

XVII в.



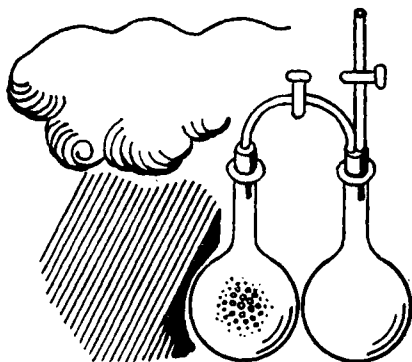
XIX в.



У.МИДДЛТОН

**ИСТОРИЯ
ТЕОРИЙ
ДОЖДЯ
И
ДРУГИХ
ФОРМ
ОСАДКОВ**

У.МИДДЛТОН



**ИСТОРИЯ
ТЕОРИЙ
ДОЖДЯ
И
ДРУГИХ
ФОРМ
ОСАДКОВ**

**ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
1969**

A HISTORY OF THE
THEORIES OF RAIN
AND OTHER FORMS OF
PRECIPITATION

W. E. KNOWLES MIDDLETON

Перевод с английского
А. В. МИГУЛИНА (гл. I, VI—IX) и
А. С. ЧАПЛЫГИНОЙ (гл. II—V, X)
Научный редактор
д-р географ. наук *А. Х. ХРГИАН*

Книга в сжатой, популярной и увлекательной форме дополняет имеющуюся литературу по метеорологии, физике, истории естественных наук.

Охватывая обширный исторический период, автор рассказывает о взглядах виднейших ученых на общие метеорологические явления. Рассматривается структура облаков и их взвешенное состояние, вязкость, связь изменений температуры с влажностью воздуха, теории восходящих токов, развития циклонов и т. д.

Книга представляет интерес для всех, кто интересуется историей науки, для преподавателей и студентов вузов, а также учащихся старших классов средней школы.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Хотя наблюдение облаков, их форм и разновидностей, их смены, сочетаний и систем уже более полутора столетий — одно из любимых занятий метеорологов, а полстолетия тому назад стало чуть ли не во главу угла прогноза погоды, нередко думают, что физика облаков — дитя лишь новейшего времени. И самый этот термин зазвучал громко лишь десять лет назад, и основные сведения о физическом состоянии облаков, о процессах конденсации и т. п. стали, как кажется, известны только в течение десяти или пятнадцати последних лет.

И вот книга Миддлтона доказывает нам, что мы неправы и что основы физики облаков складывались постепенно на протяжении многих лет. Она показывает, какое влияние на теорию оказало развитие методов наблюдения влажности воздуха (неудачи в этой области Делюка и появление хорошего гигрометра Соссюра), как понятия о динамике облаков развивались параллельно с общими представлениями о движении атмосферы, как постепенно был изучен основной процесс — охлаждение при расширении в вертикальных движениях различных типов. Автор повествует, как после долгих неясностей была изучена микроструктура облаков и были поняты процессы образования росы и града.

Содержание книги об «Истории теорий дождя» гораздо шире ее заглавия. Уже в самом начале в ней говорится об общих метеорологических концепциях древности, об упадке естественных наук в средние века

и о том, как идеи Ренессанса, в том числе и философские, способствовали прогрессу изучения атмосферы. Точно так же автор подробно рассказывает нам в главе VIII о развитии теорий циклонов в первой половине XIX в., показывая, какую роль в них играли понятия о конденсации и освобождении скрытого тепла. Вместе с тем автор мало касается такой описательной стороны предмета, как классификация облачных форм и ее история.

Миддлтон — специалист в области теории видимости, но мы знаем его и как деятельного труженика на поле истории метеорологии. После сравнительно краткой «Истории гигрометра» (1943 г.) он опубликовал в 1964 г. фундаментальную «Историю барометра», которая в большой мере характеризует историю общего физического приборостроения XVII—XVIII вв. и многие интересные, но забытые идеи и конструкции XIX в. Кроме предлагаемой здесь читателю «Истории теорий дождя» (1965 г.), он издал в последнее время еще «Историю термометра и его метеорологических применений» (1967 г.).

Однако книга Миддлтона о теориях дождя занимает особое место в его творчестве. В течение десятилетий история естественных наук занималась главным образом собиранием и систематизацией фактов, сведений об институтах, биографий ученых, библиографией их творений и пр. Но сейчас наступил новый этап развития этой науки. Теперь мы интересуемся более всего уже развитием идей и анализом этого развития с точки зрения современной науки. Миддлтон сделал исследование по истории науки именно в этом духе. Он проследил, например, эпоху за эпохой судьбы пузырьковой гипотезы о микроструктуре облаков, расцвет и упадок электрических теорий конденсации вплоть до позднейших фантазий о роли ионизации. Касаясь теории восходящих токов, он дает нам отличный пример диалектического развития понятий. Представление о восходящих токах конвекции,

наблюдавшихся и описанных довольно правильно уже Соссюром в конце XVIII в., было затем отвергнуто, как показывает Миддлтон, в пользу теории борющихся экваториального и полярного потоков (замечательным образом также оказавшейся впоследствии весьма прогрессивной), чтобы во второй половине XIX в. опять лечь в основу конвекционной теории циклонов. Хотя эта последняя и не устояла под натиском новейших фронтологических концепций и надолго отступила на третий план, теперь мы снова объясняем процессами конвекции не только осадки, шквалы и большую активность (в том числе и электрическую) холодных фронтов, но и многие важные черты общей циркуляции атмосферы.

Заметим здесь, что прекрасное и наглядное описание восходящих токов, данное М. В. Ломоносовым в 1753 г. — в эпоху, когда о них говорил Соссюр, — осталось неизвестным Миддлтону, хотя оно с тех пор не раз воспроизводилось в литературе.

Судьба истории науки оказалась не менее сложной, чем судьбы основных гипотез физики. В течение почти двух веков история математики и физики была скорее всего дидактической, воспитательной наукой, мало касающейся современных задач исследования. Однако всего несколько лет назад произошел переворот. Поскольку всякую науку стали рассматривать как некоторую систему информации, история ее стала наукой о способах и путях сбора такой информации. Она стала необходимым элементом той новой дисциплины, которая получила пока что название «науки о науке» и которая рассматривает процесс организации исследования, его кадры, его продукцию, хранение и рациональное использование информации. Один из интересных вопросов «науки о науке»* — вопрос о том, в какой мере при научном исследовании используется совокупность того, что было сделано ранее, — находит много иллюстраций

* См. Г. М. Добров «Наука о науке». Киев, «Наукова думка», 1966

в книге Миддлтона. Этот подход проявляется, например, в том, как он прослеживает предшественников В. Бецольда в развитии термодинамики атмосферы (глава VII) или подготовку современных представлений о процессе удаления скрытого тепла при образовании града (глава X). В то же время Миддлтон ставит и более сложную задачу — проанализировать ту роль, которую играют неверные или изжившие себя теории (как, например, теории Делюка и Дове в последний период их деятельности): мешая развитию правильных представлений, они в то же время стимулируют дискуссии и критику и, может быть, в конце концов помогают торжеству противоположной точки зрения.

Таким образом, книга об «Истории теорий дождя», как будто обращенная лицом к прошлым векам (и едва касающаяся нашего, XX в.), на самом деле стоит на ступенях, хотя, может быть, и самых первых, новой истории науки.

При переводе мы попытались сохранить и несколько цветистый характер изложения автора и дух эпохи тех произведений, которые он цитирует. То и другое было не легкой задачей. Ради экономии места мы вынесли подстрочные ссылки на литературу в общий библиографический список в конце книги, избежав тем самым повторений и получив возможность сократить «Указатель», который в подлиннике состоял почти целиком из фамилий авторов и ссылок на страницы, где они упоминаются.

А. Х. Хргиан

ГЛАВА I

ОТ ДРЕВНИХ ВРЕМЕН ДО ИЗОБРЕТЕНИЯ БАРОМЕТРА

Стрепсиад. Скажи мне, как ты думаешь, при каждом дожде падает на землю всегда новая вода или же это та самая вода, которую солнце притягивает с поверхности земли?

Аминий. Этого я не знаю, да и не интересуюсь знать.

Стрепсиад. Тогда как же ты можешь требовать деньги, если ничего не знаешь о явлениях на небе?

*Аристофан «Облака»,
действие VII*

1. Введение

Дождь и снег, роса, изморозь и град — явления в атмосфере, связанные с водой, — были глубоко не безразличны человеку уже с тех времен, когда убежищем ему служила пещера. И в наши дни фермер, инженер и отдыхающий приглядываются к небу или изучают прогноз погоды — каждый по своей причине.

Много тысяч лет тому назад людей интересовал просто сам факт появления гидрометеоров, за исключением разве что случаев необычайно интенсивных осадков и их последствий. И до сих пор многие из нас интересуются гидрометеорами только с этой точки зрения. Однако рано или поздно у человека должен был возникнуть вопрос: как и, несомненно, также почему выпадает дождь? Первоначально ответ на второй вопрос был прост: дождь прошел, чтобы была вода для него, его жены и детей, для его скотины и урожая. Много позже он понял, что течение его рек также зависимо от дождя. К этому времени уже возник и вопрос как? И на него пытались дать более или менее ясные ответы. По мере того как эти ответы стали более убедительными, значение вопроса почему? становилось все

меньше и меньше и, наконец, этот вопрос вообще отпал; это характерно для процесса развития любой науки.

Вероятно, все, что было написано о гидрометеорах до XVII в., можно назвать скорее фантазией, чем теорией. Тем не менее умозрительные конструкции, возникшие в древности, были основаны на наблюдении за природой, хотя подчас и на очень поверхностном наблюдении, поэтому, не мучаясь угрызениями совести, я посвящаю им несколько страниц, даже не утверждая в качестве извинения, что они дали основу для более поздних теорий. По правде говоря, этого не было. «Натурфилософы» XVII в. появились бы все равно там же, где они и появились, даже если бы о гидрометеорах совершенно ничего не было написано в древности.

2. Древние иудеи

Дождь был, безусловно, чрезвычайно необходим обитателям Малой Азии, хотя нет никаких сомнений, что в библейские времена климат там был более влажным, чем в настоящее время. В большинстве многочисленных упоминаний о дожде в Ветхом Завете подчеркивается, как он был желателен, но трудно найти какое-либо указание на то, что кто-то из иудеев интересовался физической причиной дождя. Приведем отрывок из книги Амоса, который указывает на некое смутное понимание гидрологического цикла:

«Кто... призывает воды морские и разливает их по лицу Земли? Господь—имя ему» (гл. V, стих 8-й).

Пророк Амос жил в VIII в. до н. э., но имеется большая вероятность, что многие места были вставлены в эту книгу гораздо позже; возможно, что и этот отрывок является вставкой.

В климате такого места, как Малая Азия, в некоторые сезоны роса могла быть сравнимой с другим источником влаги — дождем, и о ней в Библии имеется ряд благодарственных упоминаний. Она обычно «выпадает» (Вторая книга Самуила, гл. XVII, стих 12-й, Второзаконие, гл. XXXIII, стих 28-й), иногда даже из облаков (Притчи Соломона, гл. III, стих 20-й) — ссылка, свидетельствующая, вероятно, о небрежности наблюдения.

Не следует придавать слишком большого значения такой выдержке (Второзаконие, гл. XXXII, стих 2-й):

«Польется, как дождь, учение мое, как роса, речь моя, как мелкий дождь на зелень, как ливень на траву».

(Насколько приятней звучит «мелкий дождь» по сравнению с «моросью»!)

Интересно, однако, сравнить ее со следующей выдержкой из Книги Бытия (гл. II, стих 5—6-й):

«...ибо Господь Бог не посылал дождя на землю и не было человека для возделания земли, но пар поднимался с земли и орошал все лицо Земли».

Вполне возможно, что около V в. до н. э. кто-нибудь в Палестине и понимал это распространенное явление яснее, чем кто-либо до 1750 г. н. э. Тем не менее строить такие догадки довольно бесполезно, поскольку Библия является большим человеческим документом, а не учебником физики, и гений древних иудеев гораздо более созвучен могучей телеологии тридцать девятой главы Иова, которую неврдно прочесть любому метеорологу, вне зависимости от его отношения к такого рода вещам.

3. Древние греки и римляне *

Удивительно, что греки и иудеи, жившие в близком соседстве на восточной окраине Средиземноморья, смотрели столь различным образом на окружающий мир, так же как и почти на все другие проблемы. В то время как иудеи довольствовались созерцанием природы как чуда, греки уже весьма давно занялись классификацией и созданием систем. Последние, конечно, основывались на наблюдении явлений природы. Но довольно скоро у них возникло стремление к логической завершенности, которая, будучи орудием в руках гениев, подобных Аристотелю, сделала, как тогда казалось, ненужным дальнейшее наблюдение и сбивала с толку прогресс физической науки около двух тысяч лет.

Термин *meteora* применялся во времена Гомера (VIII в. до н. э.) для обозначения процессов, происходящих во всей «верхней части» мира, над поверхностью земли. Таким образом, метеорология включала и астрономию, пока Аристотель не разделил эти два предмета. «Для древних физиков, — писал Гильберт, — метеорология представляла наиболее реальную и значительную часть науки о природе» ([142], стр. 5). Ну, а для ее изучения нужно было лишь поднять взгляд от своих табличек.

Чтобы понять древние метеорологические теории, мы должны уделить некоторое внимание учению о четырех стихиях (элементах) и представлениям тех времен о тепле и холоде. Четырьмя стихиями были огонь, воздух, вода и земля. Очень трудно читателю двадцатого века понять то, что подразумевалось под этим. Мы не должны представлять эти стихии как особые субстанции, т. е. так, как понимает элемент современная химия. Они были скорее принципами; огонь был не реальным пламенем, а принципом горения; вода была принципом жидкого, а земля — твердого. Во времена Гомера вода и земля рассматривались как

* Я заимствовал много сведений для этого раздела из весьма ценной книги эрудита О. Гильберта [142].

элементы, из которых сделано тело человека. Верхний мир разделялся на воздух и эфир, первый был ближе к земле, а второй охватывал большие высоты. Эфир первоначально считался, по видимому, скорее областью пространства, чем элементом, но начиная с Гомера он становится светящейся субстанцией, огнем. Воздух может конденсироваться или становиться плотнее, создавая туманы или облака; а воздушная стихия — это то, что заполняет область непосредственно над землей.

Физики ионийской школы (VI в. до н. э.) не предполагали, что четыре стихии самостоятельны и постоянны по величине, и считали, что их можно почти произвольно превращать одну в другую. Так, Фалес Милетский полагал, что все стихии происходят из воды. Разрежение и сгущение он считал процессами взаимопревращения, которые зависят от тепла и холода; однако стихии могут переходить одна в другую только в таком порядке:

• огонь $\longleftrightarrow$ воздух $\longleftrightarrow$ вода $\longleftrightarrow$ земля.

Земля, например, не может прямо превратиться в воздух (и наоборот), для этого она должна пройти через состояние воды. Согласно Анаксимену, воздух сгущается сначала в облако, затем в воду, после в землю и, наконец, в камень.

С современной точки зрения интересно предположение, которое делает Гильберт ([142], стр. 63), что философы ионийской школы вывели свою теорию взаимопревращаемости стихий, интерпретируя обычные наблюдения, такие, как облако над большим пожаром и его последовательное разрушение; выпадение дождя из облаков и видимое дыхание животных в холодную погоду. Они заметили, что солнечное тепло вызывает испарение жидкой воды, и, очевидно, из таких наблюдений заключили, что стихия огня играет первичную роль в природных процессах и в этом отношении отличается от других стихий. Земля, вода и воздух являются состояниями материи, но огонь есть движущая, или творческая, сила, которая меняет форму материи.

Следует подчеркнуть, что ионийская школа занималась не просто наблюдением мира и описанием всего увиденного. Они хотели «объяснить» явления, чтобы, так сказать, вогнуть их в логические системы умозаключений.

«Для объяснения явлений, воспринимаемых через ощущение, — пишет Фаррингтон, — они изобрели систему абстрактных понятий. Конечно, земля и вода могут быть названиями видимых и ощущаемых предметов, но даже эти термины переросли в более общие определения твердого и жидкого; иначе говоря, в этом обнаруживается тенденция к превращению конкретных понятий в абстрактные термины. Еще более абстрактными понятиями были такие, как Неограниченность, Сгущение либо Разрежение или Напряжение. Эти термины, конечно, были взяты из повседневной жизни, но, когда их употребляли философы,

они становились понятиями, привлеченными [sic] для объяснения воспринимаемого. Начинает появляться различие между разумом и ощущениями» ([124], т. I, стр. 50).

Идеи элейской школы следующего столетия мало отличаются от идей ионийской школы о стихиях. По Эмпедоклу из Акраганта, четыре стихии одинаковы по своему значению и существуют в равных количествах, они не могут превращаться друг в друга, но могут смешиваться. Они состоят из очень мелких частиц, из сочетаний которых создаются все предметы. Силы Природы, осуществляющие эти изменения, — это любовь и ненависть, которые, по-видимому, оставляют мало места для теории тепла и холода. Вероятно, однако, Эмпедокл ассоциировал тепло с огнем, сухость с воздухом, холод с водой и влажность с землей.

Мы могли бы посвятить много страниц различным греческим ученым и их идеям о четырех стихиях, хотя все они, по-видимому, сходились на том, что — тем или иным образом — стихии взаимопревратимы. Метеорологические теории Аристотеля явились неизбежным следствием этой идеи.

Некоторые из его теорий содержались в первых трех томах «Метеорологии». Мы уже говорили, что Аристотель впервые разделил метеорологию и астрономию, хотя его метеорология включала то, что называется теперь геофизикой, и имела дело со всеми областями ниже Луны, где, полагал он, находились также кометы и Млечный путь. Мы, насколько возможно, ограничимся его теориями гидрометеоров.

В первую очередь следует отметить, что Аристотель совершенствует и делает гораздо более систематическим учение о четырех стихиях. Они образуются комбинацией двух из первичных качеств — тепла, холода, сухости и влаги — следующим образом:

тепло + сухость = огонь;
тепло + влага = воздух;
холод + влага = вода;
холод + сухость = земля.

Каждая стихия занимает свою собственную область в природе. Так, огонь всегда стремится вверх, земля оказывается внизу, вода поднимается над землей, воздух над водой, но ниже огня. Все четыре стихии «могут превращаться одна в другую, и ... каждая потенциально неявно присутствует в других» ([19], кн. I, гл. 3).

Тогда что такое воздух? Это, по-видимому, зависит от того, где он находится:

«...мы должны помнить, что часть того, что мы называем воздухом, непосредственно окружающая землю, влажна и тепла потому, что она парообразна и содержит испарения [exhalation]

земли, однако выше лежащая часть его горячая и сухая. Пару присущи влажность и холод, а испарения теплы и сухи*, и пар потенциально подобен воде, а испарение — огню» ([19], кн. I, гл. 3).

Тот факт, что верхний воздух подобен огню, объясняет, почему облака не образуются выше уровня наиболее высоких гор.

Гипотезы Аристотеля об осадках, очевидно, вытекают из его учения о стихиях, о качествах, которые их формируют, и об их взаимопревращаемости. Вместе с тем нам это кажется весьма произвольной интерпретацией простых наблюдений. Как и его предшественники, он допускал возможность превращения воздуха в воду; но в то время как физики ионийской школы рассматривали облака, как сгущенную форму воздуха, находящуюся по своим свойствам между воздухом и водой, Аристотель, кажется, знал, что облака являются водой:

«Эффективной управляющей первопричиной является круг солнечного обращения... Земля покоится, и находящаяся вокруг нее влага испаряется солнечными лучами и иным теплом, идущим сверху, и поднимается вверх; однако, когда нагрев, вызвавший подъем, прекращается... пар охлаждается и вновь сгущается из-за потери тепла и высоты, превращаясь в воду из воздуха. Ставши водой, она снова выпадает на землю. Испарения воды суть пар, образование воды из воздуха дает облако. Дымка представляет собой остаток сгущения воздуха в воду, а следовательно, скорее указывает на ясную погоду, чем на дождь...» ([19], кн. I, гл. 9).

