоит в том, что нет двух площадей с идеально соответствующими условиями погоды. На рис. 26 в виде системы точек дана более правдоподобная зависимость количества осадков на опытной и контрольной площадях. Линия, проведенная на этом графике, наилучшим образом связывает количество осадков на контрольной и опытной площадях. Можно считать, что она как бы характеризует средние условия. Однако здесь важно подчеркнуть, что опытные точки не расположены точно на линии, а отклоняются от нее.

Предположим, что засев производился достаточно хорошо и что точка S характеризует количество осадков за этот период. Несправедливо было бы заключать, что, поскольку точка расположена выше линии, засев эффективен.

Даже если выбранная нами точка лежит дальше от линии, чем какая-нибудь другая точка, это еще не дает основания заключить, что засев облаков увеличивает количество осадков. Для этого вывода необходимо доказать, что вероятность получения такого результата меньше $\frac{5}{100}$. Вместе с тем важно понять, что для уверенных статистических заключений отбор опытов (периодов засева облака) должен быть сделан специально.

Рассуждения, подобные рассмотренным выше, были действительно использованы для изучения данных одной серии опытов. Они привели к выводу, что засев йодистым серебром вызывает увеличение количества осадков.

Этот вывод был подвергнут критике на том основании, что контроль за результатами засева был недостаточным. Например, было отмечено, что лица, выполнявшие засев облаков, сами выбирали дни для этого и что такой отбор не мог не оказать влияния на результаты. В этом случае значительную роль может играть опыт в выборе дней, которые благоприятны для выпадения сильных дождей над опытной площадью. Тогда создается впечатление, что засев увеличивает количество осадков. Статистики установили, что для постановки действительно убедительных опытов необходимо ввести в отбор элемент случайности, т. е. чтобы решение вести или не вести засев принималось каким-либо механическим устройством, дающим случайный ответ, подобный по результату опыту с подбрасыванием монеты. Если ситуация представляется благоприятной, подбрасывается монета; решетка означает выполнение засева, герб — нет. В каждом случае, когда встречаются подходящие облака, повторяется та же процедура случайного выбора.

Есть много способов ввести элемент случайности в эксперименты по воздействиям. Здесь задача состоит в том, чтобы помешать экспериментаторам сознательно или бессознательно оказывать влияние на результаты.

Если невозможно найти две близко расположенные

площади, количество осадков на которых тесно коррелируется друг с другом, можно исследовать выпадение осадков на одной площади. В отдельные дни или группы дней, выбранных случайным образом, засев можно вести или не вести.

Важны и другие вопросы, связанные с активными воздействиями на облака. Число и расположение дождемеров должны быть выбраны так, чтобы получить сравнимые количества осадков.

Конечно, важно, чтобы реагенты (обычно йодистое серебро) попадали в облако на уровне с необходимой температурой и в достаточной концентрации. Когда распыление частиц проводится с земли, часто трудно узнать, выполняются ли эти условия. При засеве же с самолета можно быть более уверенным, что эти требования соблюдены.

Все вышеприведенные замечания должны быть приняты во внимание при разработке различных проектов искусственного увеличения осадков. До тех пор пока они не будут учтены, нет никакой уверенности в том, оказал ли засев какое-либо воздействие на количество выпавших осадков.

Наконец, мы должны иметь в виду, что любая методика воздействия на облака не может иметь ни малейшей надежды на успех, пока облака соответствующего типа не появятся в достаточном количестве и при нужной температуре. Иногда йодистое серебро использовали для воздействия на облака, которые не достигали уровня 0°C . Конечно, в этом случае усилия были обречены на неудачу.

Рассмотрим некоторые из наиболее интересных опытов по искусственному вызыванию осадков и познакомимся с их результатами.

НЕКОТОРЫЕ ОПЫТЫ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ВЫЗЫВАНИЮ ОСАДКОВ

Все многочисленные проекты искусственного вызывания дождя, предложенные с 1947 г., удобно разделить на две группы. Первая группа включает те проекты, которые ставили своей целью практическое разрешение задачи. Для этого облака (в том числе и грозовые) подвергались засеву и при помощи дождемеров измерялось, сколько дождя или снега достигло земли. Как отмеча-

лось в предыдущем разделе, этот подход не так прост, как представляется на первый взгляд.