Мы можем отметить, что здесь нет четкого различия между воздухом и паром, за исключением того, что последний образуется путем испарения воды. Интересно отметить, что в той же главе вводится различие между моросью и дождем. Роса и изморозь образуются из влаги, которая испарилась в течение дня, но не поднялась высоко, поэтому, замечает он, они не образуются в горах. И роса, и изморозь появляются только в ясную холодную погоду ([19], кн. I, гл. 10). Аристотелевская теория образования дождя из облака не была изложена во всей своей полноте в его «Метеорологии», на что указывал Гильберт ([142], стр. 497). Части ее содержатся в «Физике» [21] и в «Небесах» [20], и трудно дать ее связное изложение. Вкратце ее можно суммировать так: образование дождя, как мы видели, зависит от охлаждения воздуха. Тепло в облаках по природе своей всегда поднимается кверху и потому стремится покинуть облако. Холод в паре (*atmis*) борется с этим теплом и вытесняет его, сближая более тесно друг с другом частицы облака. Благодаря

* Это различие между парами и испарениями было источником путаницы в метеорологических теориях еще долгое время спустя после того, как учение Аристотеля вышло из моды.

этому *atmis* вновь восстанавливает истинную природу стихии воды, которая была некоторое время затемнена из-за нагрева. Вода, естественно, движется вниз, так что превращение облака в дождь вполне естественно и находится в согласии с законом природы.

Дождь, снег и град падают из облаков, роса и изморозь образуются вблизи поверхности земли. Аристотель отмечает, что на земле нет аналогии граду. Различие между дождем и росой, снегом и изморозью чисто количественное, зависящее от запаса имеющегося пара и продолжительности их накопления ([19], кн. I, гл. 11). Град для Аристотеля представлял особую проблему, как и для многих других ученых до нашего времени. Поскольку град есть лед, удивительно, что он бывает зимой гораздо реже. И каким образом необходимые количества воды остаются взвешенными в воздухе? ([19], кн. I, гл. 12.) Ответы Аристотеля на эти вопросы свидетельствуют о слабости его научного метода. Он мог видеть, что мельчайшие капли воды сливаются для образования дождя; но замерзшие капли слиться не могут, так что капли необходимых размеров должны быть взвешены в воздухе до своего замерзания. Он говорит, что Анаксагор считал, будто град образуется, когда облако под действием силы поднимается вверх, в область низкой температуры. Но Аристотель полагает, что большие градины образуются вблизи земли при интенсивных процессах, вызывающих замерзание. Он обращает внимание, что крупные градины не сферичны, и приводит это как доказательство того, что они замерзли вблизи земли, что «те градины, которые падают с больших высот, стираются при падении: становятся круглыми по форме и уменьшаются в размере» ([19], кн. I, гл. 12).

Но как происходит замерзание? Тепло и холод противодействуют * [have a mutual reaction] друг другу, что объясняет, почему в пещерах холодно летом и тепло зимой. Мы можем предположить, что такое же противодействие происходит в воздухе,

«так что в теплые сезоны холод концентрируется внутри окружающего тепла. Это иногда вызывает быстрое образование воды из облака. И по этой причине вы видите более крупные дождевые капли в теплые дни, чем зимой, и более сильный дождь — говорится, что дождь сильнее, когда он обильнее, — а более обильный дождь обусловлен быстрой сгущения. (Процесс этот как раз противоположен тому, что говорит Анаксагор. Он говорит, что это происходит, когда облако поднимается в холодный воздух; мы говорим, что это происходит, когда облако

* В этом частном контексте Ли переводит так неуклюжее слово *antiperistosis*, на котором всегда спотыкались в классической и средневековой физике. Ли обосновывает свою интерпретацию в длинном подстрочном примечании ([19], стр. 82—83).

опускается в теплый воздух, а наиболее обильному дождю соответствует наиболее глубокое опускание облака.) Иногда, с другой стороны, бывает, что холод даже более сконцентрирован, а тепло находится снаружи, и тогда вода, которая образовалась, замерзает, образуя град. Это происходит тогда, когда вода замерзает прежде, чем она начинает выпадать.

... Чем ближе к земле, тем интенсивнее замерзание, тем обильней дождь и тем крупнее капли или градины из-за уменьшения пути падения. . . » ([19], кн. I, гл. 12).

Можно ожидать, что, если бы Аристотель провел элементарное исследование крупных градин, он бы усомнился в правильности этого странного объяснения. Однако неясно, был ли он вообще заинтересован в проведении каких-либо наблюдений или экспериментов для проверки своей «теории». Он разделался с Анаксагором, который был гораздо ближе к истине, простым отрицанием его.

У атомистов также были теории града. Эпикур, видя, что последний всегда бывает вместе с бурями, описывал градины как окруженный большой массой атомов ветра небольшой комплекс атомов воды. Казалось, что обычные округлые формы градин подтверждают эту теорию ([143], стр. 506—507). В этой связи интересно, что Аристотель и позднейшие классики полностью отрицали, что ветер есть воздух в движении, а считали, что он является сухим испарением (или дыханием, *exhalation*) земли, хотя более ранние философы — например, Гиппократ и Анаксимандр — считали, что ветер является движущимся воздухом. Аристотель ([19], кн. I, гл. 13) с презрением отбросил их идеи, утверждая, что «ненаучные взгляды обычных людей (*hoi polloi*) более соответствуют истине, чем научные теории такого рода».

Теперь мы должны покинуть Аристотеля. Упомянем лишь кратко о его взглядах, касающихся происхождения рек. Эти идеи явились логическим следствием учения о взаимопревращаемости стихий. Так как воздух над землей может превращаться в воду и наоборот, было бы нелогичным отрицать, что то же самое может происходить в порых земли. Горы, где рождаются реки, действуют подобно губке: они всасывают воздух. Конечно, нельзя пренебрегать дождем, однако Аристотель, живший на сравнительно сухом Средиземноморском побережье, полагал, что его, вероятно, недостаточно для образования рек. Важность дождя для этого последнего была сведена до минимума.

Для стоиков мир являлся живым организмом, а вода — его кровью. И Теофраст вернулся к метеорологическому объяснению происхождения потоков ([142], стр. 425). Вопрос этот обсуждался вплоть до XVIII в.

После Аристотеля классическая древность не сделала существенных шагов вперед в метеорологии. Перемещение центра

культуры в Александрию и возвышение Рима в конечном итоге привело к стандартизации всех областей знаний в виде учебников и таким образом, как недавно доказывал Вильям Н. Сталь, выхолостило научный поиск [326].

Луций Эней Сенека и Гай Плиний Секунд, известный как Плиний Старший, были во главе авторов таких учебников. Книга Плиния «Естественная история» представляет собой громоздкую компиляцию; в ней упоминается 20 000 фактов, однако многие из них — не более чем суеверия и охотничьи рассказы. В части ее, посвященной метеорологии, не содержится ничего оригинального.

«Проблемы естествознания» Сенеки [323] много короче, но такого же рода. Они отличаются от «Метеорологии» Аристотеля одним интересным моментом: Сенека определяет ветер как воздух в движении ([323], кн. V, гл. 1), но относительно его происхождения говорит, что земля испускает большие количества воздуха из своих глубин, и проводит забавную аналогию с отрыжкой человека ([323], кн. V, гл. 4). Но это лишь одна причина; атмосфере присуще свойство двигаться, не вызванное внешними причинами.

Большая заслуга Плиния и Сенеки состоит в том, что их труды, пусть даже в несовершенном переводе, способствовали использованию наследства греческой науки в раннем средневековье, которое иначе могло бы ничего не узнать о ней.

Как мы видим, классическая метеорология не пошла далеко. В значительной степени это зависело от грозной репутации Аристотеля и его системы мира.* Мы не должны осуждать его за это; он создал свой великолепный синтез, нисколько не заботясь о том, что его можно опровергнуть экспериментом или даже наблюдением. Его могущество было таково, что когда в XII в. учение Аристотеля стало вновь известным в Европе, оно овладело умами всех естествоиспытателей и продолжало властвовать над ними вплоть до времени Галилея, который родился почти девятнадцать веков спустя после смерти Аристотеля.

4. Последующие пятнадцать столетий

Читатель, наверное, удивится, обнаружив, что такой значительный период, как полтора тысячелетия, бесцеремонно объединен нами в один небольшой раздел, заключающий главу, особенно если он знает о реабилитации позднего средневековья,

* См., например, ([102], стр. 69—72) или ([306], глава IV).

которая происходит в последнее время *. Однако случилось так, что в то время как, например, в механике и оптике в эту эпоху были достигнуты замечательные успехи, метеорологическая наука в христианских странах не смогла сделать сколь-нибудь значительного шага вперед. Нельзя сказать, что ее предмет не привлекал интереса. Наоборот, Гельман показал нам, как этот интерес возрастал, перепечатав большие выдержки из двадцати шести работ, написанных между VII и XIV вв., касающихся метеорологии [166]. Но если прочесть их, каждый обнаружит лишь небольшое количество, и то вызывающих скуку, отклонений от системы метеорологии, созданной Аристотелем и древними греками и переработанной в учебниках Плиния и Сенеки. А поэтому я ограничусь упоминаниями лишь нескольких примеров, пытаясь выделить элементы оригинального, которые можно из них извлечь. Конечно, возможно, что в некоторых неопубликованных манускриптах, которых пока еще множество, будет найдено что-нибудь совершенно необычное.

Хотя упадок древней науки начался задолго до нашей эры и потому нельзя винить в нем христианство, нет сомнений, что возрождение научной деятельности в Европе было надолго заторможено философской системой церкви **. Церковь добивалась полного контроля над духовной жизнью человека; человек, некогда бывший «лишь немножко меньше, чем ангелом», стал теперь беспомощным существом, всецело зависящим от бога как в смысле своих знаний, так и в отношении хлеба насущного. Самые суровые отцы церкви, такие, как Тертулиан, были твердо убеждены в том, что все исследования или размышления об устройстве Вселенной бесполезны и просто нечестивы, ибо вся истина уже содержится в божественном откровении. Более мудрые, подобно Августину, видели в природе творенье божье и не осуждали ее исследование, но верховным авторитетом все же считали Библию. В результате в первом тысячелетии все те, кто затрагивал научные вопросы, стремились использовать науки главным образом для иллюстрации и интерпретации Священного писания. В качестве типичного примера работы такого рода я попытался дать перевод вступления к статье «Об облаках» в краткой сводке по космологии, озаглавленной «О природе ве-

* См., например [63 а]. Здесь следует упомянуть еще книгу, по нашему мнению, незаслуженно обойденную автором, но интересную для истории науки: Heninger S. K. „A handbook of Renaissance meteorology“. Durham, N. C. (USA), 1960. Книга эта не ограничивается эпохой Ренессанса и включает многочисленные ссылки на высказывания и идеи античных и средневековых авторов. (Прим. ред.)

** Для детального ознакомления с патристической литературой, касающейся метеорологии, см. Гофмана ([172], стр. 1—96). В своем заключении он решительно утверждает (стр. 93), что «прогресс в метеорологических знаниях нигде не обнаружен», хотя его исследования охватывают целые девять веков.

шей» и написанной Исидором, епископом Севильи ([166], стр. 3—4).

«В книге Иова мы можем прочесть, что воздух сгущается и становится видимым, когда он собирается вместе. Так, он говорит: «Внезапно воздух сгустился в облака и мимолетный ветер уносит их».

И Вергилий говорит: «Ветер возникает, и воздух сгущается в облака» ([3], песнь V, 20). Облака надо мыслить подобными святым евангелистам, которые проливают дождь божественных слов на верующих, ибо сам воздух, пустой и разреженный, означает пустоту и заблуждение разума человеческого, уплотнение и превращение его в облака изображает утверждения Веры в умах избранных среди пустых и суетных неверующих. И равно, как дождевые облака образовались из пустого воздуха, так же и святые евангелисты обратились в Веру от суетности этого мира».

В следующей статье «О дожде» после цитаты из Амоса, на которую мы уже ссылались, и повторения некоторых идей Сенеки Исидор уподобляет дождь красноречию апостолов, осыпающих людей богатствами веры. Аналогичным образом град иллюстрирует жестокость измены:

«Снег означает неверующих весьма холодных и ленивых, дух которых погряз в наиполнейшем безразличии; или, говоря иначе, холодность в божественной любви у людей, у которых, даже если они незапятнаны благодаря очищению при крещении, нет в душе тепла милосердия».

Если мы вспомним, что Исидор был величайшим энциклопедистом западного средневековья, то станет ясно, что ни о каком прогрессе в такой интеллектуальной среде не могло быть и речи. Даже Августин допускал, что бог позволяет демонам воздействовать на погоду ([172], стр. 88). То же мог позволить себе сказать спустя тысячу лет Данте ([78], «Чистилище», V, стихи 112—114-й). А вот как Брео в двух словах охарактеризовал истинное положение вещей:

«...позиция Исидора и его эпоха в точности противоположна нашим. Для него сверхъестественный мир был осязаемым и упорядоченным. Его явления или то, что предполагалось, как таковые, принимались как нечто бесспорное, в то время как доказательства материальности мира, получаемые благодаря ощущениям, не принимались во внимание» ([50], стр. 67).

Мыслители средневековья были убеждены в единстве мира; они не могли представить, что может быть несколько способов рассматривать Вселенную. Особой трудностью, как отмечал Райт ([371], стр. 58), являлось истолкование «воды над небосводом» (книга Бытия, I, стихи 6—7). Эта совершенно противояристотелевская позиция в отношении воды была в высшей степени затруднительной для понимания.

Можно сказать, что ученых-метеорологов того периода следовало разделить на две группы согласно их воззрениям на природу ветра. Некоторые последователи Аристотеля не могли принять на веру его категорическое утверждение, что ветер не есть воздух в движении. Мнение это разделялось Сенекой. А следовательно, за исключением Филопона*, мнения различных ученых обуславливались тем, заимствовали ли они свои представления у Сенеки или у Плиния. Большинство из них следовало Сенеке.

Надо заметить, что Европа в то время была знакома с древнегреческой наукой только по трактатам римских писателей. А то, что осталось от оригиналов, сохранялось на Востоке и попало в руки мусульман-арабов. В эпоху с VII по XII в. арабы блестяще использовали это наследство, особенно в математике, оптике и теоретической астрономии. Но опять-таки и там прогресс в метеорологии был незначительным, хотя, конечно, многие манускрипты все еще ждут изучения.

Замечательным писателем, на которого следует здесь обратить наше внимание, был Айюб, или Йов, из Эдессы. В 817 г. он написал «Книгу сокровищ» — род небольшой энциклопедии науки [184]. Очевидно, Айюб читал Аристотеля, но не был им загипнотизирован. Ветер у него становится движущимся воздухом без каких-либо бессмыслиц относительно сухих испарений. Ветер движет облака, говорит он, «объединяет их и сгущает благодаря тому, что он сближает их друг с другом, а также рассеивает их и устанавливает ясную погоду» ([184], стр. 193). У него была довольно странная идея, что, когда идет дождь, внутренние части облаков непрерывно конденсируют жидкую воду и выбрасывают ее большими потоками, которые при падении дробятся на капли. И, конечно, его объяснение гидрометеоров было телеологическим: они созданы мудрым Богом для пользы человечества, за исключением града, который карает нас, когда мы вступаем на дурной путь.

Значительно более важной книгой явилась энциклопедия, написанная в X в. в Басре тайным обществом, называемым обычно «Братством Непорочности»**. Их метеорология указывает на значительный прогресс по сравнению с греками. Они, например, описали, как воздух прогревается от соприкосновения с землею, и указали, что этот нагрев зависит от высоты солнца. Они отметили суточные колебания температуры и влияние гор на выпадение осадков. Они признали, что ветер есть движение воздуха, и полагали, что оно вызвано подъемом пара с моря и горячих выделений с суши, нагретой солнцем, — объяс-

* О Филопоне см. ([307], стр. 421—422).

** Гельман ([166], стр. 23—41) опубликовал немецкий перевод метеорологической части этой книги. Об этом братстве см. ([307], стр. 660—661).

нение, которое предполагает непосредственное наблюдение бризов.

Из этих же самых поднимающихся паров создаются облака, дождь, роса, иней, туман, морось, гроза, молнии и град. Братство, наверно, интуитивно представляло роль охлаждения при образовании облаков и дождя, но не смогло совсем освободиться от классического представления, что облака сжимаются ветром. У «братьев» было четкое объяснение росы:

«Если подъем этого нового пара происходит ночью, когда воздух очень холоден, пар защищен от подъема в воздух и может конденсироваться постепенно вблизи поверхности земли...»

Это представление не было улучшено до 17-го столетия. Еще интереснее их представление о дожде:

«Если воздух теплый, эти пары поднимаются высоко и облака образуются одно над другим, как ступени, подобно тому, как это бывает видно весной и осенью. Они подобны горам расчесанного хлопка, одна над другой. Но если сверху из зоны льда идет холод, пары собираются и образуется вода; затем ее части сжимаются друг с другом и становятся каплями, их вес увеличивается, и они выпадают из верхней части облака вниз сквозь его массу. Эти маленькие капли соединяются друг с другом, и когда они выходят через нижнюю границу облака, они становятся крупными дождевыми каплями. Если на их пути оказывается сильный холод, они смерзаются и превращаются в град, еще не достигнув земли. В результате то, что вышло из верхней части облака, будет градом, а то, что пришло с нижней границы облака, будет дождем попеременно с градом».

Они проводят сравнение этого процесса с дистилляцией розовой воды, уксуса и т. п. и с образованием капель воды на потолке бани из поднимающегося пара.

«Так нижняя граница области ледяного холода и высокие горы вокруг моря* ограничивают два восходящих потока пара, из которых образуются облака и дождь; они рассеивают их и удаляют совсем так же, как стены и крыши в бане».

Читатель согласится, что это уже вовсе не бледное подражание Аристотелю. Насколько мне позволяют утверждать это мои знания, я не встречал более понятной и ясной интерпретации погоды вплоть до эпохи, когда был изобретен барометр.

Эта интерпретация была к тому же приятным образом свободна от теологии. В какой-то мере это отделение науки от теологии проникло также в западную литературу незадолго до того, как труды Аристотеля стали доступны в латинском переводе. Лучшим примером, по крайней мере в метеорологии, был Гильом де-Конш**, который сделал, что мог, чтобы дать чисто физическое

* Не совсем ясно, идет ли тут речь о Персидском заливе.

** См. ([307], стр. 197—199), а также ([102], стр. 120—123).

объяснение явлений природы, что привело его к столкновению с церковным начальством. Его метеорологические гипотезы, которые были опубликованы Гельманом ([166], стр. 42—54 и 69—75), носили некоторое сходство с аналогичными идеями Братства Непорочности, но в меньшей степени основывались на наблюдениях и больше на размышлениях. Откуда идет дождь? — спрашивает Гильом, и сам отвечает:

«Дождь имеет... различные причины. Иногда теплый и влажный пар (*fumus*) испаряется, и во время его подъема в нем оказываются запутанными мельчайшие капельки. И, когда они становятся крупнее и тяжелее, они выпадают, и возникает дождь. Но иногда воздух уплотняется холодом суши или воды и превращается в водную субстанцию, которая, частично высохнув под действием солнечного тепла, подобно льду на огне, падает вниз в виде очень мелких частиц. Иногда бывает, что солнце, чтобы напиться теплом, притягивает влагу, и более жидкая часть ее превращается в субстанцию огня. Она выпадает более обильно, когда после очень большой жары мы наблюдаем поток дождя. Но в отношении этого еще не все ясно».*

Так действительно и было. Однако такая счастливая независимость европейской науки после открытия греческих классиков довольно быстро окончилась. Это произошло в последней половине 12-го столетия, и примерно в середине следующего века величайшие умы — Фома Аквинский и Альберт Великий [13] — преуспели в ненужной работе — включении доктрины Аристотеля в учение церкви. Это стало возможным благодаря обширности и размаху логической системы, которую завещал им Аристотель, системы, обязанной столь необычайной долговечностью своей внушительности.

В некоторых разделах физики, имевших малое отношение к теологии — особенно в механике и оптике, — в последующие три столетия были сделаны большие шаги вперед. Метеорология была не столь удачлива. Можно и не говорить, что одним из результатов возрождения аристотелианизма было восстановление его представлений о ветре. Сам Альберт Великий постоянно настойчиво утверждал в своих комментариях к «Метеорологии», что ветер не является движущимся воздухом ([13], гл. VII—IX). Альберт написал также другую метеорологическую работу «*De Passionibus aëris*» **, которая, кажется, включает большое количество наблюдений.

До тех пор пока составление гороскопов не пришло в упадок, вера в физическое влияние звезд была крепка, и, конечно, не было ничего проще, как связать конфигурацию последних

* Перевод из Гельмана ([166], стр. 70).