Другой подход к решению задачи состоял в изучении результатов засева отдельных облаков.

Цель экспериментов — вызвать, если это возможно, выпадение осадков из облаков, которые в естественном состоянии дождя не дают. Вместо дождемеров для определения того, образуются ли осадки вообще, а если образуются, то когда именно, использовался радиолокатор (см. фото X). В этих исследованиях засев обычно производился с самолета. Естественно, что в таком случае можно выбрать для эксперимента наиболее подходящие облака.

При этом с большей или меньшей степенью уверенности предполагалось, что если удастся вызвать дождь, то количество осадков на земле заметно увеличится автоматически.

Достоверность этого утверждения далеко не очевидна. Капли дождя, образовавшиеся в облаке, могут частично или полностью испариться, прежде чем они достигнут земли. Тем не менее для понимания того, как образуется естественный дождь, важно знать, может ли добавление сухого льда, йодистого серебра, соли или водяных капель вызвать образование в облаках дождевых капель.

Рассмотрим сначала те эксперименты, которые ставят своей задачей зарождение дождя. Затем перейдем к опытам, целью которых является практическое решение более важной задачи — вызывание дождя.

ЗАРОЖДЕНИЕ ДОЖДЯ

Группа австралийских ученых, работавших под руководством Боуэна, в период с 1947 по 1951 г. выполнила широкую программу исследований. Они сбрасывали сухой лед в растущие кучевые облака и наблюдали за ними при помощи самолетной радиолокационной установки. Результатом этих опытов было заключение о возможности искусственно вызывать осадки. К сходным выводам пришли другие исследователи, в том числе группа ученых из «Дженерал электрик», возглавлявшаяся Лэнгмюром и Шефером. С другой стороны, Кунс и Ган (Бюро погоды США), проводившие работы в течение 1948—1949 гг., сообщили, что, как правило, они не могли

вызвать осадки в тех случаях, когда в радиусе 50 км из других облаков не выпадали дожди. Отсюда следует, что дождь не может быть искусственно вызван до тех пор, пока не сложились условия для естественного его выпадения. Эти исследователи также отмечали, что количество дождя из облаков, подвергшихся воздействию, было очень малым. Их окончательный вывод заключался в том, что засев конвективных облаков не может заметно увеличить количество осадков.

В Африке, Азии и других районах было сделано много попыток вызвать дождь из теплых облаков путем засева их гигантскими ядрами конденсации. В некоторых случаях частицы соли забрасывались в облако ракетами, в других соль сбрасывалась с самолетов. Как и при использовании сухого льда, некоторые сообщения были положительными, другие — отрицательными.

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЗАСЕВУ ОБЛАКОВ

Одна из трудностей оценки результатов большинства описанных выше исследований состоит в невозможности удовлетворительного использования методов статистики.

Важным исключением была большая работа, проведенная группой ученых Чикагского университета под руководством Г. Байерса и Р. Брахэма. Цель работы состояла в исследовании воздействия сухого льда на холодные кучевые облака и мелких капелек воды на теплые кучевые облака. Поскольку эта работа дала убедительные результаты, имеет смысл рассказать о ней более подробно.

Проект исследований был тщательно разработан статистиками В. Крушалом и А. Браунли.

В начале исследований было решено засеивать отдельные облака и использовать радиолокационную установку на борту самолета для регистрации образования в облаках частиц осадков. При этом выяснилось, что некоторые из облаков, выбранных для изучения, давали типичное радиолокационное эхо от осадков, даже если они не засеивались. Важно было найти сначала способ, позволяющий отличать группу засеиваемых облаков с «дождевым» эхо от группы облаков, которые не засеивались, но тоже давали эхо.

Как уже упоминалось, для правильного использования статистики опыты необходимо ставить так, чтобы исследователи никак не могли влиять на их результаты. Поэтому в работу специально ввели случайную выборку. Было решено, что облака будут изучаться парами. Схема случайной выборки была использована для того, чтобы решить, какое облако из пары будет засеиваться, а какое — нет.

Исследование в течение небольшого периода времени двух облаков, близко расположенных друг к другу, имело то преимущество, что позволяло применить довольно простые статистические приемы. Однако при статистической обработке парных наблюдений следует принять некоторые предосторожности, иначе все результаты эксперимента могут оказаться сомнительными.

Наиболее важная предосторожность состоит в том, что ученый, выбирающий облако для исследования (этого ученого мы будем называть контролером), не должен знать, будет ли данное облако засеиваться. Если первое облако из пары засеивается, тогда второе не будет засеиваться, и наоборот. Поэтому если контролер знает, что воздействию подвергнется первое облако, он знает также, будет или не будет засеиваться второе облако.

Скажем, первое облако из пары не было засеено и не дало радиолокационного эха. Если контролер склонен доказать, что засев эффективен, он может выбрать в качестве второго (засеиваемого) облака наиболее массивное из имеющихся. Даже если контролер совершенно не предубежден, знание того, что должно произойти, может оказать на него влияние при выборе облаков.

В экспериментах Чикагского университета была принята следующая схема работы. Использовался самолет Б-17 с достаточно хорошей бортовой радиолокационной установкой. В полете контролер сидел позади пилота. Его работа состояла в выборе направления полета и облаков, подлежащих исследованию.

После того как самолет достигал высоты засева и все оборудование было проверено, начинались испытания. Когда контролер замечал растущее кучевое облако, развившееся до высот, где возможны естественные осадки, самолет пролетал через облако или вблизи него. Оператор радиолокатора отмечал наличие или отсутствие эха от облака. Если эха не было, контролер давал инструк-

цию пилоту, чтобы он летел от облака примерно в течение 20 секунд, затем поворачивал на 180° и направлялся через облако. Одновременно остальному экипажу сообщалось, что облако отобрано для изучения.

Другой исследователь, находившийся в хвостовом отделении самолета, тоже получал указания. Этот исследователь, инженер-метеоролог по специальности, управлял комплексом электронных приборов для выполнения многочисленных измерений в облаках. Он также управлял оборудованием для засева. Важно заметить, что этот исследователь был отделен от контролера бомбовым отсеком и радиорубкой. Контролер не мог знать, что происходит в задней кабине.

Когда инженеру-метеорологу сообщали, что первое облако выбрано, он вскрывал запечатанный конверт. В конверте была карточка с указанием: «Засевать первое облако; не засевать второе облако», или наоборот. Карточки в конвертах были заготовлены заранее по принципу случайной выборки.

Когда самолет снова направлялся к облаку, инженер был готов выполнить то, что предписано в инструкции.

Если в карточке указывался засев, инженер принимал исходное положение для засева и ждал окончательного сигнала.

Когда самолет был примерно в 10 секундах полета от облака, контролер начинал считать: «Десять, девять, восемь, семь...» На счете «ноль» инженер-метеоролог нажимал выключатель, и облако засевалось. Контролер вообще не знал, был ли нажат выключатель или нет. Затем самолет несколько раз заходил в облако, пока оно не рассеивалось или не давало дождя. Экран радиолокатора фотографировали для получения непрерывной записи и установления, появилось ли эхо от осадков.

После того как первое облако было полностью исследовано, контролер искал другое облако, подобное первому. Следовала та же процедура, за исключением того, что инженер-метеоролог выполнял противоположное действие: если он засеивал первое облако, то второе уже не засеивалось.

Подчеркнем еще раз, что контролер не знал, какое облако из пары засеивалось. Поэтому он мог без вреда для дела выбирать облака, непохожие друг на друга. Однако, даже если они резко различались (в некоторой

степени облака различались почти всегда), схема случайного отбора давала уверенность в том, что после длительной серии опытов группы засеваемых и незасеваемых облаков будут статистически однородными.

Холодные кучевые облака над центральными и юго-западными районами США засеивались сухим льдом. Число радиолокационных эхо в засеваемых облаках было больше, чем число эхо в незасеваемых облаках, но различие оказалось небольшим.

При других полетах оказался эффективным засев теплых облаков. Облака над океаном вблизи Пуэрто-Рико были засеяны капельками воды, большая часть которых имела диаметр в несколько сотен микрон. Эти капельки образовывались при сбрасывании 1800 литров воды через бомбовый люк самолета Б-17 примерно в течение тех 20-секундных интервалов, за которые самолет пролетал сквозь облако. В засеваемых облаках дождевое эхо отмечалось почти в два раза чаще, чем в незасеваемых. Вероятность того, что результаты этих наблюдений являются случайным совпадением, составляла всего лишь $\frac{2}{100}$. Было также обнаружено, что в засеваемых облаках дождевое эхо возникает примерно за половину того времени, которое требуется для формирования эха в незасеваемых облаках.