** На стр. 105 и след. в [166] Гельман поместил введение и краткое содержание книги Альберта.

с погодой. Издание книг по астрометеорологии продолжалось еще в XVIII в., а одна из наиболее популярных из них была выпущена третьим изданием даже в 1797 г. [339]. Однако примерно между XIV в. и серединой XVII в. эти книги делили популярность с непосредственными комментариями к «Метеорологии» Аристотеля, появлявшимися в большом числе среди сотен трудов, посвященных другим его творениям. В дальнейшем нет нужды рассматривать их. Естественно, среди них попадались и отступления, более интересные, чем комментарии, хотя и не обязательно более важные, такие, как «Зеркало воздуха» Мизо [243].

«Почему, — спрашивает он, — капли круглые? Потому что углы стираются, когда они падают рядом друг с другом». Кроме того, круглая форма благоприятна для преодоления сопротивления воздуха. Но имеется и другая причина, вполне достойная 16-го столетия:

«А также потому, что если части природы, даже настолько малые, насколько мы пожелаем, обязаны отражать сферическую форму Вселенной, то они представляют некий образ всей машины Земли, ее вида и устройства, и весьма близкий и пропорциональный» ([243], стр. 11).

На следующей странице мы узнаем, что крупные дождевые капли, которые всегда выпадают из более теплых облаков, становятся теплыми потому, что они падают очень стремительно и благодаря этому приобретают тепло. Скорость падения крупных капель, по-видимому, всегда поражала людей, так, в следующем веке со всей серьезностью сообщалось, что «... в Мексике капли падают столь неистово, что, говорят, они убивают людей» ([186], стр. 121).

Так подошли мы к XVII в. и к труду Фрэнсиса Бэкона «*Historia Ventorum*» («История ветров»), который был опубликован в Лондоне в 1622 г.* Увы! Великий поборник экспериментальной науки считал нужным регулярно ссылаться на Плиния** и говорить нам, что ветер создан (1) испарениями земли и (2) парами, поднятыми солнечным теплом, и что такие пары могут превратиться в ветер или дождь и более того:

«Ветер самосжимается в дождь... будучи либо отягощен своей собственной ношей, при обильном содержании паров, либо сжат встречным движением ветров так, что они стихают и успокаиваются; или же сопротивлением гор или мысов, которые прекращают неистовство ветров и мало-помалу возвращают их назад; либо при чрезвычайных холодах, когда они сгущаются и уплотняются» ([125], стр. 101).

* Переведена на английский в 1653 г. под названием «*The natural and experimental history of winds [etc.]*» [25].

** В книге Тейлора ([331], стр. 89) говорится: «Можно с уверенностью сказать, что едва ли в какой-либо английской книге на заре семнадцатого века автор пошел дальше Плиния».

Если даже Бэкон не решился признаться, что ему непонятно образование дождя, то неудивительно, что еще в течение более двух веков в университетах Германии неизменным потоком выпускались диссертации под названиями «De Pluvia», «De meteoris aques» и пр.*, не представлявшие, насколько я мог изучить их, какой-либо ценности.

Мы вступаем теперь в период инструментальной метеорологии, в частности, в период появления барометра. Здесь вполне уместно было бы обсудить идеи Рене Декарта о дожде, но они составляют лишь малую часть его идей о поведении воды в атмосфере, так что вместо этого я использую их как введение к следующей главе, в которой попытаюсь проследить прогресс представлений о природе водяного пара и о способах его образования.

* Редко отличавшиеся названием, как, например, „Deux ex pluvia“ Мейера [238].

ГЛАВА II

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВОДЯНОМ ПАРЕ В СЕМНАДЦАТОМ И ВОСЕМНАДЦАТОМ СТОЛЕТИЯХ

Ты знаешь сам, как в воздухе клубится
Пар, снова истекающий водой,
Как только он, поднявшись, охладится.

Данте Алигьери
«Божественная комедия»
«Чистилище». Песнь V,
стихи 109—111

1. Пар — не воздух

Искусственное разделение темы, заключающееся в названиях этой и двух последующих глав, не следует понимать, как указание на то, что рассматриваемые в них два направления исследований развивались на протяжении рассматриваемого периода раздельно. В действительности нередко два или даже все три вопроса рассматривались в одной книге или статье, но очевидно, что если наша книга не хроника, а историческое исследование, то нужно попытаться осветить каждую из тем в отдельности, даже ценой множества перекрестных ссылок. Поскольку водяной пар — исходный материал для всех гидрометеоров, то прежде нужно было понять его природу и свойства, а потом уже давать общее объяснение их образованию. Поэтому сначала я рассмотрю различные представления о водяном паре и его образовании, существовавшие примерно между 1637 г., когда появились «Метеоры» Декарта [101], и 1770 г.

Рене Декарт был величайшим философом, оказавшим огромное влияние на развитие науки, несмотря даже на то, что почти все данные им (иногда очень подробные) объяснения явлений природы впоследствии оказались неправильными. * Основываясь

* Почти все, но не все. Напомним, что его классическое объяснение радуги и сделанные им для этого опыты остаются до сих пор основой теории радуги. (Прим. ред.)

на своей вере в силу разума, он высказал ряд смелых утверждений о строении материи. Он считал, что все тела образованы из частиц различных конфигураций и размеров, но состоящих из единой субстанции; частицы эти окружены и разделены отличным от нее исключительно разреженным тонким веществом — «неуловимой материей» (*subtle matter*), также состоящей из частиц различных размеров, постоянно находящихся в движении и целиком заполняющих пространство между более крупными частицами материи. Пустого пространства не может существовать нигде. То, что теперь мы называем свойствами упругости и сопротивления материи, Декарт объяснял формой и расположением ее частиц.

Воду, в частности, Декарт представлял состоящий из длинных, гладких, углеобразных частиц, легко отделяющихся друг от друга. Частицы же большинства других тел и даже воздуха имеют, по Декарту, крайне неправильную форму. Воздух и легкие жидкости отличаются от твердых тел только тем, что частицы последних располагаются теснее и взаимно переплетаются.

Тепло — это проявление движения тонкой материи; чем быстрее она колеблется, тем выше температура. Замерзание воды вызвано ослабленным перемешиванием тонкой материи, которая уже не может поддерживать частицы воды разделенными.

Отсюда естественно вытекает объяснение, даваемое Декартом процессу испарения:

«Если вы примете во внимание, что разреженная материя, находящаяся в порах земных тел, колеблется иногда сильнее, иногда слабее — либо под влиянием Солнца, либо под влиянием иных причин, — а потому она сильнее колеблет и мелкие частицы этих тел, то вы легко поймете и следующее: те частицы, которые достаточно малы и притом имеют такую форму или такие положения, что легко могут отделяться от соседних, тут и там отделяются друг от друга и поднимаются в воздух. Причина этого не в том, что у них была какая-то склонность подниматься или что Солнце обладало какой-либо силой, их притягивающей; причина в том, что для них не находится места, куда они могли бы продолжать двигаться столь же легко, сколь движется пыль на проселочной дороге только оттого, что ее поднимают и приводят в движение ноги прохожих. Ибо, хотя частицы этой пыли гораздо крупнее и тяжелее, чем маленькие частички, о которых мы говорим, но тем не менее и они поднимаются к небу, и можно даже видеть, что они поднимаются гораздо выше, когда на большой площади ходит множество людей, чем когда ее топчет один человек. Поэтому не приходится удивляться и тому, что действие Солнца поднимает на значительную высоту маленькие частички материи, из которой состояются пары и летучие тела, ибо это действие всегда распространяется одновременно на целую половину Земли и пребывает над ней целые дни. Но заметьте, что эти частички, поднятые в воздух Солнцем, должны по большей части иметь ту форму, которую я приписал частичкам воды, ибо нет других частиц, которые могли бы так легко быть отделены от тел, в ко-

торых они находятся. И только их я буду называть собственно парами, чтобы отличить их от частиц, которые имеют менее правильную форму и за которыми я сохраняю название летучих выделений, поскольку не знаю названия более подходящего...»

Мы должны напомнить, что в то время, как впрочем, и много позднее, каждая субстанция, обладающая свойствами того, что мы теперь называем «газ», называлась просто «воздух». Если она была прозрачной и почти невидимой, то это был «воздух». Поэтому было вполне естественным думать, что вода путем испарения трансформируется в воздух, и признание водяного пара как отдельной и особой субстанции считалось своего рода интеллектуальным достижением. Для Декарта это различие было совершенно ясно, и он выразил его в виде своих гипотетических частиц. Частицы водяного пара, по Декарту, имеют ту же гибкую форму, что и частицы воды, но разделяются большими объемами тонкой материи. «И мы не должны сомневаться в том, что воздух часто содержит столько же или даже больше пара, когда он невидим, сколько и тогда, когда мы можем его разглядеть» [101].

Отто фон Герике, изобретатель воздушного насоса, поставивший свои опыты в 1656 г. или ранее того *, так же ясно утверждает, что влага может проникать в воздух и затем снова конденсироваться в жидкую воду, но воздух не может быть превращен в воду. В нижней части атмосферы всегда содержится невидимая влага; количество же ее зависит от погоды.

«...летом...мы видим, что стаканы и другие сосуды для вина, будучи вынесены из холодного погреба, как бы запотевают. Причина этому — то, что воздух вокруг сосуда охлаждается им и сжимается, выделяя свой водный дух, который затем прилипает к стенкам сосуда» [150].

Может показаться, что Герике думал, будто сжатие воздуха холодом выжимает из него воду, но, как мы увидим в главе III, он также считал, что осадки создаются при разрежении влажного воздуха (см. ниже, стр. 43).

К этому времени представление о том, что вода превращается в пар, а не в воздух, стало общепринятым и было использовано просвещенными людьми как оружие против арьергарда армии перипатетиков, отступавшей под натиском Паскаля и Бойля. В 1681 г. Джузеппе дель Папа, пизанский профессор, даже использовал строки из Данте, которые я поставил эпиграфом к этой главе, как доказательство того, что вода не превращается в воздух. «Пар, — говорит он, — превращается обратно в воду, а это равносильно тому, как если бы мы сказали, что вода, сначала разреженная под воздействием тепла, конденсируется холодом и

* Он писал об этом Каспару Шотту 18 июня 1656 г. ([320], стр. 24).

возвращается к состоянию воды; несомненно, не воздух превращается в воду» [86]. Поскольку во всем рассуждении используется слово «пар», то гораздо более вероятно, что Данте просто цитирует какое-то выражение Аристотеля.

2. Поднятие пара

Тот факт, что пар поднимается и остается в воздухе, все еще смущал многих, несмотря на Декарта, метафора которого о пыли, поднятой над полем, могла означать, что пыль также опускается вниз. Одно объяснение, пользовавшееся признанием на протяжении более чем столетия, было предложено в 1666 г. священником Урбано Д'Авизо [82]. Он считал, что пар представляет собой «небольшие водяные пузырьки, наполненные жаром... которые поднимаются в воздухе до тех пор, пока его удельный вес больше, чем их, а когда они достигают места, где их вес сравнивается с весом воздуха, они останавливаются». В 1688 г. Эдмунд Галлей, вероятно, независимо от него выступил со сходным объяснением в Королевском обществе. Он не знал в точности, что именно содержится внутри пузырьков, но не исключал возможности, что там содержится «некоторый вид материи, чье *conatus* [стремление] может быть противоположным силе тяжести, как это, очевидно, имеет место у растительности, побег которой стремятся расти прямо вверх или навстречу отвесу» [156].

Замечательно, что всего лишь за два года до того, как Галлей прочел этот свой доклад, была опубликована статья Уильяма Молинё (также в «*Philosophical Transactions*») о гипотезе, которая, если бы ее применить к атмосфере, дала бы правильное объяснение [244]. В этой статье Молинё обсуждает предположение, высказанное его братом Томасом* относительно причин, по которым тяжелые тела остаются растворенными и взвешенными в жидкостях, значительно более легких, чем сами эти тела. Томас Молинё думал, что объяснение может быть найдено во «внутреннем движении частиц жидкости».

«[Частицы растворенного], будучи столь мелкими, могут приходить в движение под воздействием самой слабой из воображаемых сил, а действия частиц растворителя достаточно для того, чтобы перемещать атомы растворенного твердого тела с места на место, и соответственно, вопреки их тяжести, они не будут тонуть в жидкости, более легкой, чем они сами» [244].

Уильям не считал такое объяснение единственно возможным и предпочитал думать, что частицы растворяемого вещества не

* Оба они были членами Королевского общества и людьми очень выдающимися.

в состоянии разъединить частицы жидкости, которые стремятся сомкнуться. В ответе, приложенном к статье, Томас спрашивает, может ли «причина», выдвигаемая Уильямом, с самого начала перевести тяжелую субстанцию в раствор, как это объясняет его собственная гипотеза. Отсюда видно, что он предвидел молекулярное движение, впервые обнаруженное экспериментально только в 1828 г. [51]. Этой статье было уделено очень мало внимания, и, конечно, никто и не подумал о применении ее к атмосфере, хотя Галлей и отмечал очевидное сходство между испарением и растворением твердых тел в жидкостях. Позднее мы вернемся к этой аналогии.

Водяной пар мог бы подниматься в воздухе, если бы он был легче, чем воздух. Эта очевидная возможность представлялась слишком абсурдной, чтобы рассматривать ее всерьез, до тех пор пока Исаак Ньютон не выступил с категорическим утверждением, что это именно так, в своем знаменитом «Omnibus», вопрос 31, в приложении к третьему английскому изданию его «Оптики» [252]:

«И поскольку частицы неизменного воздуха крупнее и возникают из более плотных субстанций, чем частицы пара, отсюда следует, что истинный воздух тяжелее пара, а влажная атмосфера легче, чем сухая в том же количестве» ([252], стр. 396).

Это утверждение было слишком смелым для того, чтобы его хорошо приняли в XVIII в. даже поклонники Ньютона. Действительно, мне не встречалось ни одной ссылки на него вплоть до 1770 г., и я могу думать, что его просто игнорировали с общего согласия.

Оно было вдвойне ошеломляющим, поскольку, даже если бы мы приняли совершенно недоказанную идею — не была ли она подсознательным эхом идей Декарта? — о том, что частицы воздуха сами по себе более тяжелые, все равно оставалось бы в силе бывшее общепринятым тогда и много позднее представление о том, что во влажном воздухе некоторое количество пара добавляется к уже имеющемуся там сухому воздуху, так что смесь или что бы это ни было, должна быть «еще более тяжелой». Это утверждение Ньютона можно считать подлинным примером гениальности, интуиции, далеко опережающей эксперимент; оно должно было бы проложить дорогу к позиции, которую занял Даниель Бернулли двадцать лет спустя, и к экспериментальной проверке последней части ньютоновского утверждения приблизительно в 1780 г. Его заключения, как мы знаем, не получили в ту эпоху никаких обоснований.

Примерно в это же время успех «атмосферного двигателя» [300] Томаса Ньюкомена возбудил интерес к свойствам пара. В 1729 г. физик Дезагюлье и землемер Генри Бейтон высказали мнение, что при кипячении вода расширяется в 14 000 раз, чтобы

образовать «пар, по упругости равный обычному воздуху» [100]. Но когда воздух (предположительно комнатной температуры) нагревается до температуры кипения воды, говорит Деагюлье, он расширяется только приблизительно до $5/3$ от своего первоначального объема. Следовательно, «если при одинаковом нагревании пар разрежается значительно больше, чем воздух», то пар будет подниматься. Это кажется непосредственным (поп sequitur), но статья интересна благодаря принятому в ней допущению, что пар от кипящей воды и невидимый пар, поднимающийся от воды при более низких температурах, — одно и то же; взгляд, заведомо необычный для того времени. Трудность была в том, что первый быстро становился видимым «паром» и столь же быстро снова рассеивался; было нелегко установить область невидимого пара непосредственно над кипящей водой.

Статья Деагюлье представляет также интерес в связи с брошенной почти случайно в «Починении» к ней идеей о том, что

«при возрастании сил отталкивания частиц неупругая или несжимаемая жидкость может стать упругой или твердой, а тело (или по крайней мере бóльшая его часть) может быть превращено в упругую жидкость, и наоборот — путем уменьшения сил отталкивания упругая жидкость может стать неупругой жидкостью или твердым телом» [100].

Тепло, или «ферментация», может увеличить эти силы отталкивания. Здесь мы имеем несколько более понятную теорию, чем теория, предполагающая просто «комбинацию жара и воды», которая, как мы увидим, стала модной позднее в том же веке. Теория Деагюлье была развита на основе одного отрывка из «Начал» Ньютона, где он, исходя из принципов механики, вывел закон Бойля ([251], кн. II, предл. 23), отрывка, вдохновившего, как мы увидим в главе VII, Джона Дальтона.

Существовавшая в этом вопросе путаница хорошо видна в большом и признанном тогда всеми учебнике физики, написанном в 1736 г. в Голландии Петрусом ван Мушенбруком и переведенном тремя годами позднее на французский язык [249]. Мушенбрук начинает с обычного различия паров — частиц воды и влаги — и испарений, состоящих из любых других частиц, твердых или жидких, но не водяных и влажных. Затем он рассматривает различные возможные способы, которыми пар поднимается в воздух. В первую очередь — под воздействием тепла. Когда «жар проникает в мелкие поры» частицы воды, она расширяется чрезвычайно и поднимается до тех пор, пока не придет в равновесие с воздухом. Следовательно, при низком давлении воздуха пар поднимается меньше.

Пока все идет хорошо; но Мушенбрук был озабочен тем фактом, что если большое тело растягивается, то после некоторого удлинения оно разрушается; таким образом, следует предпо-

жить, что малые частицы могут расширяться без разрушения. Другая трудность заключается в том, что объем жидкой воды при нагревании от точки замерзания до точки кипения увеличивается только на $\frac{1}{26}$. * Но капля воды, превращаемая в пар, увеличивается в объеме, по его измерениям в 14 000 раз. ** В этом расхождении, очевидно, и состоит трудность. Вероятно, он нашел бы объяснение, *поге suo*, если бы ему было известно понятие скрытой теплоты.

До этого Мушенбрук рассматривал пар, поднимающийся от кипящей воды, но, перейдя далее к испарению при более низких температурах, он удивительным образом допускает, что удельный объем пара относительно воды является линейной функцией температуры в градусах Фаренгейта ***. Тогда, даже при температуре замерзания, водяной пар должен быть легче воздуха и «соответственно пар способен уходить из воды и изо льда зимой и затем подниматься, как он это и делает» ([249], стр. 739). Отсюда Мушенбрук делает вывод, что «жар» является основной причиной подъема как паров, так и испарений.

К другим причинам относятся также «ферментация, разложение, смешивание и брожение». В эту группу он, по-видимому, включает образование облаков и туманов (*vapeurs*), возникающих у подножия больших водопадов, среди которых упоминается и Ниагара. Здесь мы снова сталкиваемся с неразрешимой путаницей в представлениях о видимом паре (*steam*), или облаке, и о невидимом. Снова мы встречаемся с предположением, идущим, возможно, еще от Галлея, и имевшим потом длительную и активную историю: «Воздуху и воде свойственно взаимное притяжение, и они растворяются в некоторой степени один в другом» ([249], стр. 740). В качестве примера он приводит испарение пара, поднимающегося над кувшином с горячей водой (*vapeurs*, или *steam*), который быстро рассеивается в воздухе, очевидно, путем растворения. Кроме того, большое количество пара из воды, а также частиц других субстанций подхватывает ветер. Именно поэтому мокрая одежда быстрее высыхает на ветру.

Затем Мушенбрук рассматривает процессы, благодаря которым пары и испарения могут продолжать подъем. Поскольку плотность воздуха уменьшается с высотой, то они могут подниматься до различных высот, в соответствии с их удельным весом. Но:

* По современным данным, эта величина составляет приблизительно $\frac{1}{23}$.

** Тот же ошибочный результат, что и у Деагюлье (см. выше).

*** Хотя Д. Г. Фаренгейт (1686—1736) родился в Данциге, он жил и работал в Голландии настолько долго, что голландцы, по-видимому, считали его своим соотечественником. Это позволяет понять «дружественную» ошибку Мушенбрука.