Эта серия экспериментов четко показала, что засев облаков водяной пылью может вызвать осадки в тропических кучевых облаках. Это важный шаг вперед. Однако остался без ответа вопрос, может ли засев облаков увеличить количество осадков на земле.

УВЕЛИЧЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ НА ЗЕМЛЕ

В нескольких научных статьях и многочисленных сообщениях компаний по засеиванию облаков утверждается, что частицы йодистого серебра, распыленные наземными генераторами, вызывают увеличение количества осадков. Тем не менее ученые в начале 50-х годов еще не были уверены, можно ли доверять этим заявлениям, потому что многие детали таких работ оставались невыясненными.

В 1953 году в США был создан Совещательный комитет по управлению погодой. Комитет был основан для изучения состояния проблемы изменения погоды.

За три года статистики и метеорологи, привлеченные Комитетом, проанализировали все данные, которые они смогли получить. По большей части эти материалы были представлены работниками коммерческих компаний всех штатов США. Окончательный вывод из доклада Комитета, опубликованного правительственными учреждениями в 1957 году, гласил:

«На основании статистических оценок зимнего засева облаков йодистым серебром Комитет приходит к следующим выводам.

1. Примененный статистический подход указывает, что засев конвективных облаков зимнего типа в горных районах запада США вызывает среднее увеличение осадков на 10—15% по сравнению с количеством осадков из тех же облаков при отсутствии засева. С достаточной уверенностью можно утверждать, что это увеличение не является результатом естественной изменчивости количества осадков.

2. В равнинных районах тот же статистический подсчет не обнаружил увеличения осадков, которое можно было бы объяснить засевом облаков. Это не означает, что эффект воздействия полностью отсутствует. Большая изменчивость осадков над равнинами делает применяемый метод недостаточно чувствительным к небольшим изменениям, которые здесь могли иметь место.

3. В материалах всех проектов увеличения осадков не были обнаружены факты, указывающие, что засев вызвал четко выраженный отрицательный эффект».

Заключения Комитета вызвали различную реакцию. Некоторые метеорологи приняли их за первое конкретное доказательство того, что в определенных условиях, например при зимних ливневых облаках над горными районами, можно существенно увеличить количество осадков. Наряду с этим выводы Комитета были подвергнуты критике со стороны группы статистиков, которые утверждали, что заключения Комитета не могут быть приняты. Главным соображением, которое они выдвинули, было то, что при экспериментах осуществлялся неудовлетворительный контроль. В особенности подчеркивалось, что опыты построены не на основе случайного выбора и что поэтому применение статистической обработки неправомерно. Эта позиция получила поддержку

многих ученых, принимавших участие в экспериментах по засеву облаков.

В 1957 году многим метеорологам США стало очевидно, что опыты по вызыванию дождей следует выполнять при научном контроле за их результатами. На западе США в течение 4 лет была осуществлена обширная программа исследований, для выполнения которой были приглашены лучшие специалисты коммерческих фирм по засеву облаков и группа университетских статистиков. Зимние грозовые облака были засеяны с помощью наземных генераторов йодистым серебром с применением случайной выборки. В силу различных причин, большинство из которых было вне контроля исследователей, результаты этой проверки оказались неубедительными.

Примерно в то же самое время исследование с применением случайной выборки засева облаков йодистым серебром с борта самолета было осуществлено в Аризонском университете. Изучались летние кучевые облака над достаточно изолированными горными районами. Материалы экспериментальных работ в течение четырех летних периодов не позволили отбросить гипотезу, что засев облаков не дает никакого эффекта. Данные, собранные при помощи радиолокатора, фотографирования и дождемерных наблюдений, свидетельствовали о том, что засев может привести к появлению радиолокационного эха от осадков без одновременного выпадения измеримого их количества.

В 1955 году группа австралийских ученых, работавших с Боуэном, начала выполнение программы исследований засева облаков йодистым серебром с борта самолета. Первые результаты этих экспериментов с применением случайной выборки были весьма обнадеживающими. Однако по мере продолжения экспериментов различие между количеством осадков в засеваемые и незасаемые периоды уменьшалось. В 1961 году Боуэн и его сотрудники опубликовали предварительный вывод, что засев может увеличить количество осадков только при определенных условиях погоды, например когда большинство облаков конвективные. Эта превосходная работа австралийских исследователей еще продолжается.

Незначительное количество положительных результатов обескуражило многих из тех, кто оптимистично

смотрел на засев облаков как на средство увеличения быстро истощающихся запасов воды во многих странах мира. Однако до сих пор никто не смог опровергнуть гипотезу, что путем введения специальных частиц при определенных условиях можно увеличить количество осадков.

Предварительные результаты воздействия на облака йодистым серебром с применением случайной выборки в Швейцарии, Японии и Мексике оказались перспективными. Но прежде чем делать какие-либо выводы, необходимо дождаться завершения достаточно длинной серии опытов, чтобы эффекты случайности могли быть полностью исключены.

Ряд теоретических исследований привел к выводу, что некоторые типы облаков являются хорошим объектом для воздействий. Г. Викманн (Корпус связи США) предполагает, что умеренное увеличение осадков может быть достигнуто путем засева облаков теплого фронта (высоко-слоистых и слоисто-дождевых).

Английский ученый Ф. Ладлем оценил эффект, который можно получить путем засева орографических облаков, образующихся над горными районами Швеции. Эти облака обычно состоят из переохлажденных водяных капелек, которые возникают на одной стороне облака и испаряются на другой (см. главу 4). Большая часть воды, содержащейся в виде водяных капелек, теряется путем испарения. Расчеты Ладлема привели его к заключению, что засев йодистым серебром в этом случае мог бы привести к существенному увеличению количества выпадающего снега.

Ни предположения Викманна, ни расчеты Ладлема не проверялись должным образом. До тех пор пока эти и другие проекты не будут строго проверены, гипотезу, что засев облаков может увеличить количество осадков, нельзя считать опровергнутой.

Такие исследования имеют огромное значение для дальнейших работ в этой области. Большое количество неясных вопросов при оценке эффективности засева облаков возникает именно потому, что мы еще недостаточно изучили естественные процессы возникновения осадков и процессы, протекающие в облаках. Когда проводятся эксперименты по засеву облаков, они должны выполняться так, чтобы дать как можно больше данных

о его эффективности. К активным воздействиям следует относиться как к экспериментам, разработанным для того, чтобы пролить свет на физику атмосферных процессов.

В заключение мы приведем два положения, заимствованные из доклада Всемирной метеорологической организации, изданного в 1955 году, но сохранившего свое значение и сейчас:

«Имеются некоторые основания предполагать, что там, где часто наблюдаются облака определенного типа, умело проводимые операции по засеву могли бы дать местное увеличение осадков, экономически выгодное...

Увеличение количества осадков, не вызывающее сомнений, еще не было получено. Это относится ко всем случаям активных воздействий, описанным в научной литературе. Представляется, что большинство заявлений, сделанных в других публикациях и газетах, не имеют достаточного основания».

ГЛАВА 10

ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАДОВЫЕ ОБЛАКА

В главе 7 было рассмотрено образование града. Исследователи работают над тем, чтобы выяснить, как и почему возникает град в облаках определенного типа. Особый интерес представляет вопрос о возникновении крупных градин.

В настоящее время серьезные усилия направлены на поиски практических методов предупреждения градобитий, приносящих огромный ущерб. Большинство исследований в этой области было направлено не столько на предупреждение града, сколько на поиски средств, с помощью которых можно добиться образования большого количества маленьких градин вместо сравнительно небольшого числа крупных и потому более опасных градин.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАКЕТ

Для предупреждения градобитий применялись различные методы. С конца 40-х годов фермеры Северной Италии начали использовать против града ракеты. Ракеты диаметром примерно 8 см и длиной около 1,5 м

сравнительно дешевы. Они изготавливаются в основном из картона и могут достигать высоты примерно 1500 м. На этой высоте носовой конус ракеты, содержащий примерно 800 г пороха, взрывается. В особо градобойный 1959 г. в Италии было запущено более 100 000 ракет. Обычно запуск ракет начинается в непосредственной близости от градовой тучи и продолжается до тех пор, пока она не проходит. И хотя механизм воздействия ракет на град неясен, они широко применяются на практике. Так, кроме Италии, ракеты использовались во Франции, Швейцарии, Советском Союзе и ФРГ.