«...частицы, насыщенные жаром, постепенно теряют часть его, поднимаясь в холодном воздухе, и остывают. В результате, как только они станут столь же холодны, как окружающий воздух, они уже не смогут подниматься выше в атмосфере... Существуют также и другие частицы, которые, став в 14 000 раз легче воды после того, как они превратились в пар, оказываются по меньшей мере в 14 раз более разреженными и легкими, чем воздух, окружающий нашу Землю. Эти частицы, перемещаясь в воздухе, пока не достигнут места, где они будут с ним уравновешены, смогут подняться только до высоты в 16 английских миль» ([249], стр. 741).

Таким образом, водяной пар от кипящей воды, не «насыщенный жаром» в том смысле, что он теряет часть его при подъеме, занимает в рассуждениях Мушенбрука особое место.

Мы еще не раз встретимся с Мушенбруком и его учебником в последующих главах. Он очень широко цитировался, но в 18-м столетии на учебники смотрели скорее как на обзор состояния науки в текущий момент, чем как на божественное откровение.

В 1743 г. Академия в Бордо присудила премию Г. Е. Хамбергеру за его труд [157]. В этой работе он изложил новую точку зрения, а именно что пар может подниматься только благодаря движению воздуха. Этому процессу содействует то обстоятельство, что пар, будучи теплее воздуха, слегка нагревает его, вызывая тем самым движение, направленное вверх. Хамбергер имел уже элементарное представление о конвекции. Так, заметив, что пары, нагретые слабо (как, например, туманы над озером в летние ночи), не поднимаются высоко, он продолжает:

«Однако тепло, необходимое для поднятия пара, может быть восстановлено... если область, наполненная паром, освещается солнцем, поскольку... воздух, наполненный паром, будет нагреваться солнечными лучами сильнее, чем окружающий чистый воздух, так как первый из них является более плотным телом, а тела тем более восприимчивы к теплу, чем они плотнее» ([157], стр. 85).

Последнее предположение в то время было, конечно, чисто интуитивным.

3. Растворенная вода

Приблизительно в это же время в Страсбурге появилась книга, которая, если бы она привлекла чье-либо внимание, могла бы послужить ключом к решению этой головоломки. Это была «Гидродинамика» Даниеля Бернулли [35], в разделе X которой * он обосновал кинетическую теорию газов, показав, что соотношение между давлением, температурой и объемом упругих жидкостей можно объяснить, допустив, что эти субстанции

* Первые шесть параграфов раздела X были переведены Джеймсом Ньюменом [250].

состоят из бесчисленного количества частиц, находящихся в быстром движении. Эта идея была слишком революционной для его времени, и ее восприняли как искусное упражнение в математике; по-видимому, она была накрепко забыта вплоть до следующего столетия. У нас будет случай вернуться к ней в главе IV, но сейчас мы рассмотрим развитие теории испарения как растворения. Обычно ее возникновение относят к 1751 г. [216]; но мы уже упоминали замечания Галлея, к тому же еще в 1742 г. появилось краткое сообщение секретаря Королевской Академии наук в Париже (в то время им был Ж. Ж. Д'Орту де Меран) о некоторых соображениях Жана Буйе по поводу этой проблемы [230]. (Буйе был корреспондентом Академии в Безье.) Меран говорит:

«Все частицы жидкости находятся... в постоянном движении, и движение это круговое или близкое к таковому. Таким образом, частицы, которым случится оказаться на поверхности, вынуждены подниматься и вылетать по касательной...» ([230], стр. 18).

Это звучит более по-картезиански, чем у самого Декарта. Но почему, спрашивает он, они тут же не падают обратно? «Ведь каждый знает, что частицы воды и всех других жидкостей хотя и малы, но весят, при одинаковом объеме, значительно больше, чем частицы воздуха» ([230], стр. 19). А по законам гидростатики более тяжелое должно падать вниз. Стремясь преодолеть эту трудность, Буйе делает предположение, что испаряющаяся вода «соединена» с воздухом точно так же, как воздух, поглощенный водой, объединен с ней и образует ее часть. Ясно, что теория Буйе — теория растворения, хотя само это слово и не названо.

В своей «Записке о поднятии воды и ее взвешенном состоянии в воздухе и о росе» Шарль Леруа [216] из Монпелье употребил слово «раствор» и использовал его очень правильно. Эта работа, несмотря на устарелость ее физических идей, представляет собой образец изящного изложения и, что более важно, является вехой в истории гигрометрии.

Леруа начинает с цитат из Мушенбрука, Буйе и Барбаре. Последний в своем докладе [27], прочитанном в Академии в Дижоне 20 августа 1752 г. *, рисует очень недурную картину процесса испарения. Частицы воды выталкиваются из жидкости под воздействием движущихся с большой скоростью частиц жара (эффект температуры) или воздуха (эффект ветра). Но чем они поддерживаются? «Растворением» в воздухе, говорит

* Явное несоответствие дат возникает из-за медленности публикаций парижских «Mémoires»; том за 1751 г. был опубликован лишь в 1754 г. Статья Леруа была послана из Академии Монпелье и помещена почти в конце тома. Фактически ее можно отнести к 1753 г.

он и предлагает нам вообразить себе сферические частицы воды, поддерживаемые разветвленными частицами (*parties gameuses*) воздуха. Фактически он даже утверждает, что частицы воздуха выхватывают частицы воды с поверхности, «подобно множеству рычагов»! ([27], стр. 11.)

Авторы, которых он процитировал, говорит Леруа, думают, что механизм, с помощью которого твердые тела растворяются в жидкостях, известен лучше, чем механизм, поднимающий воду в воздух, и что понятие раствора может «объяснить или, по меньшей мере, прояснить механизм поднятия и взвешивания воды и воздуха» ([216], стр. 482). Он придерживается того же взгляда и далее развивает его.

Прежде всего для истинных растворов характерна прозрачность; тело, которое кажется раствором, но является мутным, находится в состоянии лишь «простого механического разделения». Воздух, содержащий водяной пар, в отличие от тумана или облака, столь же прозрачен, как и сухой воздух. Во-вторых, так же как и количество соли, способное раствориться в воде, количество воды, которое может удержать воздух, зависит от температуры.

Как доказательство теории растворения он приводит такой эксперимент: если лед помещается в сухой стакан, последний быстро покрывается очень мелкими каплями воды. Эта вода не может появиться ниоткуда, кроме как из совершенно прозрачного воздуха, окружающего стакан. *

Чтобы продемонстрировать влияние температуры, он просто запечатал бутылку с влажным воздухом. Когда температура в помещении, где находилась бутылка, понизилась до некоторого определенного уровня, внутренние стенки бутылки покрылись росой; при повышении температуры роса исчезла. Пока бутылка оставалась запечатанной, роса появлялась всегда при одной и той же температуре — наиболее низкой температуре, при которой воздух в бутылке мог, как он думал, содержать в виде раствора всю ту воду, которая была в бутылке вначале.

Эту температуру, которую мы теперь назвали бы точкой росы, Леруа назвал «градусом [*degré*] насыщения воздуха» ([216], стр. 490). Он мог измерять ее для воздуха в комнате или вне помещения, используя для этого несколько бокалов, немного холодной воды и термометр. Если роса образовывалась после наливания воды в сухой бокал, то он нагревал ее на полградуса и переливал воду в другой бокал, и так до тех пор, пока роса не переставала образовываться. Это был его гигрометр, неудобный, но в принципе верный, и с его помощью он провел многочисленные наблюдения. Так, например, он нашел, что в Мон-

* Эксперимент, очень изящно проведенный в Академии Опыта (*Accademia del Cimento*) во Флоренции около 1660 г.

пелье температура точки росы различна при различных направлениях ветра, поскольку южный ветер с моря — наиболее влажный, а северный — наиболее сухой. Мистраль (mistral) и «грек» (grec) (NE) не столь сухие ветры. При «греке», как он думал, воздух должен быть более влажным наверху, поскольку при нем обычно пасмурно. Он также считал, что на больших высотах воздух очень холоден и не в состоянии удерживать много «растворенной» влаги.

Очевидно, такого рода эксперименты открывали новые перспективы для метеорологии, и Леруа сознавал это.

«Теория, которую мы разработали, дает нам точные представления о поднятии и взвешивании воды в воздухе и о причинах осадков; представления, которые, как кажется, должны заменить те смутные взгляды на разрежение и конденсацию пара, которыми мы удовлетворялись до сих пор» ([216], стр. 494).

Леруа значительно прояснил понятия «сухой воздух» и «влажный воздух». Он указал, что эти понятия относятся не к абсолютному влагосодержанию воздуха, как это обычно считалось, а к количеству находящейся в нем воды относительно той воды, которая может в нем содержаться при господствующей температуре. Он заметил, что сухой воздух в летний день может содержать больше воды, чем очень влажный воздух зимой.

Но были понятия, так и оставшиеся неясными, по крайней мере для Леруа. Он думал, что вес воздуха частично обусловлен растворенной в нем водой. Воздух — это жидкость, состоящая из двух компонентов, «удельные веса которых весьма различны» ([216], стр. 496). Насколько нам известно, он не допускал мысли о том, что водяной пар может иметь меньший удельный вес, чем воздух. Тем не менее его статья была, несомненно, одним из наиболее важных вкладов в метеорологическую литературу 18-го столетия.

Теория растворения нашла ряд поборников, среди которых одним из наиболее убежденных был преподобный Хьюг Гамильтон, профессор физики в Дублине. Стремясь умножить доказательства, свидетельствующие в пользу этой теории [158], он ссылаясь, например, на эксперимент Германа Бурхава, в котором воздушный пузырек над свободной от воздуха водой постепенно абсорбировался. Если этим подтверждается, говорил он, растворение воздуха в воде, то почему вода не может растворяться в воздухе? Он указал также на дальнейшее сходство между испарением и растворением твердых тел в жидкостях, проявляющееся в следующем.

1. Так же как растворение соли в воде существенно ускоряется при перемешивании, так и испарение усиливается при движении воздуха.

2. Тепло способствует, а холод препятствует как растворению, так и испарению.

3. Так же как роса или иней возникают при охлаждении влажного воздуха, так и соль отлагается из охлаждаемого крепкого раствора.

4. Как растворение соли, так и испарение жидкостей создают холод.*

Когда появилась статья Гамильтона, кое-кто вспомнил, что за девять лет до того Бенджамин Франклин представил статью на ту же тему, где поддерживал теорию растворения. Эта статья была затем опубликована с извинениями за запоздание.

Теория растворения открывала широкий простор для возражений. Она не могла объяснить испарение жидкостей в вакууме. То, что жидкости в вакууме испаряются, было хорошо известно по первым экспериментам с воздушными насосами, сделанным Герике и Бойлем, хотя тщательное специальное исследование должно было дожидаться Нильса Валериуса, опубликовавшего в 1738 г. статью под названием «*De ascensu vaporum in vacuo*» [351]. После тщательных опытов в вакууме с водой, а также с вином, взвешиваемыми через определенные интервалы, Валериус не только обнаружил испарение, но и вынужден был заключить, что пар может подниматься в вакууме. Это исключало предположение, по которому пар поднимается потому, что его удельный вес меньше, чем воздуха: он не мог быть легче вакуума.

Валериус не был противником теории растворения, так как в то время она еще не была сформулирована. Он искренне недоумевал, отмечая, что едва ли пары состоят из молекул воды и жара, даже если «жар» весит меньше, чем ничто; ибо как бы мог испаряться лед даже на вершинах гор, как это происходит на самом деле? Пар не может также представлять собой пузырьки с разреженным воздухом или даже с пустотой внутри, так как такие пузырьки не поднимались бы в вакууме; в любом случае здравый смысл не позволял ему поверить в пузырьки, которые должны были бы легко сплющиваться.

Статья Валериуса, помещенная в шведском журнале, по-видимому, осталась почти неизвестной. В 1771 г. Генри Хом, лорд Кеймс, шотландский юрист, решивший на старости лет развлечься физикой, выступил в защиту теории растворения с пылкой статьей [174], утверждая, что «никакой честно рассуждающий человек не может не согласиться с этой теорией, являющейся капитальным разделом общей теории растворения, поддержи-

* По Г. Газзери [139], тот факт, что вода, закипающая в вакууме, становится холоднее, отмечен в неопубликованном Дневнике Академии Опыта от 8 августа 1662 г. Холод, возникающий при испарении, был снова обнаружен Г. В. Рихманом [297] и правильно связан с испарением Уильямом Кулленом спустя пять лет [65].

ваемой всеми химиками» ([174], стр. 90). Но испарение с кипящей воды отличается от этого; оно вызвано взаимным отталкиванием частиц воды, возникающим, когда она очень сильно нагрета.

Кеймс знал, что теория растворения не объясняет испарение в вакууме. Но:

«Лучшим способом объяснить это предполагаемое испарение, по крайней мере наиболее легким, является отрицание этого факта, что может быть сделано *с bona fide**, поскольку я не слышал о каком-либо эксперименте, подтверждающем его» ([174], стр. 99).

Нет оснований сомневаться в *bona fides* лорда Кеймса, но трудно объяснить результат, полученный в 1777 г. доктором Добсоном в Ливерпуле, который «взвесил два фарфоровых блюда, каждое из которых содержало три унции воды». Одно было помещено снаружи, другое

«под приемником воздушного насоса. Воздух был выкачан, и поршни временами продолжали работать для того, чтобы извлечь всю воду, которая предположительно превратилась в пар. Через четыре часа блюда были снова аккуратно взвешены: то, которое находилось на открытом воздухе, потеряло в весе одну драхму и восемь гран, вес другого остался без заметного уменьшения» [103].

Трудно поверить, что доктор был и честным, и компетентным.

В 1780 г. Лоренцо Пиньотти из Пизы рассмотрел теорию растворения и одобрил ее [272]. Он отверг то, что вода испаряется в вакууме: во-первых, потому, что из воды выходит безмерное количество воздуха и вода растворяется в нем; во-вторых, если испарение действительно происходит в истинном вакууме, то это должен быть совершенно иной процесс.

Эту дискуссию продолжил на следующей стадии знаменитый швейцарский геолог и физик Орас Бенедикт Соссюр в своих «*Essais sur l'hygrométrie*» — одном из выдающихся памятников физики 18-го столетия [308]. Мы можем резюмировать его теорию так: испарение есть результат тесного союза жара с водой, создающего упругий флюид легче воздуха, который он называет паром (*varour*). Он показал, что флюид, образуемый водой, испаряющейся в вакууме, создает давление, которое можно измерить с помощью барометра и которое зависит от температуры. Когда такой пар образуется в вакууме или от кипящей воды, это, по Соссюру, чистый упругий пар; но если пар возникает при обычных температурах и в воздухе, то такой пар пронизывает воздух, смешивается с ним, претерпевает настоящее растворение; это уже растворенный упругий пар. Позднее мы

* С полной верой (лат.). (Прим. перев.)

увидим, что это существенным образом отличается от первоначальной теории растворения, поскольку требует объединения «жара» с водой до того, как последняя может быть растворена в воздухе. Может возникнуть вопрос — зачем тогда вообще была нужна идея о растворении, и этот вопрос, как мы увидим далее, действительно был поставлен. Однако прежде мы дадим обзор, сделанный в 1774 г. Луи Коттом [62], различных теорий испарения, распространенных в этот период: 1) теория, основанная на разделении воды на молекулы, достаточно малые, чтобы воздух мог их увлечь за собой и поддерживать (фактически это теория Декарта, которая тогда была уже не в моде); 2) теория о том, что «жар» объединяется с водой, увеличивая объем водяных частиц до тех пор, пока они не становятся достаточно легкими, чтобы всплыть (эта теория была вскоре усовершенствована — когда появилось предположение о том, что при объединении «жара» с частицами воды возникает упругий флюид); 3) теория растворения.

Котт опустил — вероятно, намеренно — электрическую теорию испарения. Приблизительно между 30 и 60-ми годами XVIII в. было сделано бесконечное количество экспериментов со статическим электричеством, и самые различные люди, совершенно естественно, стремились использовать эту новую «силу» для объяснения явлений, приводящих в недоумение. В 1742 г. Дезагюлье попытался объяснить таким образом испарение [100]:

«Воздух, протекающий у самой поверхности воды, назлектризован, и тем сильнее, чем жарче погода. И теперь, аналогично мелким частицам воды, что выпрыгивают навстречу электрической трубке, разве не могут выпрыгивать частицы воды навстречу частицам воздуха, чей удельный вес значительно больше веса малых частиц воды, и прилипать к ним? Тогда находящийся в движении воздух будет подхватывать частицы воды и уносить их, как только они окажутся назлектризованными от него, причем они будут отталкивать друг друга, а также частицы воздуха. В этом причина того, что кубический дюйм пара легче, чем кубический дюйм воздуха, чего не было бы, если бы частицы пара были только вовлечены в промежутки между частицами воздуха, потому что в этом случае кубический дюйм воздуха, нагруженного паром, имел бы больший вес, чем кубический дюйм сухого воздуха, что противоречит экспериментам, при которых барометр показывает нам, что влажный воздух, или воздух, наполненный парами, всегда оказывается легче сухого воздуха».

Я не собираюсь уделять в этой книге слишком большое внимание электрическим теориям дождя 18-го столетия, поскольку они оказались полностью бесплодными. Вышеприведенный отрывок, однако, примечателен тем, что это — первая из известных мне попыток отойти от представления, что пар является добавкой к весу воздуха, хотя знаменитый философ Христиан Вольф думал, что водяной пар сохраняется в воздухе потому,

что он имеет тот же удельный вес, что и воздух, а также указывал, что прозрачность (или другие свойства) воздуха зависит «не от количества пара, а от способа, которым он попал в воздух. Таким образом, ясный воздух может содержать столько же пара, сколько и мутный» [367].

4. Вода и «жар»

Теперь мы должны вернуться к гипотезе о том, что водяной пар является смесью, или соединением, воды и «жара». Надо отметить, что последний в 18-м столетии почти всеми рассматривался как исключительно тонкая (разреженная) и почти или совершенно невесомая субстанция, которую называли «калориком». Наиболее стойким защитником этой теории был Жан Андрэ Делюк, который играл столь заметную роль в развитии нашей проблемы, что я счел нужным привести некоторые биографические данные о нем. Уроженец Женевы, до 1773 г., когда он переселился в Англию, Делюк занимался коммерцией и политикой, но, еще будучи молодым человеком, увлекся геологией и метеорологией и совершил много путешествий с научной целью в Швейцарские Альпы. Он сам относит появление у него интереса к барометрии и барометрической гипсометрии приблизительно к 1749 г., когда ему было всего лишь 22 года [88]*. Это увлечение превратилось в горячее желание разрешить задачу колебаний барометра и создать удовлетворительную теорию дождя.

Переехав в Англию, Делюк вскоре стал членом Королевского общества и получил не очень обременительный пост чтеца при королеве Шарлотте, сохранявшийся за ним до самой смерти. Он мог заниматься своими научными исследованиями с большей свободой, чем раньше, и создал ряд работ, из которых для нас наиболее интересна «Мысли о метеорологии» («*Idées sur la météorologie*») [90], которая появилась в 1786 (в Лондоне) и 1787 гг. (в Париже) и на которую мы будем часто ссылаться в последующих главах. Его репутация у современников была намного лучше его истинных способностей. Он был близким другом Уатта и Пристли и находился под сильным влиянием их исследований, особенно Пристли. Делюк — один из наиболее интересных и вместе с тем наименее привлекательных героев нашего повествования. Он был яростным спорщиком и обладал замечательной способностью к самообману или, скорее, полной неспособностью к критике собственных идей. Тем не менее эти

* В дальнейшем ссылки будут даваться на номера параграфов, совпадающие в обоих изданиях [88] и идущие от начала до конца книги в единой нумерации. Книга будет обозначаться как „*Modifications*“.

идеи иногда были плодотворными, и в истории создания метеорологических приборов он занимает почетное место.*

«Modifications» Делюка впервые вышли в свет в 1772 г., но имеются сведения, что, по существу, они были завершены еще за десять лет до этого. Мы можем поэтому предполагать, что еще в 1760 г. он пришел к выводу, что водяной пар легче воздуха, что он состоит из воды и «жара». Доказательству этого предположения он посвятил многие страницы своего труда (§ 675—708). Интересно, что в это время оно не было связано с его размышлениями о том, является ли «жар» «реальной субстанцией или простой модификацией» (сноска к § 675), хотя в более поздний период своей жизни он не сомневался в его материальном существовании.