Итальянский ученый О. Виттори выяснил взгляды фермеров по этому вопросу. Он нашел, что очень немногие из использовавших ракеты в течение ряда лет твердо уверены в их эффективности. В общем, по словам опрошенных, градины, выпадающие через несколько минут после запуска ракеты, оказываются более рыхлыми, чем обычный град.

О. Виттори предположил, что, вероятно, взрыв ракетной головки порождает ударную волну, которая вызывает образование во льду множества тонких трещин, вследствие чего градины оказывают меньшее разрушительное действие при ударе о дерево или растение. Известно, что в градинах заключены пузырьки воздуха. Достаточно сильная ударная волна могла бы вызвать эффект, указанный Виттори. Его идеи были поставлены под сомнение рядом ученых, но ввиду важности этой проблемы исследования продолжаются.

ЗАСЕВ ГИГАНТСКИМИ СОЛЕВЫМИ ЯДРАМИ

Ракеты были использованы и для заброса в грозовые облака йодистого серебра и соли, подобно тому как это делалось при активных воздействиях. Мысль об использовании этих реагентов имеет некоторое основание.

В главе 7 упоминалось, что для роста крупных градин необходимо большое количество переохлажденной воды. Если этой воды сравнительно мало, было бы разумно ожидать появления лишь небольшого числа крупных градин.

Предполагается, что путем увеличения числа градин можно ограничить их рост. Чем больше градин, между которыми распределяется имеющаяся вода, тем меньше воды придется на каждую из них.

Некоторые данные свидетельствуют, что замерзшие достаточно большие облачные капли часто оказываются зародышами, из которых вырастают градины. Если количество таких больших капелек возрастает, можно ждать увеличения числа градин. На этом основании был предложен засев солью. Теоретически можно увеличить число крупных облачных капелек путем засева облака гигантскими солевыми ядрами.

Были предприняты попытки реализовать эту идею, однако результаты оказались неубедительными. В 1960 г. Ладлем, который ранее предполагал, что засев солью может дать успешные результаты, отказался от такой точки зрения. На основе подробного изучения строения градин он пришел к выводу, что мысль о небольших запасах переохлажденной воды не вполне верна. В новой теории Ладлема предполагается, что для образования больших градин ледяные частицы должны совершить несколько путешествий сквозь облако (см. главу 7). Почти все ледяные частицы, которые будут двигаться подобным образом, должны столкнуться с достаточно большим числом переохлажденных водяных капель и вырасти в большие градины.

ЗАСЕВ ЙОДИСТЫМ СЕРЕБРОМ

Другая схема для предупреждения образования разрушительного града основывается не на увеличении числа «зародышей» градин, а на изменении скорости, с которой на зародыше может накапливаться лед. Как известно, градины растут вследствие столкновений с переохлажденными каплями воды. Возможно, что часть ледяных кристаллов объединяется в ледяные частицы. Однако следует считать, что скорость захвата ледяных кристаллов невелика. Если число переохлажденных капелек в облаке уменьшится, то скорость роста градин также уменьшится. С теоретической точки зрения для предотвращения града достаточно удалить все переохлажденные капельки.

Одним из путей уменьшения числа переохлажденных водяных капелек является засев облака йодистым серебром с тем, чтобы превратить их в ледяные кристаллы. Чем больше рассеяно ядер йодистого серебра, тем более полным будет такое превращение.

В СССР, Швейцарии, США и других странах были проведены засева градообразующих облаков йодистым серебром. Однако результаты оказались необнадеживающими.

Вывод доклада Совецательного комитета по управлению погодой был следующим:

«Имеющиеся данные о повторяемости недостаточны для каких-либо оценок, поэтому определенное заключение об эффективности градопредупреждающих проектов сделать нельзя».

Опыты по засеву облаков йодистым серебром, проводившиеся после 1957 года, также не дали ответа. Одна из причин, объясняющая отрицательный, а точнее, неубедительный результат, состояла в недостаточном количестве ядер.

В градовом облаке диаметром 3 км число облачных капелек между уровнями 5 и 8 км, где температура соответственно -5 и -20°C , может составлять примерно $2 \cdot 10^{18}$. Это наименьшая величина, потому что у всех облаков подобного типа диаметр больше 3 км и число капелек в 1 см^3 больше 100, как это предполагалось при вычислении.

Если скорость восходящего потока 5 м/сек., то число капелек, проходящих через рассматриваемый объем за 1 минуту, составит $2 \cdot 10^{17}$. Предположим, что у нас имеется генератор, создающий 10^{13} ядер из 1 г йодистого серебра. Чтобы обеспечить каждую капельку ядром, необходимо в 1 минуту рассеивать 20 кг йодистого серебра. Если градовое облако сохраняется только 10 минут, нам потребовалось бы 200 кг йодистого серебра на каждое облако. С очень эффективным генератором, который образует 10^{14} ядер из 1 г серебра, количество йодистого серебра, потребное для засева, было бы в 10 раз меньше. Поскольку фактически невозможно рассеять в облаке такое число ядер равномерно, необходимо затратить даже большее количество реагента, чтобы быть уверенным в воздействии йодистого серебра на каждую капельку. Никто из экспериментаторов, проводивших засева переохлажденной части градового облака, не затрачивал такого огромного количества йодистого серебра. В большинстве опытов использовалось в 10—1000 раз меньшее количество реагента, поэтому неудивительно, что результаты оказались неубедительными.

Эксперименты по засеву облаков йодистым серебром в количествах, которые необходимы, весьма дорогостоящие.

Один килограмм йодистого серебра стоит 26 долларов. Другие дополнительные расходы по засеву облаков могут по крайней мере удвоить затраты. Поэтому описанная выше схема, даже если она окажется успешно действующей, была бы чересчур дорогой. Однако для более глубокого изучения града стоило бы выполнить некоторое число экспериментов по засеву, в которых значительные дозы йодистого серебра вводились бы в грозовые облака, способные дать град.

Подводя итоги, можно сказать, что в настоящее время еще неизвестны средства для предупреждения образования разрушительного града. Для лучшего понимания процессов образования града необходимо проводить больше исследований. Только такие работы могут привести к созданию метода воздействия, который был бы эффективным и не слишком дорогим.

ГЛАВА 11

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во все времена погода играла важную роль в жизни человека. Первые из дошедших до нас попыток изучить атмосферу были сделаны Аристотелем более 2000 лет назад. В течение столетий люди принимали как неизбежное дождь и снег, ветры и бури, любясь явлениями погоды или скрываясь от них.

Начиная с XVII века ученые ставят вопросы об атмосфере и затем ищут ответы на них путем систематических наблюдений и экспериментов. Было замечено, что в смене погоды имеется известная закономерность, что определенные типы облаков служат предвестниками бурь. Когда барометр отмечает падение давления, небо часто покрывается облаками и начинаются дожди; повышение давления — обычно признак хорошей погоды. Стало ясно, что можно делать больше, чем просто воспринимать наступившую погоду, — люди могут предсказывать, какая погода наступит. Это было огромным шагом вперед. Недостаточно сказать: «Я понимаю», в равной мере важно уметь предсказать, что случится.

Закон Ньютона важен не потому, что он объясняет, почему все камни, брошенные когда-то раньше, падали на землю. Этот закон важен для нас потому, что он точно предсказывает, что все камни, которые будут брошены в будущем, упадут на землю. Способность предсказывать события — единственный действительно убедительный способ оценить степень понимания.

Для метеорологов умение предсказывать является не только пробным камнем понимания, но и целью, важной сама по себе. Практическая ценность точного предсказания погоды на завтра, без сомнения, огромна. Крестьянин, строитель, летчик, моряк и многие другие жизненно заинтересованы в знании погоды на завтра или даже на сегодня во второй половине дня, если она должна резко измениться.

За последние 50 лет мы многое узнали об атмосфере, и эти знания нашли применение в развитии научных методов предсказания погоды. Конечно, наши прогнозы не так хороши, как мы хотели бы. Метеоролог знает это лучше кого бы то ни было. Но в то же время мы не должны забывать, что прогнозы погоды стали более точными, чем 20 лет назад. Статистика, свидетельствующая о значительном уменьшении числа жертв торнадо¹ и ураганов, делает этот вывод более убедительным. Тем не менее в области прогнозов погоды имеются широкие возможности для улучшений, и выдающиеся ученые многих стран работают в этом направлении. Быстродействующие электронные вычислительные машины чрезвычайно облегчили решение уравнений для прогнозирования погоды, которые в 1945 г. решить было практически невозможно.