Одним из его доказательств было то, что «жар» имеет большее сродство к воде, чем к воздуху; разве вода не гасит «жар», поглощая его? Кроме того, температура ниже на больших высотах, где воздух суше. Конденсируясь на достаточно холодном теле, пары сами доказывают, что они содержат «жар» (§ 691), а жидкости при испарении охлаждаются (§ 693). (Читатель может заметить, что эти два последние явления были аргументом в пользу теории растворения.) Он заметил, что облако, сквозь которое он проходил на горе, было теплее, чем окружавший его прозрачный воздух, и что образование тумана и инея часто сопровождается повышением температуры (§ 694—696). Далее на нескольких страницах он пытается показать, что даже зимой существует достаточно «жара», чтобы произошло испарение (§ 684—690).

Этой теории вскоре оказал поддержку крупный химик Антуан Лоран де Лавуазье. В 1777 г. он прочитал в Академии наук записку под названием, наводящим на мысль о том, что в науке того времени наметился прогресс [208].

«В этой записке, — начинает Лавуазье, — я предположу, что планета, на которой мы обитаем, со всех сторон окружена очень тонкой жидкостью, проникающей во все субстанции, из которых состоит мир, по-видимому, без исключений; и что эта жидкость, которую я назову *«огненная жидкость, субстанции жара, тепла и света»***, стремится прийти в равновесие во всех субстанциях, но не пронизывает их все с одинаковой легкостью; и, наконец, что эта жидкость иногда существует в свободном состоянии, а иногда в фиксированном состоянии, связанная с другими субстанциями».

Это мнение, как он говорит, общепринято. Приведенный отрывок дает краткое изложение материальной теории тепла.

* О Делюке и барометре см. [241].

** „Fluide igné, matiere du feu, de la chaleur et de la lumière“. (Курсив имеется в оригинале.)

Итак, в некотором теле огненная жидкость находится частично в свободном, частично в связанном состоянии. Температура * является мерой свободной части огненной жидкости, так что при любой реакции, судя по тому, как ведут себя реагенты — охлаждаются или нагреваются, — мы можем определить, поглощается ли или выделяется тепло (*matière du feu*). Следовательно, поскольку испарение сопровождается холодом, здесь должна иметь место абсорбция тепла — оно объединяется с жидкостью и образует пар.

Далее Лавуазье описывает опыт, в котором небольшой сосуд с серным эфиром закупоривается пузырем (туго привязанным проволокой) и вместе с барометром помещается под колокол воздушного насоса. Когда достигается относительный вакуум, пузырь прокалывают с помощью остроумного механизма. Тогда «эфир испаряется с удивительной быстротой и превращается в упругую жидкость, поддерживающую давление в барометре на уровне 8 или 10 дюймов зимой и 20—25 дюймов при самой жаркой летней погоде. Испаряясь, эфир становится значительно холоднее» ([208], стр. 425). Если теперь впустить воздух, барометр возвращается к своему обычному показанию, но эфир при этом не конденсируется, а остается в виде упругой жидкости. Другие летучие жидкости, даже вода, дают тот же эффект, хотя и менее заметный.

С удивительной ясностью Лавуазье интерпретирует эксперимент, находя в нем подтверждение

«трех вещам: во-первых, что вес атмосферы представляет собой сопротивление, которое нужно преодолеть, или силу, противостоящую испарению жидкостей; во-вторых, как только эта сжимающая сила исчезает, испаряемые жидкости начинают расширяться и превращаются в воздухоподобные упругие жидкости, разновидности воздуха; наконец, в-третьих, что превращение обычных жидкостей в упругие сопровождается поглощением тепла, которое происходит за счет всех окружающих тел» ([208], стр. 425).

Только недалекovidный человек мог бы поинтересоваться, как ответил бы Лавуазье на вопрос о том, что произошло бы, если бы летучая жидкость вылилась в пустое пространство между Землей и Луной. Откуда взялось бы тепло для ее испарения? Или она не испарялась бы? Вот что говорит Соссюр: «Каждый пар, каждый газ и вообще любая газообразная упругая жидкость является сочетанием тепла [*matière du feu*] с жидкостью или даже с каким-либо летучим твердым телом» ([208], стр. 432).

В связи с этим последним выводом Соссюр указывал [308], что в обычных газах теплота должна быть значительно более

* В оригинале — “*Intensité de la chaleur*”. Позднее Лавуазье уже пользовался термином «температура».

жестко связана с субстанцией, чем в парах, которые могут быть сжижены простым охлаждением.

Основные выводы Лавуазье о паре были приняты Делюком, хотя возможно, что он пришел к ним независимо. Но Делюк был склонен в большей степени, чем Лавуазье, создавать механические — или даже любые другие — гипотезы. Способные к расширению жидкости, как он назвал их в 1786 г., состоят из дискретных движущихся частиц. Эти частицы не обязательно перемещаются прямолинейно, и вообще частицы различных субстанций перемещаются по-разному — гипотеза бесплодная и, вероятно, предложенная ради забавы. Но, если говорить более серьезно, водяные пары имеют механические свойства газов «и проявляют их в полной независимости от этих жидкостей» ([90], § 5). Давление пара *, говорит он, не зависит от наличия воздуха; при одной и той же температуре оно одинаково как в воздухе, так и в вакууме, но наличие воздуха приводит к тому, что небольшое количество воды остается в виде пара при нормальном давлении в атмосфере ([90], § 14). Эти утверждения позволили называть Делюка предшественником Дальтона, но это справедливо лишь в очень ограниченном смысле.**

Интересно, что Соссюр, чей волосной гигрометр Делюк сравнивал со своим собственным, значительно менее совершенным, и получил весьма неблагоприятные результаты***, решительно обвинял Делюка в присвоении его идей о водяном паре [309]. Соссюр имел все основания досадовать на Делюка, но фактически он также мог быть обвинен в присвоении идей Лавуазье. Все эти понятия «носились в воздухе».

Но Делюк, в своем неукротимом стремлении «объяснить» все на свете, не остановился на этом. Он создал, например, квазистатическую теорию, объясняющую, почему максимальное давление пара быстро меняется с температурой. Если содержание пара превышает то, которое должно быть при данной температуре, то частицы воды настолько сближаются, что соединяются между собой легче, чем с частицами «жара» ([90], §§ 8—10). И с характерной для него разбросанностью (фрагментарностью) он утверждал, будто предположение о том, что воздух не является элементарной субстанцией, было высказано им ([90], § 102) еще до Пристли, открывшего сложность его природы.**** Стоит отметить, что в 1782 и 1783 гг. Делюк стал очень близок

* В нашей терминологии, чтобы избежать околичностей.

** См. также главу VII.

*** Об этой дискуссии см. ([240], стр. 247).

**** Согласно [319], Джеймс Уатт описывал Делюка как «скромного изобретательного человека». Изобретательность его очевидна, но скромность трудно обнаружить в его работах; возможно также, что он в известной мере был политиком.

к членам «Лунного общества», особенно подружившись с Уаттом и Пристли.

В дальнейших главах «*Idées sur la météorologie*» он дал волю своей изобретательности, хотя все же не был только человеком с причудами. Его философия резюмирована в следующем отрывке:

«Что самое существенное в природе, коль скоро мы интересуемся физикой, так это то, что явления имеют причины; и единственно возможный для нас способ приписать явлениям разумные причины, если мы их не обнаруживаем сразу, состоит в пользовании аналогией» ([90], § 531).*

Он, по-видимому, и не подозревал об опасностях аргументирования по аналогии и был твердо уверен, что любое «объяснение» лучше, чем признание в полном невежестве. Это привело его к постулированию существования неизвестных и не поддающихся демонстрации «газообразных жидкостей», свойства которых пересказывать подробно было бы скучно.

Но иногда Делюк спускался на землю, и в статье, опубликованной в 1792 г., он дает замечательно разумное объяснение процесса испарения, как его понимали в то время. Водяной пар (для краткости он называет его просто паром) рассматривается здесь как «способная к расширению жидкость, состоящая из воды и жара» [95]. В некотором отношении он усовершенствует идею Лавуазье, говоря (стр. 401), что та часть жидкости, которая исчезает при испарении, «уносится жаром, исходящим от самой жидкости». Он дает «резюме» своей теории в виде одиннадцати «законов гигрологии», которые было бы интересно воспроизвести здесь, если бы они были покороче.** К счастью, он приводит сжатое изложение их в следующих словах (стр. 424):

«...можно без ошибки заключить, что продукт испарения всегда имеет одну и ту же природу, а именно — это способная к расширению жидкость, которая одна или в смеси с воздухом воздействует на манометр своим давлением, а на гигрометр — своей влажностью, одинаково при наличии или отсутствии воздуха, по крайней мере никаких различий до сих пор замечено не было».

Этот вывод получил мощную поддержку Александра Вольта, согласившегося в письме к издателю «*Neue Journal der Physik*» (1796 г.) с Делюком в том, что «количество пара и его давление при данной температуре совершенно не зависят от наличия или отсутствия воздуха» [347]. Еще ранее этот вопрос был сильно продвинут вперед благодаря более точным экспериментам профессора философии в Женеве Марка Августа Пикте. Пикте, чьи «*Essais de physique*» были опубликованы в Женеве в 1790 г.,

* Мы еще вернемся к [90] в главе VI.

** Они занимают около пяти страниц in quarto.

верил в теорию растворения, основываясь на очень правдоподобных доводах Соссюра, но его собственные опыты заставили его рассматривать «жар» как единственный агент, вызывающий испарение [271].

Количественные оценки свойств водяного пара при различных температурах начали появляться с 90-х годов 18-го столетия.* А в конце века М. ван Марум своими очень тщательными экспериментами [342] смог показать, что широко распространенное представление ** о том, что электричество усиливает испарение, совершенно не имеет под собой основания.

* См., например, [314], автор которой сумел обнаружить нулевое давление пара при температуре замерзания.

** Обязанное своим происхождением аббату Нолле [254].

ГЛАВА III

СТРУКТУРА ОБЛАКОВ И ИХ ВЗВЕШЕННОСТЬ

Я бродил одиноко, как облако,
Плывущее высоко над долинами и хол-
мами.

Уордсворт

1. Крошечные частицы

Как бы ни было трудно понять процессы, в результате которых невидимый пар от воды поднимается и рассеивается в атмосфере — а мы уже видели, сколь серьезную проблему это представляло, — взвешенность видимых и явно материальных облаков, часто имеющих огромные размеры, представляла для медленно развивавшейся науки метеорологии даже еще бо́льшие трудности. Ведь было известно, что облака состоят из воды — в той или иной форме, — а вода в несколько сотен раз тяжелее воздуха. Как же тогда может облако плавать в воздухе? Теперь мы знаем, что оно и не плавает: каждая облачная частичка медленно опускается в окружающем ее воздухе, но она может также и подниматься; облако также может непрерывно распадаться у своей нижней границы, по мере того как его частицы опускаются. Но это более сложное решение парадокса относится уже к последнему столетию, мы же должны проследить путь, приведший к нему.

Аристотель был на этот раз на правильном пути. «Капли воды, — писал он, — плавают наверху из-за их малости и остаются в воздухе подобно тому, как малые частицы земли или золота часто плывут по воде» [19].

Что касается Декарта, то он дал похожее, но лучше разработанное объяснение:

«Поскольку [частицы облака] имеют бóльшую поверхность количества материи по сравнению с количеством материи в них, сопротивление воздуха, который они должны раздвигать при опускании, легко может стать сильнее, чем их собственный вес, движущий их вниз» [101].

Читатель, знакомый с историей механики, примет это высказывание за чисто аристотелевское и, возможно, придет к мысли, что Декарт мог бы большому научиться у Галилея, если бы он подождал еще год. Но он усовершенствует его, замечая, что ветер дует «больше вверх, чем вниз», и может не только поддерживать облако, но и вызывать его поднятие. Кроме того, пары, исходящие из земли, или теплота, могут расширять расположенный под ними воздух, а над ним холод, сжимая воздух, расположенный выше, может увлекать облака вверх. Но он предостерегает нас, что капли или частицы льда — он понимал, что облака могут состоять из таковых, — должны быть очень малыми, ибо иначе они быстро упадут на землю, превратившись при этом в дождь или снег.

Как бы то ни было, нет сомнений, что Декарт был ближе к объяснению взвешенности облаков, чем кто-либо другой, по крайней мере в течение следующего столетия. Но я хотел бы предостеречь читателя от преувеличения заслуг Декарта в данном смысле. Из всего текста «*Les météores*» очевидно, что четкие представления Декарта о непрерывности, выразившиеся в его теории вихрей, не вошли в его метеорологию, и он рассматривает облако как нечто реально существующее: своего рода воздушный шар, который ветер может подталкивать, а несколько ветров — сжимать. Эта последняя идея получила много отзвуков, о которых мы расскажем в двух последующих главах.

Через двадцать лет после появления «*Les météores*» Отто фон Герике, бургомистр Магдебурга, изобрел воздушный насос и провел те знаменитые пневматические эксперименты, которые полностью были описаны лишь в 1672 г. [150]. Очевидно, что Герике также рассматривал облако как предмет, обладающий определенным удельным весом.

«В соответствии с нашими представлениями воздух можно разделить на области. Каждый вид облака, в зависимости от его веса, придерживается свойственной ему области, в которой его вес соответствует таковому воздуха. Но если воздух повсюду подвергается сжатию, то он должен стать одинаково тяжелым как наверху, так и внизу, так что облака не могут формироваться в различных областях различным образом, но как предметы опускаются на дно или плавают в воде, так и облака могут или опускаться к земле или подниматься к самым верхним слоям воздуха» ([150], стр. 72).

2. Мелкие пузырьки

Но Герике сам создавал облака в своей лаборатории. Он брал две бутылки с кранами, выкачивал воздух из одной, соединял их и открывал краны. Выравнивание давления заставляло воздух в той бутылке, из которой он не был откачан, «отдавать избыточную влагу», и последняя становилась видимой.

«Ее легко наблюдать в виде очень мелких капель [in guttulis minimis], которые постепенно оседают на дно бутылки. Этот процесс тем заметнее, чем больше внутри бутылки влаги, ибо тогда мелкие пузырьки (bullulae) образуются более обильно — настолько, что на них... получается туман. При введении небольшого количества воздуха туман может собираться в облака» ([150], стр. 88).

Я привел этот отрывок из-за таинственного противопоставления *guttulae* и *bullulae*. Есть ли это пример того, что Г. У. Фоулер в «Словаре современного употребления английского языка» называл «изящной вариацией», или же Герике думал, что он обнаружил два различных явления? Я считаю, что второе объяснение более правдоподобно, по следующим причинам: во-первых, эти два латинских слова имеют совершенно различные значения, во-вторых, явления в такой бутылке могут происходить существенно по-разному, в зависимости (предупреждая изложенное в главе VIII) как от концентрации ядер конденсации, так и от количества влаги, содержащейся в ней.* При небольшом содержании ядер конденсации формируются сравнительно крупные капли, весьма быстро оседающие на дно бутылки; если число ядер велико, они делят влагу между собой и капли получаются мельче, так что они дольше остаются во взвешенном состоянии. Мне представляется вероятным, что Герике, чья скупость на слова была совершенно нехарактерна для того века, действительно хотел указать, что он считал мелкие частицы пустотелыми.

Следующее указание на мелкие пузырьки я обнаружил в докладе, прочитанном Галлеем в 1688 г. и опубликованном в 1693 г. [156], на который я уже ссылался в главе II.** Обычно считают, что Галлей первый предложил теорию, согласно которой облака плавают потому, что они состоят из мелких пузырьков. В действительности он совсем так не думал; как я уже показал, он считал, что невидимый водяной пар может подниматься потому, что атомы воды расширяются, превращаясь в «оболочки, или пузырьки»*** На стр. 473 своей статьи он дважды ясно говорит,

* См. ниже, стр. 149.

** Риттер [299] говорит, что «пузырьковая» (везикулярная) гипотеза впервые была высказана Лейбницем в 1668 г. Я не смог проверить эту ссылку.

*** См. выше, стр. 26.

что облака состоят из «капель», а в одном случае — из «видимых капель».*

Первое четкое утверждение о пузырьковой природе облаков, которое я нашел, относится к 1701 г. и содержится в работе иезуита Парди [260]**, который старался опровергнуть идею (поддерживаемую, как он говорил, многими), что «пары», составляющие облако, связаны друг с другом «как бы клеем», образуя «единое тело, которое легко удерживается в воздухе вследствие огромной величины его поверхности» [260]. Парди сомневается не в том, способно ли предполагаемое тело удерживаться наверху, но связаны ли частицы облака между собой более жестко, чем частицы воды, и, кроме того, действительно ли воздух может легко проникнуть сквозь воду наверх и ускользнуть.

Следовательно, он предполагает, что облака состоят из мелких пузырьков. Они не могут быть наполнены обычным воздухом, а должны содержать «огненный газ» (*fiery spirits*) или «очень тонкий и очень разреженный воздух». Поскольку стенки пузырьков имеют различную толщину, то они плавают на различной высоте; этим и объясняется существование облаков и туманов***. Парди излагает все вышесказанное как собственную оригинальную концепцию.

Идеи Галлея правильно изложены в диссертации Иоганна Крюгера, опубликованной в 1701 г. в Йене [64]. В ней также упоминается возможность того, что облака состоят из пузырьков, но без большого энтузиазма.

В первом томе трудов новой Берлинской академии, основанной Фридрихом III по мысли великого философа Готфрида Вильгельма Лейбница, последний высказался об этой проблеме [210] во вводных замечаниях к краткой статье некоего Шовена [56]. Лейбниц пытается опровергнуть то возражение, что если бы заключенный в пузырьке воздух был более разреженным, чем воздух вокруг пузырька, то последний сжался бы так, чтобы плотности уравнялись. Он вводит эффект тепла «или чего-то аналогичного теплу в ферментации и в сходных физических процессах». Но почему воздух внутри пузырька должен оставаться более теплым? Потому что воздух вне пузырька движется быстрее, чем сам пузырек (!), так что новый воздух будет сталкиваться с ним и передавать ему свое тепло «совершенно так же, как мы ощущаем, что наша рука, опущенная в теплую или холодную воду, становится теплее или холоднее, если мы ею двигаем, а не держим ее неподвижно» ([210], стр. 124). Затем он

* На эту статью будет ссылка в главе V (стр. 86).

** Это не тот Парди, который спорил с Ньютоном о свете.

*** По-видимому, физическое тождество облаков и туманов никогда серьезно не отрицалось, следовательно, туманы не требуют специального рассмотрения в этой главе.

проводит обширные подсчеты толщины стенки пузырька относительно его диаметра, необходимой для того, чтобы пузырек плавал.

Написав этот абзац, я внезапно понял, что не уделил внимания работе Шовена, которая вызвала комментарии Лейбница, хотя и то, и другое было равно вздорным. Так гипнотизируют нас имена великих людей! Истина в том, что великий философ, математик и государственный деятель был значительно менее удачлив в физике. В то время как эта фантазия Лейбница не оказала большого влияния на развитие науки, следы другой, также лишенной смысла идеи (ее мы должны будем коснуться в следующей главе), выветрились лишь через шестьдесят лет.

В 1711 и 1712 гг. Уильям Дерхэм, член Королевского общества, пастор в Упминстере (Эссекс), прочел на Бойлевских чтениях лекции, которые были опубликованы позднее [99]. В этой работе, выдержавшей до 1800 г. четырнадцать изданий, Дерхэм с таким увлечением писал о пузырьках, что некоторые стали считать его отцом этой идеи. Он был оригинальным лишь в том, что утверждал, будто наблюдал пузырьки

«с помощью микроскопа, как они плывут в луче солнца, пропикающем в темную комнату, над теплой водой, причем некоторые пары кажутся крупными, а некоторые — более мелкими шариками, что (несомненно) зависит от больших или меньших количеств тепла, поднимающих их вверх и уносящих их» ([99], стр. 49).

Я не могу сказать точно, верил ли в пузырьки Ньютон. Кажется, он называл частицы облака «шариками» (*globules*) — слово, которое применимо как к пузырькам, так и к каплям [252]. Но не прошло еще и десяти лет со смерти Ньютона, как другой англичанин, гораздо менее известный, но обладавший большим здравым смыслом, Джон Роунинг, посмотрел на эти пузырьки более строго и спросил:

«Во-первых, каким образом воздух в пузырьках приобретает меньший удельный вес, чем вне их, если солнечные лучи, воздействующие на воду, имеют равномерную плотность на всей ее поверхности? Во-вторых, если бы более разреженный воздух мог отделиться от более плотного окружающего воздуха... то что могло бы препятствовать внешнему воздуху воздействовать на то, что заключено в пузырьках, немедленно приводя это к той же температуре и удельному весу, которые свойственны ему самому (причем холод мог бы легко передаваться через такие тонкие пленки воды)?..

В-третьих, если бы мы и согласились с остальной частью предположения, то все еще осталось бы следующее затруднение. Если облака сделаны из пузырьков воды, наполненных воздухом, то почему же эти пузырьки не расширяются всегда, когда окружающий воздух становится более разреженным и начинает оказывать на них меньшее давление, а также — почему они не сжимаются, когда окружающий воздух сжимается при накоплении

воздуха вверх? Однако если бы эти уплотнения и разрежения происходили бы, то облака всегда оставались бы на одной и той же высоте, что противоречит наблюдениям; и у нас никогда не было бы дождя» ([301], ч. 2, стр. 132).*

Автор другого учебника, Дезагюлье, также высказывал свое неверие в мелкие пузырьки, но на основании менее солидных доводов: он считал, что причиной «поднятия паров» должно быть электричество [100].

По-видимому, кое-что новое было добавлено к дискуссии в 1743 г. Христианом Готлибом Кратценштейном, молодым человеком, получившим премию Академии наук в Бордо [196]. Создавая облако частиц способом, сходным с применявшимся Герике, он заметил, как и Герике, что если проводить опыт в пучке лучей солнечного света, то в начале процесса расширения возникают переливающиеся радужные цвета. Сейчас мы знаем, что эти цвета обусловлены дифракцией и действительно могут быть использованы для оценки диаметра частиц, но Кратценштейн думал, что они сходны с исследованными Ньютоном цветами мыльных пузырей, и использовал их для оценки толщины оболочки предполагаемых пузырьков. Он оценил также их диаметры, сравнивая их под микроскопом с человеческим волосом. Сопоставив оба результата, он нашел, что пузырьки не настолько легки, чтобы они могли плавать в воздухе; если они и могут «плавать», то только благодаря вязкости воздуха или восходящим потокам. Тем не менее он считал, что частицы являются пузырьками, поскольку сами по себе облака не могут создавать раду, — возражение, для опровержения которого потребовалось более столетия.

Я перешагну здесь через 40 лет для того, чтобы изложить мнение Соссюра по всем этим вопросам. Этот блестящий экспериментатор убедил себя в том, что облака состоят из пузырьков, более того — он убедил себя (и настолько, что уже не мог изменить свое мнение) в том, что эти пузырьки достаточно легкие для того, чтобы плавать в воздухе и даже подниматься в спокойном воздухе. Доводом было то, что он видел их. Когда он рассматривал с линзой в руках поверхность горячего кофе в чашке (или другой темной жидкости), то поведение малых частиц облака пара над ней убеждало его в том, что эти частицы являются пузырьками.

«Легкость этих небольших сфер, их прозрачность, их вид, совершенно отличный от вида сплошных шариков, их полное сходство с теми более крупными пузырьками, которые мы видим плавающими на поверхности жидкости, — все это не составляет сомнений относительно их природы. Достаточно увидеть их, чтобы убедиться, что это — полые сферы, подобные, за

* К 1767 г. учебник Роунинга выдержал шесть изданий.

исключением размера, тем, которые мы создаем из мыльной воды» ([308], стр. 201).

Более того, он наблюдал их в облаках на горах, держа сильную лупу в одной руке и отполированную черную поверхность в другой. Они выглядели совершенно так же, как пузырьки, наблюдавшиеся над горячей жидкостью. Не имеет значения, был ли прав Кратценштейн в оценке толщины их стенок, если Соссюр считал их полыми и способными плавать в воздухе ([308], стр. 204).

Соссюр повторил основанные на законах оптики возражения против концепции сплошных капель. Было бы очень интересно знать, что ему было известно о малых кругах, или, как мы их теперь называем, венцах, видимых вокруг небесных тел, но он был настолько убежден в том, что облака по своей природе «пузырчатые», что приписал происхождение венцов образованию капель в облаках. Разве не были они предвестниками дождя? ([308], стр. 206.)

Другим трудно объяснимым явлением оказалось длительное сохранение почти постоянной высоты основания облаков, хорошо видимое на фоне гор. Понятие об уровне конденсации возникло лишь через десятилетия.

Соссюр попытался повторить наблюдения Кратценштейна за цветами. Вместо того чтобы увидеть быстро меняющиеся цвета, он увидел большое число оттенков сразу и сделал вывод, что «каждый из этих пузырьков подобен мыльному пузырю, а следовательно, он должен быть толще у основания и тоньше в верхней части». Он не думал, что по цвету можно оценить толщину их стенок.

Но даже если бы оценки Кратценштейна были бы правильными, пузырьки еще могли бы плавать. Их легкость могла быть частично связана с присоединением очень легкой «атмосферы». Он утверждает:

«Многие физики считают, что почти все тела окружены жидкостью, более разреженной, чем воздух, и что эта жидкость как бы пристает к ним и образует вокруг них своего рода «атмосферу».

В поддержку этой идеи приводится тот факт, что мелкие пузырьки парят над горячей жидкостью. Но что из себя представляет эта атмосфера? «Жар», электрическая жидкость, «тонкий воздух», который некоторые физики отличают от обычного воздуха, или какая-либо другая «газообразная жидкость»?

«Пристли открыл столько различных видов воздуха, что допустимо, чтобы физики предположили существование еще и других его разновидностей, природа и плотность которых отвечала бы требованиям естественных явлений» ([308], стр. 212).

У Пристли было много за что нести ответственность в кипучей среде физиков 80-х годов XVIII в., но в его пользу можно сказать, что он скорее идентифицировал «воздухи», а не придумывал их.

Позднее Соссюр склонился в пользу электрической жидкости, исходя из того, что дождь разражается обычно после вспышек молнии. Разве не могло быть так, что большое число пузырьков «в результате внезапного взрыва лишалось поддерживающих их крыльев», сливалось в капли и давало начало ливням? ([308], стр. 216.)

Остается серьезная проблема — проблема, которая до тех пор почти игнорировалась, — как образуются пузырьки? Нам может казаться странным, что этим аспектом вопроса пренебрегали на протяжении целого столетия, но было именно так. Соссюр этого, конечно, не знал, но он считал, что это результат своего рода кристаллизации. Он думает, что это более вероятно, поскольку вода в такой форме, по-видимому, способна сопротивляться замерзанию: действительно, он видел облака и туманы, «состоящие из таких пузырьков, плавающих в воздухе даже при температурах на несколько градусов ниже точки замерзания». *

Они являются жидкими, поскольку образующаяся при конденсации их на твердом предмете изморозь представляет собой не массу мелких сфер, а скопление хрупких кристаллов.

Я не могу оставить на этом Соссюра, не попытавшись перевести с его изящного французского языка параграф о, по-видимому, мгновенном формировании облаков:

«Я часто наблюдал крайне удивительное явление, которое могло бы, как мне кажется, пролить некоторый свет на этот вопрос (об образовании пузырьков). Когда я бывал застигнут дождливой погодой на вершине или на склоне высокой горы, я обычно старался наблюдать развитие облаков, зарождавшихся почти все время над лесами и долинами, лежавшими подо мной. Никакой туман не скрывал эти последние, и воздух над ними был совершенно чистым и прозрачным, но внезапно, тут и там, появлялось то одно, то другое из этих облаков, так что я даже не мог заметить момент его формирования. На месте, от которого я только что отвел глаза и где еще две секунды тому назад ничего не было, я внезапно обнаруживал облако, уже разросшееся по крайней мере до двух или трех туазов** в диаметре. Разве не было бы естественным думать, что в воздухе, насыщенном упругим и прозрачным паром, над поверхностью, где образовывались такие облака, отсутствовало лишь одно определенное условие, необходимое для превращения этого пара в пузырьки, и что в момент, когда это условие возникало, такие пузырьки образовывались и формировали облако?» ([308], стр. 217.)

* Это, должно быть, одно из самых ранних наблюдений переохлаждения в облаках.

** 1 туаз=6 парижским футам (приблизительно 1,95 м).

Все мы видели такое явление, кто в горах, кто в голубом небе летнего утра. Оно поразительно и при незнании одного необходимого физического условия * приводит в сильное замешательство.

Делюк также стал приверженцем пузырьковой теории. Ведя некоторые гипсометрические наблюдения в октябре 1753 г., он обнаружил, что рассчитанная разность высот между двумя станциями не зависит от наличия или отсутствия облаков в пространстве, их разделяющем, и сделал отсюда вывод, что облака не влияют на барометрическое давление ([88], § 672). Позднее, возможно, после прочтения «Essais» Соссюра, он, помня об этой кажущейся невесомости, заключил, что облака должны состоять из пузырьков того же удельного веса, что и воздух ([90], § 607). Он отважился лишь на смутную, мало отличающуюся от высказанной Соссюром догадку о механизме образования таких пузырьков ([90], § 609). Он продолжал верить в пузырьки и в 1791 г. [94], укоряя знаменитого Гаспара Монжа за утверждение, что облака оказываются плавающими вследствие (1) малости частиц и (2) родства воды и воздуха. (Монж верил в теорию растворения при испарении, вызывающего прилипание атмосферы к каждой капле [245].**) Статья Монжа была действительно устарелой по тому времени, и осуждение Делюка было совершенно справедливым.

3. На сцене появляется вязкость

Теперь мы должны возвратиться приблизительно к 1745 г., когда Георг Вольфганг Крафт из Тюбингена написал пространную брошюру на эту тему [195],*** где он привел ряд доводов, объясняющих его неверие в пузырьки. Но его работа, которая осталась, по-видимому, совершенно неизвестной****, имела позитивную ценность: он предложил лучший механизм для объяснения взвешенности облаков. После обсуждения различных гипотез он продолжает:

«Одно соображение может быть рекомендовано сверх всех других: оно заключается в том, что крайне малая частица, даже если она тяжелее воздуха, способна плавать в нем длительное время, если она туда помещена. Парди***** не учитывал, что воздух, особенно на высотах, находится в непрерывном движении, причиной которого служит непрерывное воздействие солнца на различные его части. Он не обратил внимания не только на

* О нем пойдет речь в главе VIII.

** Монж применял описательную геометрию.

*** Экземпляр этой работы имеется в библиотеке Метеорологической службы ФРГ в Оффенбахе-на-Майне.

**** Я не слышал упоминаний о ней, за исключением ссылки в бесценной библиографии Гельмана [164], исключительно важной для каждого историка метеорологии.

***** См. выше, стр. 46, и [260].

бесконечную малость частиц, отрывааемых элементарным жаром от тел, но и на вязкость, всегда существующую в воздухе, даже в разреженном. Таким образом, каждый день, когда светит солнце, мы можем наблюдать крошечные, но еще видимые атомы, летающие туда и сюда в почти спокойном воздухе комнаты... и также поднимающиеся и остающиеся долгое время в воздухе, хотя все они тяжелее, чем сам воздух, что с избытком ясно из того факта, что они снова опускаются вниз. Точно так же испарения и пары остаются на длительное время в верхних слоях воздуха, как потому, что они состоят из почти бесконечно малых частиц, так и потому, что они поддерживаются постоянно движущимся воздухом» ([195], стр. 43).

Это вводит в задачу вязкость. Десятилетие спустя Франклин ввел ее снова, но по-своему (рис. 1):

«Если атмосфера покоится, то опускающаяся заряженная частица должна действовать на частицы, между которыми она перемещается или с которыми встречается, с силой, достаточной, чтобы преодолевать до некоторой степени их взаимное отталкивание и заставлять их сближаться. Тогда, предполагая, что частицы *А*, *Б*, *В*, *Г*, как и другие близкие к ним частицы, на-
ходятся друг от друга на расстоянии, обусловленном их взаимным отталкиванием (ограниченным их весом), то если *А* опустится до *Д*, то она должна пройти между *Б* и *В*. При про-
хождении между *Б* и *В* она будет находиться к ним ближе, чем до этого, и должна или толкнуть их на сближение с *Ж* и *З*, против их взаимного отталкивания, или пройти между ними с силой, превосходящей силу ее отталкивания от них. Затем она приблизится к *Г* и для того, чтобы устранить ее с дороги, должна воздействовать на нее с силой, достаточной для преодоления взаимного отталкивания этой частицы и двух ближайших ниже расположенных частиц, действием которого она удерживается в своем настоящем положении.

Следовательно, каждая частица воздуха будет нести на себе тяжесть, меньшую, чем сила этих отталкиваний. Таков механизм поддержания туманов, дымки, облаков» ([131], стр. 186).

Эта модель, конечно, ньютонианская, и возможно, что Франклин заимствовал ее у Деzagюлье. ** По-видимому, она не привлекла большого внимания, впрочем, может быть, Франклин и не ожидал общего согласия с ней, поскольку он озаглавил свою статью «Физические и метеорологические наблюдения, догадки и предположения».

* Эта статья была получена Королевским обществом 3 июня 1756 г. и затем забыта (Royal Society, Journal Book).

** См. [60], особенно главу VII.

4. Снова пузырьки

Я пренебрегу теперь строгой хронологией и кратко изложу последующее развитие теории пузырьков. Не пренебрегая какими-либо существенными вкладами в нее, мы можем с удивительной быстротой перескочить к 1845 г., в совершенно новую область — атмосферную оптику. В этом году Огюст Бравэ, профессор физики в Политехнической школе в Париже, высказал предположение, что «белая радуга», наблюдаемая иногда на облаках или туманах, расположенных против солнца, образуется пустотелыми каплями, и дал образец сложного геометрически-оптического анализа, чтобы подтвердить это [49]. Для Бравэ это было не только академическим упражнением, он твердо верил в эти пузырьки и считал свой анализ наилучшим из возможных доказательств их существования.

К сожалению для Бравэ, Джордж Эри, Королевский астроном *, в 1836 г. показал, что геометрически-оптический подход совершенно негоден для объяснения радуги, представляющей собой интерференционное явление.** В отношении пузырьков Бравэ получил исчерпывающий ответ от Ф. Райара в 1857 г., который, рассмотрев все имеющиеся теории и данные наблюдений, заключил, что радуга никак не подтверждает «поистине странную гипотезу пузырькового состояния» [282]. Как подробно доказал значительно позднее Перитер [268], белый цвет этой радуги — следствие малых размеров облачных капель. Де Тессан [333] показал также, что радуга на облаке видна редко потому, что если только облако не очень плотно и близко к наблюдателю, энергия, рассеиваемая малыми каплями, слишком незначительна для того, чтобы радуга стала видимой.

Не касаясь сейчас других работ Де Тессана, продолжим разговор об атмосферной оптике. Немецкий физик Р. И. Э. Клаузиус, известный своими работами по термодинамике, к сожалению, убедил самого себя в том, что атмосферная дымка состоит из пузырьков [57]. Он вернулся по меньшей мере на целое столетие назад, к Кратценштейну, рассматривая цвета в атмосфере как цвета тонких пленок, и сделал для этого ряд громоздких выкладок. Даже синий цвет неба он объяснял подобным способом. Он действительно был совершенно не в курсе дела, но его огромный авторитет продлил жизнь пузырьковой гипотезе еще на двадцать пять лет, особенно в Германии. Ее опровержение было дано в серьезных работах Кобера в 1871 г. [193] и Будде в 1873 г. [54], но в эту же эпоху Шмид в своем известном

* Титул Королевского астронома носил и носит директор Гринвичской обсерватории. (Прим. ред.)

** Это исследование было опубликовано в 1838 г. [4]. Об истории изучения радуги см. [46], а также [268].

учебнике [313], исходя из работ Клаузиуса, все еще считал, что пузырьковая природа облачных частиц доказана. Действительно, многие европейские учебники давали эту теорию совершенно некритически.* Известный химик Берцелиус также использовал свое огромное влияние для поддержки этой теории [36]. Практически, однако, приблизительно после 1840 г. уже осталось мало желающих доказывать, что пузырьки плавают потому, что они наполнены чем-то легче воздуха; под вопросом стояло и само существование пузырьков.

Попытку перенести эту проблему в область серьезной экспериментальной науки сделал Август Уэллер, который пробовал непосредственными наблюдениями проверить наличие пузырьков в туманах, повторяя наблюдения Соссюра [349]. Он не смог увидеть, как они ломаются при соприкосновении, как это утверждал Соссюр. В позднейшей статье [350] Уэллер начал с обсуждения наблюдений Кратценштейна над цветами в облаке под колоколом воздушного насоса и указал, что они созданы дифракцией, а не тонкими пленками. Затем он сообщил, как он улавливал капли на пленки из канадского бальзама, скипидара, касторового масла и т. п. и, наконец, на нити паутины. В каждом случае капли представляли собой сплошные водяные сферы, что было видно по отражению на них внешних предметов. Сходные наблюдения сделал сорок лет спустя на Брокене Р. Ассман, изобретатель психрометра, носящего его имя [22]. Теория пузырьков умирала с трудом, и в год, когда появилось сообщение Ассмана, Чарльз Риттер опубликовал длинную работу, где возражал против этой теории и защищал гипотезу, фактически взятую у Соссюра, согласно которой каждая капля увлекает за собой «свою собственную атмосферу» [299].

Наиболее удивительным обстоятельством, касающимся этой удивительной теории, является то, что ее энергично поддерживали или признавали многие первоклассные умы, такие, как Берцелиус, Бравэ и Клаузиус, Гей-Люссак, Пулье и Вольта. Столь же странно, что все эти ученые — как и бесчисленное множество менее значительных людей — допускали существование пузырьков при полном отсутствии теории их образования. Кроме смелого предположения о «кристаллизации», сделанного Соссюром**, я знаю только одну попытку, причем явно некомпетентную, придумать некий механизм [215]. Он заключался в том, что сначала «шарик» быстро конденсируется в виде еще полной сферы, но скрытая теплота конденсации приводит к новому испарению той части воды, которая меньше всего охлаж-

* Например, [247] и [277]. «Метеорология» Пулье, в отличие от его «Физики», в большей своей части представляется написанной по данным, полученным из вторых рук.

** См. выше, стр. 50.

дена окружающей средой, т. е. внутренности капли. Через две недели после первой работы автор, Ленгле, представил Французской Академии наук еще одну работу на ту же тему, которая была направлена комиссии в составе Бабине и Реньо ([215], стр. 1116) и, по-видимому, предана забвению.

С другой стороны, ряд ученых выступали с энергичными опровержениями возможности образования таких пузырьков каким бы то ни было путем. Де Тессан [333], например, рассчитал, что для образования пузырьков даже в крайне влажной атмосфере (насыщенной при 30°C) все молекулы воды в объеме, в 33 000 раз большем, чем возникающий пузырек, должны собраться в некое образование совершенно правильной формы. Даже если бы он образовался, то он не смог бы существовать, так как внутреннее давление, вызванное поверхностным натяжением, должно было бы заставить воздух проникнуть сквозь водную оболочку. Эффект поверхностного натяжения часто использовался при нападках на гипотезу пузырьков; я упомяну лишь Филиппа [270], Будде [54], Обермейера [256]* и Кёнига [194]**.

5. Медленное опускание

Вернемся снова к другим объяснениям взвешивания облаков, в разборе которых мы остановились на временах Крафта и Франклина. Освежающий ветерок здравого смысла внес в этот вопрос Джон Дальтон, известный своими работами по атомной теории в химии. Мы встретимся с ним также и в последующих главах. В его первой книге, опубликованной в 1793 г.***, мы читаем [67]:

«Когда происходит осаждение пара, множество исключительно малых капель образуют облако, дымку или туман; эти капли, хотя они и в 800 раз плотнее воздуха, сначала опускаются очень медленно из-за сопротивления воздуха, оказывающего тем большее воздействие, чем меньше капли...»

Отсюда ясно, что облака, состоящие из очень малых капель, могут опускаться очень медленно, что благоприятствует наблюдению их; когда капли при падении вступают в слой воздуха, способный поглощать пар, они могут быть рассеяны и облако вообще не опустится...»

В примечании Дальтон указывает, что эти идеи были высказаны ему Джоном Гофом**** из Кендала. Уже тогда было обнаружено существование уровня конденсации, хотя настоящий смысл этого понятия в то время был еще скрыт. Люк Говард

* К сожалению, он допустил большую ошибку в расчетах.

** Он указал на ошибку Обермейера.

*** За исключением одного приложения, второе издание 1834 г. является дословной перепечаткой с первого — как текста, так и примечаний.

**** Джон Гоф (John Gough) был талантливым слепцом, вероятно, лучше всего известным по упоминаниям о нем у Уордсворта и Колриджа.