Предположим, что в последующие десятилетия прогнозисты добьются значительного улучшения качества предсказаний погоды. Будет ли этого достаточно? Удовлетворит ли нас простое «сосуществование» с погодой? Конечно нет! Мы бы хотели в какой-то степени управлять ею.

Почему люди не могут оставить глубокие следы на доспехах, которыми прикрывается погода? Для этого

¹ Торнадо представляют собой вихри, наблюдающиеся на юго-западе США. Диаметр этих вихрей редко превышает 1 км. Скорость ветра в торнадо может значительно превышать 50 и даже 100 м/сек. (Прим. ред.)

имеется несколько убедительных причин. Главная из них та, что мы еще недостаточно знаем законы природы, которые управляют образованием облаков, дождя, бурь и других метеорологических явлений.

В этой небольшой книге мы кратко рассказали о том, что сейчас известно о физике облаков — том фундаменте, на который опирается большая часть экспериментов по изменению погоды. Несомненно, у этой проблемы много сторон, в которых мы пока еще плохо разбираемся. Этот пробел в наших знаниях будет вполне понятен, если принять во внимание обширность задачи и тот факт, что только примерно в последние 20 лет этим вопросам стали уделять достаточно внимания. За этот период прогресс в развитии наших знаний был поистине впечатляющим. Однако предстоит еще долгий путь.

Изучение физики облаков требует объединенных усилий метеорологов, физиков, химиков, математиков и инженеров. Недостаточно знать распределение давления и движение воздуха, приводящие к образованию облаков. Надо изучить физические процессы, в том числе образование ядер конденсации, капель в облаках, ледяных кристаллов, градин, электрических полей и т. п. Мы знаем, что ничтожное количество определенных химических веществ может оказать важное воздействие на эти явления. И если мы хотим в подробностях изучить строение облаков и их состав, необходимо научиться выполнять надежные измерения в атмосфере. Эта задача может быть решена только путем привлечения новейших достижений науки и техники.

Мы живем в эпоху бурного развития науки об атмосфере. Электронные вычислительные машины, новые радиолокационные установки, высотная авиация и, наконец, метеорологические спутники становятся частью арсенала метеорологов. И это же является началом великого наступления на пути к развитию методов управления погодой. Сегодня наша насущная потребность — найти и обучить молодежь, которая хочет принять участие в этом грандиозном предприятии. Впереди много трудностей, потому что атмосфера скрывает свои тайны. Исследователи должны привлечь все свое воображение и найти новые пути исследования. Это может быть сделано, и имена тех, кто участвует в такой работе, навсегда останутся в памяти человечества.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	3
Предисловие	5
Глава 1. Введение	7
Глава 2. Ядра конденсации — основа для формирования облаков	11
Глава 3. Облака и их образование	24
Глава 4. Типы облаков	38
Глава 5. Ледяные кристаллы	43
Глава 6. Образование снега и дождя	50
Глава 7. Град	64
Глава 8. Научные основы воздействия на облака	75
Глава 9. Искусственное вызывание дождя	87
Глава 10. Воздействия на градовые облака	105
Глава 11. Заключение	109

Л. ДЖ. БАТТАН

ЧЕЛОВЕК БУДЕТ ИЗМЕНЯТЬ ПОГОДУ

Редактор *Г. Я. Русакова*
Художник *Б. Н. Осенчаков*
Худож. редактор *Ю. Н. Шаромов*
Техн. редактор *З. М. Пучкова*
Корректор *К. И. Розина*

Сдано 28/X 1964 г. Подписано к печати 8/1 1965 г.
Бумага 84 X 108¹/₃₂. Бум. л. 1,75 + 0,13 вкл. Печ. л. 6,30.
Уч.-изд. л. 5,97. Тираж 5500 экз. Индекс ПЛ-17.

Гидрометеорологическое издательство,
Ленинград, В-53, 2-я линия, дом № 23.

Заказ № 1481. Цена 22 коп.

Тем. план 1965 г., № 3.

Типография им. Котлякова издательства «Финансы»
Государственного комитета Совета Министров СССР
по печати. Ленинград, Садовая, 21.