использовал эту идею в своей знаменитой статье об облаках [176]. Чтобы объяснить, почему основание кучевых облаков плоское, он предположил, что пар поднимается и конденсируется в капли, эти же капли падают до некоторого уровня, где они снова испаряются в силу повышения окружающей температуры. К сожалению, Говард, который очень любил всевозможные догадки, также приписал более или менее сферическую форму кучевых облаков взаимному отталкиванию всех капелек, которые, как он говорил, назлектризованы, а различные формы перистых и перисто-кучевых облаков он приписал различной ориентации электрических полей в верхней атмосфере.

Понять то, что элементы облака находятся в постоянном падении, и признать всю важность этого движения — само по себе было большим шагом вперед, который первоначально, хотя и в виде предположения, сделал еще Кратценштейн [196]. Но как быстро они падают? Томас Янг, врач, физик и египтолог, человек исключительно разносторонний, дал ответ на этот вопрос [372]. Не привлекая на помощь теорию, он утверждал:

«Диаметр водяного шарика, падающего со скоростью только в один дюйм в секунду, должен составлять 1/1600-ую дюйма... но частички дымки несравненно крупнее этого, иначе они были бы совершенно невидимы как отдельные капельки. Наименьшей частицей, различимой невооруженным глазом, должна быть та, которая падает со скоростью около одного фута в секунду в совершенно спокойном воздухе».

Людей загипнотизировали эти упрощенные, слишком ясные расчеты, и многие пренебрегли предостережением Янга, заключавшимся в следующей фразе:

«Но весьма вероятно, что сопротивление, которое встречает движение столь малых частиц, может быть значительно больше, чем следует из расчетов, сделанных на основании опытов, в которых изучались частицы значительно большего масштаба, а их движение соответственно медленнее».

Так, например, Мунке, в 1825 г. или около этого времени, привел эти оценки Янга, но без его оговорки [140]. Лишь в 1856 г. Г. Г. Стокс предложил корректную теорию скорости падения таких малых тел, как облачные капельки [329], да и то лишь как частный случай исследования «влияния внутреннего трения в жидкости на движение маятников». Оказалось, что сфера, падающая со скоростью одного дюйма в секунду, должна иметь диаметр примерно в 600 раз больше, чем предполагал Янг. Я склонен думать, что высказывание Янга в значительной степени определялось устойчивостью теории пузырьков. Берцелиус, например, думал, что пузырьки могут даже иметь удельный вес, почти равный весу воздуха,

«но все еще остается тайной для физиков — каким образом они остаются в воздухе целыми днями; это не связано с нагреванием нижних слоев атмосферы или внешних частей самих облаков, как думали некоторые естествоиспытатели, поскольку облака остаются на том же месте и ночью» ([36], I, стр. 431).

Если бы Берцелиус знал, что даже облако капелек может опускаться на несколько сотен футов за целую ночь — совершенно независимо от возможного испарения капель на определенной высоте, — он судил бы иначе. И, конечно, здесь Берцелиус был до некоторой степени некомпетентен.

Однако его замечания заставляют нас рассмотреть тот эффект конвекции, который он отрицал. Открытие конвекции обычно приписывается Бенджамину Томпсону, графу Румфорду, который действительно первый проводил систематические эксперименты с конвекцией [302]. Но факт, что локально нагреваемые части атмосферы поднимаются, был описан еще Франклином в письме от 29 апреля 1749 г. Джону Митчелу, члену Королевского общества, опубликованном в 1751 г. * Франклин пишет ([130], стр. 36):

«...если какой-то отдельный участок Земли оказывается сильно нагретым (возможно, что солнце освещало его в течение нескольких дней, в то время как окружающая местность была заслонена облаками), то нижний воздух становится более разреженным и поднимается, а более холодный и плотный воздух сверху опускается; в таком воздухе собираются облака с разных сторон и объединяются над нагретым местом, и если одни из них наэлектризованы, а другие нет, то возникают молнии и гром, выпадают ливни. Следовательно, гром разражается после нагревания, а холодный воздух бывает после грозы с порывистым ветром; он приносится водой и облаками, приходящими из выше расположенных, а значит, и более холодных областей». **

Более ясно это явление было описано в 1785 г. математиком и физиком Иоганном Генрихом Ламбертом, знаменитым своей книгой о фотометрии и многими другими исследованиями [202]. Сначала Ламберт отмечает, что если считать Землю плоской, то одинаковое везде изменение температуры не могло бы изменить показания барометра, так как тепло не изменило бы вес воздуха. Но

«если изменение температуры не повсеместно, то ясно, что воздух будет расширяться только там, где произошло нагревание».

* Об этом письме см. [60]. Франклин называл своего корреспондента Митчелом.

** При отсутствии знаний о том, что поднимающийся воздух должен охлаждаться, это было подходящим предположением. Заметим, что всего лишь двумя годами позднее, в 1753 г., М. В. Ломоносов в «Слове о явлениях воздушных» не только описал явления восходящих и нисходящих конвективных течений, но и изобразил на рисунке их пространственную форму, очень близкую к нашим современным представлениям. (Прим. ред.)

так что равновесие в верхних слоях будет нарушено, пока накопившийся воздух не растечется в стороны.

Это нарушение равновесия причиняет циркуляцию воздуха, если нагревание происходит над достаточно обширным районом Земли. Поскольку воздух наверху перетекает из более теплой области в граничащие с ней более холодные, давление в последних * будет расти, а в результате будет нарушено равновесие и внизу. По этой причине нижний воздух будет течь к более нагретой области» ([202], стр. 101).

Эта статья была посвящена измерениям высоты с помощью барометра, и Ламберт, по-видимому, не интересовался применением этой плодотворной концепции к метеорологии. Если бы он проявил такой интерес, это могло бы значительно изменить историю метеорологии, ибо Ламберт пользовался всеобщим уважением. Так, или иначе его статья стала известной лишь немногим. **

По-видимому, с ней был знаком и Марселин Дюкарла-Бонифас, более известный как Дю Карла, около 1780 г. опубликовавший в Женеве большую работу под звучным названием «Естественная история Земли». Работа появилась частями, из которых седьмая была озаглавлена «Des météores locaux» ***. На стр. 37—38 этой части объяснено, что если подстилающая поверхность теплее воздуха, то возникает восходящее течение и в таких течениях формируются облака. Эта идея была знакома Соссюру [308], который читал Дю Карла и часто ссылался на «восходящий поток» и его образование в результате нагревания. Более подробно мы изложим его взгляды в главе V.

Но для того чтобы из этой идеи можно было извлечь максимальную пользу, сначала нужно было уяснить, что поднимающийся воздух обязательно охлаждается. Математическое доказательство этому дал Пуассон в 1823 г. [276]. Однако эта идея нескоро получила применение в метеорологии, и первым человеком, написавшим о некоторых следующих из нее выводах, был американец Джеймс Поллард Эспи. **** К 1850 г. Эспи понял, что можно избавиться от старого вопроса о взвешенности облаков следующим образом:

«Нет необходимости спрашивать, как это часто делается, какая сила поддерживает облака в воздухе, если только не доказать, что они находятся там во взвешенном состоянии, что, как я думаю, невероятно... У нас есть все основания думать, что облачные частицы начинают падать в воздухе... как только они отделяются от поднимающегося столба воздуха, с помощью которого было сформировано облако» [122].

* В подлиннике «former» — «первых» — очевидная описка. (Прим. ред.)

** Это рассуждение Ламберт повторил в своей «Пирометрии» [203].

*** Книга исключительно редкая, и я не нашел ее экземпляров в Британском музее и в Британской национальной библиотеке, хотя один ее экземпляр имеется в Женеве.

**** См. главу VIII.

ГЛАВА IV

КОЛЕБАНИЯ БАРОМЕТРА

Он мог всего лишь наблюдать очевидную связь между чередованием показаний ртутного барометра и течением ветров и погоды; но не мог найти какие-либо определенные правила для предвидения, скорее наоборот, — события столь же часто как согласовались, так и не соответствовали ожидаемым.

Роджер Норт
*«Жизнеописание почтенного
Френсиса Норта, барона
Гилфорда (и т. д.)»*

1. Головоломка

В феврале 1645 г., менее чем через год после того, как впервые был описан «Торричеллиев опыт», кардинал Джованни Карло де Медичи распорядился установить в Риме несколько торричеллиевых трубок и держать их под наблюдением некоторое время. Было обнаружено, что изменения высоты ртутного столбика не связаны с наблюдаемыми изменениями температуры и влажности, поэтому был сделан вывод, что «высота уровня ртути не меняется при изменении воздуха вокруг нее, а лишь при изменении воздуха в обширной области» [227]. *

С этого начались длительные попытки найти научную основу для предсказания погоды и поиски разумного объяснения неправильных колебаний барометра.

Самые ранние наблюдения за ртутными барометрами породили одну из наиболее увлекательных и сбивающих с толку загадок, которые имеются в ящике Природы. Ибо сразу было

* Более подробно см. [241].

обнаружено, что ртуть обычно стоит на самом высоком уровне при хорошей погоде и на самом низком в дождливые дни, когда воздух больше всего наполнен «парами и испарениями» и, следовательно, наиболее «тяжел».

Понятно, что это было огромной неожиданностью и даже разочарованием: природа вела нечестную игру. В 1654 г. или около этого времени Пьер Гассенди, философ, снова познакомивший Запад с учением Эпикура, писал следующее:

«... когда небо ясное и дуют северные ветры, ртуть в трубке всегда будет стоять выше, чем при пасмурном небе и ветре, дующем с юга. Но когда небо чище, вес воздуха *должен* * быть немного меньше, чем когда оно мутное, и, следовательно, воздух будет меньше давить на стоячую ртуть (т. е. находящуюся в резервуаре барометра), а в результате уровень ртути должен подниматься не столь высоко и оставаться в трубке таковым» [135].

Отчаянные обстоятельства требуют отчаянных средств; Гассенди предлагает такое:

«Причина этому заключается, по-видимому, в том, что при хорошей погоде, так же как и при холодной, от земли не исходят те пары, которые возникают при более жаркой и облачной погоде».

Далее он переходит к объяснению того, что некоторые корпускулы, из которых состоят эти пары, давят вверх, а не вниз.

«Корпускулы облаков относятся именно к таким: и действительно, вы не увидели бы их взвешенными, если бы не существовало силы, уносящей их вверх и поддерживающей их, точно так же, как пух возносится вверх и летает в воздухе» [135].

Предположительно, корпускулы, стремящиеся вверх, несут на себе часть веса воздуха. Эта идея была, по-видимому, снова выдвинута в 1696 г. Николаем Хартсёкером [161]. Возможно, что Бойль читал Гассенди, когда делал свой двадцать девятый эксперимент с воздушным насосом с целью посмотреть, ответственна ли «положительная легкость» — аристотелевский термин — за поднятие паров. Он открывал сосуд, наполненный «дымящейся жидкостью» под колоколом своего воздушного насоса, откуда был выкачан воздух, и видел, что дым сбегает вниз по стенкам сосуда ([47], стр. 217).

Таким образом, следовало найти что-нибудь получше. Различные выдвигавшиеся тогда теории можно классифицировать, но мы будем рассматривать первую половину столетия после изобретения барометра примерно в хронологическом порядке.

* Курсив автора.

2. Первые пятьдесят лет

Как только барометр стал доступным — что произошло задолго до того, как он получил свое имя *, — стало ясно, что это неплохая мысль — вести одновременные наблюдения в различных местах, «синоптические наблюдения», как мы их теперь называем. В письме от 13 декабря 1647 г. Декарт пытался наладить такие наблюдения одновременно с Мерсенном ([241], стр. 46), а через десять лет Фердинанд II, великий герцог Тосканский и основатель «Accademia del Cimento» («Академии Опыта»), начал организацию сети из десяти станций ([241], стр. 61). В Англии Джон Бил попытался устраивать станции в 60-х годах XVII в. [257]. Вот что мы знаем об этом энтузиасте:

«Упомянутый доктор настолько доволен открытиями, уже сделанными с помощью этого прибора, что он считает его одним из наиболее чудесных из всех существовавших на свете, говорим ли мы о его удивительности — почти чуде — или о его философском значении, независимо от интересов прибыли. Ибо, говорит он в одном из своих писем, кто мог бы даже ожидать, что мы, люди, сможем найти способ взвесить весь воздух, нависший над нашими головами, во всех его изменениях, и, так сказать, взвесить и различить по весу ветер и облака? И кто поверил бы, что с осязаемой очевидностью мы сможем доказать, что самый безоблачный воздух — самый тяжелый и самый плотный, а когда темнейшие облака нависают ниже всего над нами, готовые рассеяться или опуститься, то воздух оказывается самым легким...» ([251], стр. 155.)

Бил, по-видимому, не рискнул строить догадки о причине этого, но профессор геометрии в Оксфорде Джон Валлис не был столь осторожен, хотя знал не больше [352]; он обнаружил, что ртуть поднимается при «пасмурной туманной погоде», и приписал это «тяжести паров в воздухе» ** ([352], стр. 170). Ртуть поднималась также и в солнечную погоду — частично, как он думал, потому, что солнце заставляло пары подниматься, а частично из-за того, что тепло увеличивает упругость воздуха. Но

«в дождливую погоду она обычно падает (причина тому, очевидно, в уменьшении веса воздуха, тем больше, чем больше падение)... При ветреной погоде я обычно обнаруживал падение, и это было чаще и легче обнаруживаемо, чем при дожде (что я приписываю тому, что ветры перемещают воздух вбок и, следовательно, не заставляют его давить столь непосредственно вниз — аналогии этому мы видим в плавании и т. п.). И я никогда не видел ртути стоящей ниже, чем при сильных ветрах» ([352], стр. 170).

* В 1663 г., с легкой руки Бойля (см. [241]).

** Во внутриконтинентальных районах радиационные туманы характерны для антициклонической погоды.

Здесь мы имеем четыре следа из тех, что сбивали с толку ученых детективов на протяжении более чем столетия: тяжелые пары; идея о том, что «упругость» воздуха может не зависеть от давления, определяемого его весом; эффект выпадения дождя и предполагаемый эффект ветра. Немногие из позднейших авторов были столь эклектичны, как Валлис.

Джованни Альфонсо Борелли, один из наиболее активных членов Академии Опыта, ухитрился в различное время заимствовать две из этих идей в дополнение к своей собственной. Борелли был, пожалуй, первым активным метеорологом, так как он проводил систематические наблюдения за термометром, барометром, ветром и погодой, делая это по приказанию своего патрона — великого герцога Фердинанда II, которого он описывает как «очень проницательного исследователя действий Природы» [45]* — оценка, которую потомки подтвердили.

Оригинальная идея, принадлежавшая, видимо, Борелли, заключалась, вероятно, в том, что частицы влаги в облаках как-то опираются одна на другую и выдерживают часть веса расположенного выше воздуха. О существовании этой идеи свидетельствует письмо, датированное 15 декабря 1657 г., от принца Леопольда, умного и расположенного к науке брата Фердинанда II, содержащее возражения против этой идеи.** Относящееся сюда суждение, имеющееся в этом письме, может быть переведено следующим образом:

«Я все еще сомневаюсь, могут ли эти мельчайшие частицы влаги, содержащиеся в облаках и понемногу опускающиеся — в виде ли дождя или тумана или в какой-либо другой форме — и падающие вниз, на землю, — могут ли они вызывать тот же эффект, что и твердое тело, нижние, касающиеся земли части которого поддерживают верхние части, как если бы облака были, например, подобны щетке».

Это представление кажется более примитивным, чем содержащееся в переписке между принцем Леопольдом и Борелли, относящейся к марту 1660 г. Я смог найти только ту ее часть, которая написана Борелли, но, как мы увидим, представить себе, как воспринял принц эту идею, совершенно не представляет трудности.

5 марта 1660 г. Борелли сообщал принцу из Пизы, что ртуть в трубке Торричелли стояла в это утро исключительно высоко, значительно выше, чем он когда-либо наблюдал за три года, — на целых «20 делений» выше. Из второго письма выясняется,

* Идея создания сети метеорологических станций принадлежала, вероятно, Вивiani (см. [127], письмо Борелли к Вивiani от 11 января 1658 г.).

** Это письмо имеется в [127]. Gal. fol. 2—3. Последняя цифра года сомнительна, но, вероятно, это 7.

что обычная высота столбика барометра составляет около 460 таких делений, так что действительно давление было очень высоким. Этот каприз природы (*stranaganza*), говорит Борелли,

«показывает, что воздух, расположенный выше уровня Пизы, обладает чрезмерным и несравненно большим весом, чем это наблюдалось в других случаях, и причиной этому является смешение его с другими материями — парообразными, жидкими или земляными. Мы увидим, последует ли за таким неожиданным явлением выпадение какого-либо исключительно обильного дождя. Или, если эта материя не является жидкой и не будет развеяна ветром, мы увидим, быть может, нечто сходное с тем, что обычно предшествует кометам *. Я очень хорошо знаю, Ваше высочество, что тысяча случайностей может вмешаться и нарушить тот процесс, относительно которого я строю догадки, так что если упомянутый эффект не случится, это еще не должно опровергнуть предполагаемую мной причину, а именно, что в различные моменты времени воздух может становиться более или менее тяжелым, в соответствии с содержанием в нем поднятых с земли частиц. Это настолько надежно проверено и установлено, что нет необходимости в подтверждении этого исходом сделанного выше предположения, которое я счел возможным сообщить Вам, Ваше высочество, чтобы дать Вам возможность пофилософствовать на эту тему» ([127], л. 10—11).

Принц и великий герцог, очевидно, имели свои собственные соображения по этому вопросу, и Леопольд сообщил их Борелли почти сразу же в письме, которое я не смог найти. К счастью превосходная мысль, высказанная Леопольдом в этом потерянном письме, ясно излагается в следующем письме Борелли, написанном из Пизы 16 марта 1660 г. и начинающемся словами:

«Чтобы исполнить повеление светлейшего Великого герцога и Вашего высочества, я отвечаю на вопрос Вашего высочества. С обычной для Вас остротой и проницательностью Вы указываете, что устойчивый сильный ветер может привести к накоплению большого количества воздуха выше уровня Пизы и ее окрестностей, что вес воздуха может легко возрасти таким путем, в результате чего ртуть в трубке вынуждена будет подниматься, но что совершенно не обязательно, чтобы сделанный мною прогноз оказался правильным, т. е. предсказание обильного дождя или чего-либо, что появляется перед кометой» ([127], л. 12).

Борелли, вероятно, был первым прогнозистом из тех, что составляли плохие прогнозы на научной основе. Он напоминает затем, что в предыдущем письме сделал оговорку, ссылаясь на «тысячу случайностей», которые могут нарушить предполагаемый им процесс, и что эти его слова носили «достаточно общий характер для того, чтобы включать и случай, рассмотренный Вашим высочеством». В этом пункте он собирается с духом и продолжает:

* В 1660 г. истинная роль комет в хозяйстве природы была достаточно неясна, чтобы оправдать такое утверждение.

«Однако для того, чтобы не показаться говорившим с такой осторожностью и искусностью, чтобы обеспечить себе выход при любых обстоятельствах, я обязан распространиться несколько дальше по этому поводу и пояснить причины, по которым я сомневаюсь в способности ветра вызвать такой эффект» ([127], л. 12 обор.).

«Несколько дальше» простирается на пять страниц, и я не буду их здесь воспроизводить. Его сомнения количественные, что делает ему честь. Он не мог поверить, что воздух может накопиться в количестве, составляющем одну двадцатую от обычной величины, особенно если учитывать, что наверху воздух является менее плотным. Не мог он также поверить, что такое накапливание может длиться несколько дней, поскольку, как он указывает, волна в воде не может сохраняться на одном и том же месте ни на один момент. Таким образом, он вынужден вернуться к своим идеям о тяжелых парах и испарениях.

Леопольд и Фердинанд далеко опередили свое время. То, что они смогли сделать столь правильное предположение, может только увеличить наше и без того большое уважение к научной проницательности этих тосканских дворян. Даже если внести большую поправку на придворную лесть, остается ясным, что они вполне могли отстаивать свою позицию в беседах с умнейшими представителями «естественной философии».

Десять лет спустя Борелли напал на другую идею, весьма сходную с одним из объяснений Виллиса. Он решил, что доказал, будто в Пизе перед длительным непрерывным дождем барометр обычно стоит высоко, а во время дождя он падает, иногда даже более чем на дюйм. Для того чтобы объяснить это падение, он провел, а возможно, лишь вообразил, эксперимент, в котором барометр помещается вместе с резервуаром на дно высокого сосуда с маслом. Затем по поверхности масла пускают плавать меньший сосуд, наполовину наполненный песком, и уровень ртути повышается, поскольку поднимается уровень масла. После этого песок высыпается таким образом, что он опускается сквозь масло. До тех пор пока песок не достигнет дна сосуда, уровень барометра не меняется, и лишь после этого он падает. Он перенес этот результат на атмосферу и говорил, что барометр начинает падать после того, как дождь достигнет поверхности земли ([45], стр. 241). Однако он признает, что существуют и другие причины колебаний барометра и что, в частности, нельзя полагать, что дождь ожидается потому, что барометр стоит высоко.

Естественно, что проблема изменений барометра привлекала в эти годы большое внимание Королевского общества. Обсуждение этой проблемы особенно оживилось в январе 1677 (1678) г. *

* В ту эпоху в Англии год начинался с марта, и поэтому, например, февраль 1679 г., на нашем летосчислении, считался там февралем 1678 г. (Прим. ред.)

и затем годом позднее, в феврале 1678 (1679). На заседании 3 января 1677 (1678) г. Роберт Гук снова высказал предположение, что высокое давление должно означать, что к воздуху добавлены «испарения», и поэтому

«таким путем он объяснял явление большого удельного веса воздуха при долговременно дующем ветре восточных направлений и его легкость при длительном южном ветре; ведь в первом случае воздух проходит над обширным пространством суши, поднимая и впитывая большие количества испарений, которые, в силу их сродства, остаются смешанными с ним и взвешенными в нем, а в другом случае ветер проходит над большой площадью моря, так что воздух должен состоять из меньшего числа составных частей» [40]. *

Почему земные испарения должны быть более «сродственными», чем морские, понять трудно, но, во всяком случае, Гук заметил очень частое совпадение «восточной» погоды с высоким давлением на юго-востоке Англии. Зимой это нередко выражается в пасмурной погоде, что может подкрепить это объяснение.

На заседании 13 февраля 1678 (1679) г. было указано, что одно лишь расширение или сжатие всего столба воздуха под действием тепла или холода не должно менять давления, и потому было предположено, что более высокое давление может быть вызвано только добавлением воздуха вверху атмосферы или чего-либо такого у земли, что изменило бы удельный вес составных частей воздуха. Эта дискуссия, очевидно, произвела большое впечатление на Томаса Хеншоу, вице-президента Общества, который с энтузиазмом — и с оптимизмом — предположил, что:

«... должно быть вкратце записано существо этой дискуссии; и вся теория должна быть полностью объяснена как можно скорее, поскольку барометр стал всеобщепотребительным инструментом и причины его поведения и суждения о нем стали предметом частых дебатов среди ученых» [40]. **

20 февраля Гук снова указал на важность добавления или уноса чего-либо: этим «чем-либо» могли быть пары легче или тяжелее воздуха. Наконец 27-го состоялось обсуждение вопроса: «могут ли поднимающиеся пары или падающий сквозь воздух дождь изменять давление расположенного под ними воздуха своим весом» ([40], стр. 466). Это заставляет предполагать, что кто-то прочитал книгу Борелли, которая была и имеется и сейчас в библиотеке Общества. ***

* В [175] Гук уже связывал между собой высокое давление, восточные ветры и «земные частицы».

** Томас Хеншоу был одним из членов-основателей Общества, но разбирался лучше в законах, чем в науке.

*** На шмуцтитule экземпляра, имеющегося в библиотеке Королевского общества, написано: „Liber exhibitus Regia [sic] Societati nomine Authoris d. 15 junij 1671”.

Следующая работа подчеркивала изменения удельного веса воздуха как первичную причину колебаний высоты ртутного столба. Это была работа Джорджа Гардена, доктора из Эбердина, демонстрирующая, несмотря на шаткость ее основ, его выдающуюся изобретательность и большую способность к наблюдениям [133]. Гарден предполагал, что удельный вес воздуха больше, чем паров, когда барометр выше, и меньше — когда барометр стоит низко. Следовательно, по законам гидростатики, пары должны подниматься меньше при низком стоянии барометра, и Гарден отмечает, что при высоком давлении и ясном небе удаленные холмы обычно невидимы, но при низком давлении они видны ясно. Тот факт, что дождь и снег «обычно выпадают, лишь когда ртуть немного опускается», подтвердил его догадку, что изменения удельного веса воздуха являются определяющим фактором.

Эта идея оказалась настолько жизнеспособной, что спустя полстолетия ее повторил Мушенбрук [249]. Хотя это и не имеет прямого отношения к нашей дискуссии, все же интересно отметить, что Гарден объяснял также и ветры, основываясь на гидростатическом равновесии:

«Вес воздуха не меняется единообразно и одновременно во всей атмосфере, но... ртуть может, например, опуститься в бароскопе и соответственно воздух станет легче в Лондоне, в то время как в Париже или в Эдинбурге этого не наблюдается» ([249], стр. 996).

Это появилось всего лишь за год до знаменитой статьи Эдмонда Галлея о пассатах ([155], стр. 153). Гарден добавлял, что он не мог объяснить изменения удельного веса атмосферы, и выдвинул некоторые догадки, включая понятие о более тонкой жидкости «со значительно бóльшим давлением, чем воздух... в которой воздух как бы плавает» [133].* Несомненно, холод и тепло влияют на вес воздуха; он наблюдал повышение ртути при северных ветрах и падение — при южных. Мне представляется, что Гарден уже очень близко, хотя и не вполне, подошел к пониманию крупномасштабной адвекции. За его статьей на страницах «*Philosophical Transactions*» следовала беспорядочная дискуссионная статья, вероятно, по желанию издателя написанная Джоном Валлисом, забывшим свой прежний энтузиазм. Хотя он и возражал — достаточно логично — против «неуловимой материи», но в конце концов поставил вопрос, не зависят ли наблюдаемые изменения давления от нагревания или охлаждения воздуха и воды, содержащихся в ртути!

Кроме статьи о пассатных ветрах, Галлей в 1686 г. опубликовал другую статью, в основном посвященную выводу формул для

* О возможном источнике этого представления см. [241].

барометрической гипсометрии, но содержащую также рассуждения о связи между барометром и погодой ([155], стр. 104). В этой статье Галлей принимает теорию о гидростатическом равновесии между воздухом и парами, но с дополнением, объясняющим, почему давление часто бывает низким в тихую погоду *перед* дождем:

«...поскольку воздух легок, то он уже больше не поддерживает пары, которые становятся по удельному весу тяжелее, чем среда, в которой они плавают, так что они опускаются к земле, а, встречаясь при своем падении с другими водными частицами, они объединяются и образуют небольшие капли дождя» ([155], стр. 111).

Как широко можно раскинуть сеть в попытке выловить ускользающее объяснение, видно из следующего отрывка, относящегося к 1690 г.:

«Вечером 28 ноября г-н де Лагир обнаружил, что ртуть в барометре, стоявшая на 28 дюймах, за очень короткое время опустилась до 26 дюймов 10 линий. Ветер в это время был исключительно сильным. Г-н Вариньон сказал, что это могло случиться из-за ветра, сломавшего параллельные столбы воздуха» [170] *.

Интересно было бы узнать, что Пьер Вариньон, довольно выдающийся математик, подразумевал под «*colonnes collaterales*»; возможно, некоторое указание дает тот факт, что Валлис использовал слово «*collaterales*» в приведенном выше отрывке ([352], стр. 170). Несмотря на «закон Паскаля» и на опыты Бойля, люди не могли отказаться от представления о конкретном столбе воздуха, давящем на ртуть в резервуаре барометра.

Проблема была действительно настолько неподатлива, что некоторые авторы, как, например, Бернардино Рамадзини из Модены, потеряли уверенность в том, что ртуть действительно поддерживается весом атмосферы. Он считал, что трудно объяснить, как это воздух может быть легче, когда близится дождь или даже когда он идет, и тяжелее, когда погода прояснилась; это все равно как утверждать, что женщина тяжелее после рождения своего ребенка, чем тогда, когда она беременна [283].

Рамадзини прибег к помощи теории о том, что в воздухе содержатся «земляные, солевые и селитряные» испарения, которые, становясь тяжелее при приближении дождя — возможно, в результате абсорбирования влаги, — падают на землю, в результате чего атмосфера становится легче. По возвращении хорошей погоды эти частицы высушиваются и снова возвращаются в воздух, особенно при северном ветре.

Селитряные испарения Рамадзини — это, вероятно, «нитровоздушные соли» Джона Мейо, физиолога из Оксфорда [235].

* «...pouvait venir de ce que le vent rompt les colonnes collaterales de l'air».

Мейо утверждал, что воздух полон такими солями, которые необходимы для горения и дыхания и фактически выполняют те функции, что, как оказалось, присущи кислороду, выделенному на столетие позднее. У них также много и других функций, из которых мы, за ограниченностью места, упомянем только одну: Мейо считал, что упругость воздуха возникает благодаря нитро-воздушным солям. Ибо когда свеча сгорает в бутылке, которая опущена горлышком в сосуд с водой, извлекающей соли из воздуха, вода в бутылке поднимается.

Герлак показал [151], что возникновение этой теории относится еще по крайней мере к 1604 г.; в другой статье [152]* он допускает как весьма вероятный факт, что в основе ее лежит изобретение ружейного пороха, факт тем более неоспоримый, что взрыв пороха выглядит и звучит очень сходно с молнией и громом. Химическое объяснение этих «огненных метеоров» держалось долгое время, фактически до середины 18-го столетия. Никакой другой пример не покажет лучше, насколько серьезно воспринималась эта теория, чем следующая выдержка из статьи**, представленной Исааком Ньютоном в Королевское общество 9 декабря 1675 г.:

«...так, гравитационное притяжение Земли может быть вызвано непрерывной конденсацией чего-то, подобного эфиру, однако не основной массы флегматичного эфира, но чего-то очень тонкого и неуловимо диффундирующего сквозь него, имеющего, возможно, маслянистую или смолистую, вязкую и упругую природу, в основном так же относящегося к эфиру, как жизненный газообразный дух, требующийся для сохранения пламени и жизненных процессов, относится к воздуху».

Но вернемся к книге Рамадзини. Он цитирует письмо Дж. Б. Боккадабати, «главного инженера» герцога Моденского, который думал, что воздух легче при дожде потому, что тогда тепло превращает воду в пары, которые, будучи перемешиваемы, требуют больше пространства и создают, таким образом, смесь (congettum) воздуха и пара, более легкую, чем один воздух. Здесь, конечно, и находится один из ключей к загадке, но он представился таким неправдоподобным, что Рамадзини не обратил на него внимания, так же как и на другую теорию, предложенную Франческо Торти, тоже профессором из Модены, предполагавшую, что, когда пары начинают конденсироваться и выпадают, то они по весу уже больше не являются составной частью воздуха. Рамадзини предпочитал свою собственную теорию о селитряных испарениях.

Это привело его к спору, не всегда вежливому и, боюсь, с нашей точки зрения, довольно глупому, с Гюнтером Кристофом

* Позднее Дебю [84] показал, что эта идея идет еще от Парацельса.

** Ньютон «Гипотеза, объясняющая свойства света, рассмотренные в нескольких моих статьях» — см. ([40], III, стр. 250).

Шеллхаммером, главным врачом герцога Готторпского в Шлезвиг-Гольштейне. Он велся через Луку Шрёка, президента «Academia Natural Curiosorum», и был позднее опубликован [310]. Нет необходимости подробно останавливаться здесь на деталях; ограничусь лишь упоминанием двух теорий Шеллхаммера, по-видимому, независимых и несомненно относящихся к числу научных курьезов. Первой была удивительная идея, что ртуть в резервуаре барометра будет всплывать выше в более плотном (т. е. влажном и облачном) воздухе, чем в сухом, так что ртуть в трубке должна будет опускаться. К этой идее привело неправильное понимание того, что происходит при погружении резервуара барометра в воду. В другой своей теории — поистине пародии на гидростатику — он приходит к выводу, что дождь или облако поддерживают вес расположенной над ними части атмосферы или по крайней мере часть этого веса, так что при появлении этих гидрометеоров барометр понижается.

Рамадзини, бывший более хорошим ученым и значительно лучшим писателем, чем Шеллхаммер, быстро расправился с этими доводами, но отпор, полученный им от Шеллхаммера, еще более бессвязный, чем само изложение его идей, показывает, что последний по-прежнему считал себя правым.

Значительно позднее, много спустя после того, как он переселился в Падую, Рамадзини отказался от теории «нитросолей» в пользу идеи, предложенной Лейбницем, которая будет рассмотрена ниже. Это оживило дискуссию с Шеллхаммером, и великий Лейбниц вынужден был показать герцогскому врачу ошибку в его рассуждениях [285] *, [310] **, [211].

Остающаяся часть этой главы станет яснее, если классифицировать объяснения колебаний барометра. Я разберу их в следующем порядке: предполагаемая невесомость падающих капель, влияние ветра, объяснения, связанные с адвекцией, и, наконец, различные иные теории.

3. Невесомость дождевых капель

В 1670 г. Борелли доказал логическим путем, что жидкость в свободном падении невесома [45], и, кроме того, привел описание опыта ***, который выглядел бы поверхностным, если бы он был предназначен для иллюстрации этой теории, но это не так, ибо песок, падающий в масле, очевидно, не находится в состоянии свободного падения. Мы отмечали также, что вопрос о невесомости падающих капель рассматривался Королевским обществом в 1678 (1679) г. и что этим эффектом снова занимался Торти около 1695 г.

* Статья датирована 1 июня 1710 г., Падую.

** В это же время опубликовал свои возражения и Рамадзини [284].

*** См. выше, стр. 64.

Представляется вероятным, что около 1700 г. Рамадзини, воодушевленный, возможно, своим коллегой Торти, написал об этой проблеме Лейбницу. Во всяком случае последний в письме к Рамадзини из Ганновера описал эксперимент, решавший вопрос.* Эксперимент заключается в следующем: пусть высокий сосуд с водой будет укреплен на коромысле весов, причем на поверхности воды пусть плавает какое-либо полое тяжелое тело. Приведем весы в равновесие. Если теперь открыть отверстие в полном теле, то оно заполнится водой и опустится на дно. В процессе его опускания, говорит Лейбниц, равновесие будет нарушено, поскольку при этом вода не поддерживает тело, так что весы его не будут чувствовать. Теперь сравним сосуд с водой с атмосферой, опускающееся тело — с дождевыми каплями, а ртуть в барометре — с грузом на противоположном конце коромысла. В хорошую погоду «капли воды настолько мелки и распылены в воздухе, что они могут опускаться не больше, чем частицы жира в молоке до сепарации» ([285], стр. 95). Ртуть может начать опускаться несколько ранее того времени, когда дождь достигнет земли, так как капли начинают образовываться еще до того, как они достигают нас.

После переезда в Падую, продолжает Рамадзини, у него было много других дел, и он не думал об этой задаче до последнего времени. По-видимому, он полностью отказался от теории селитряных солей. В рождественские праздники он и Джованни Грациано произвели опыт, предложенный Лейбницем, с очень хорошими весами, изменив его только в том, что тяжелое тело в воде было прикреплено очень тонкой ниткой к коромыслу весов, а затем эта нитка разрезалась. Эксперимент, повторенный много раз, всегда проходил успешно. Он ясно понимает, что это не объясняет, почему барометр падает иногда и без дождя, но тем не менее он уверен, что Шеллхаммер будет так же обрадован, как и он, тем, что решение их общей задачи начинает выясняться.

Но Шеллхаммер был далек от радости и отказался поверить, что тяжелое тело, взвешенное в воде, находится в том же состоянии, что и капли дождя; и он был обеспокоен — и с достаточными основаниями — тем, что барометр предупреждает о дожде весьма задолго, за один или даже несколько дней. Он замечает также, что способ, которым Рамадзини осуществлял эксперимент, отличается от предложенного Лейбницем.

В своем заключительном выступлении в дискуссии Лейбниц постарался показать Шеллхаммеру, что (1) оба способа проведения эксперимента эквивалентны, что (2) тяжелые тела давят

* [285]. Это письмо и эксперимент были обнародованы, по-видимому, только тогда, когда Рамадзини написал в 1710 г. в Академию, но я не уверен, что описание эксперимента не было сделано ранее.

на воду так же, как и плавающие в воздухе пары — на воздух, что (3) нужно некоторое время для того, чтобы капли опустились вниз и что они могут быть задержаны или рассеяны наверху ветром или чем-либо иным и что (4) это рассеяние может даже полностью предотвратить дождь. Он допускал, что показания барометра могут меняться по другим причинам, как, например, из-за сильных бурь, но считал свое объяснение главным.

Это приостановило на некоторое время дискуссию, тем более что через год-два оба противника скончались, но эксперимент Лейбница продолжал вызывать больше жара, чем света.

Нет никаких сомнений в том, что эксперименту, в варианте ли Рамадзини или в форме, предложенной Лейбницем, был обеспечен успех, хотя в действительности они теоретически неэквивалентны и на самом деле опыт Рамадзини не имеет даже отдаленного сходства с тем, что происходит в атмосфере. Ошибочность приложения обоих экспериментов к атмосфере лучше всего видна, если учесть, что капли воды любого размера — от самых крошечных облачных капель до самых больших капель дождя — всегда падают в воздухе с предельной для них скоростью. Таковой является скорость, при которой сопротивление воздуха падению капли становится равным весу капли минус вес объема воздуха, который она замещает. По третьему закону Ньютона, это сопротивление будет проявляться как направленная вниз сила у основания атмосферы. Но коагуляция более мелких капель в более крупные несколько не изменит эту силу, т. е. барометрическое давление, даже несмотря на то, что более крупные капли будут падать быстрее, чем маленькие облачные частицы. Как мы видели в главе III, явление кажущейся взвешенности облаков не было понято до самого 19-го столетия.

Таким образом, предположение Лейбница не имело никакого обоснования. К сожалению, Фонтенель возвестил о нем в своей ежегодной «Истории» Парижской академии за 1711 г. так, как если бы это был глас божий [128]. Во-первых, по-видимому, никто не посмел не согласиться с его теоретическим обоснованием, хотя количественная сторона эффекта была немедленно поставлена под вопрос неким Джакопо Плачентини [273]* из университета самого Рамадзини. Плачентини отметил, что измерения осадков (во Франции) указывают, что за весь год выпадает лишь от 17 до 20 дюймов дождя, в то время как ртуть может внезапно понизиться на дюйм, а дюйм ртути весит столько же, сколько 13 1/2 дюймов воды. Д'Орту де Меран, хотя в принципе и был согласен с Лейбницем, также считал, что эффект должен быть малым [229].

* Эта информация взята из „Acta Eruditorum” (1711 г.), где на стр. 495—499 помещено резюме.

Первым, кто полностью отверг это рассуждение, был, по-видимому, Деагюлье, написавший по этому поводу в 1717 г. статью [100], где аккуратно доказывалось, что, как только падающее тело достигнет своей предельной скорости, равновесие восстановится. Это должно было решить вопрос, и так бы оно и было, если бы не колоссальный авторитет Лейбница; мы встречаемся еще в 1749 г. с возражениями Холльмана против этой идеи, поскольку, как он говорит, эксперимент был неестественным, а также потому, что между падением давления и дождем часто проходит длительное время [173]. И в 1772 г. Делюк снова счел необходимым раз и навсегда опровергнуть эту гипотезу в очень обширной статье, в которой на деле эффективными оказались лишь один или два параграфа, и то ни один не является вполне ясным [188], § 166—192). Неудивительно, что Николаус фон Бегелин, метеоролог Берлинской академии, отказался опровергнуть теорию Лейбница [31], к которому Академия, кроме всего прочего, питала законное уважение; сомнительно, чтобы он понял доказательства Делюка.

4. Воздействие ветра на барометр

Как мы видели, в 1690 г. Парижская академия обсуждала возможность воздействия сильных ветров на барометр. После этого появился ряд других гипотез, весьма различающихся между собой, и было бы уместным классифицировать их. На первом месте была идея Вариньона, по которой сильный ветер каким-то образом препятствует полному давлению воздуха на ртуть в резервуаре барометра. Далее следовало представление, что быстрое горизонтальное движение уменьшает вес движущегося тела. Также широко было распространено мнение, что ветры противоположных направлений, сходящиеся к какому-либо месту или расходящиеся от него, могут сталкиваться и делать воздух более плотным или, наоборот, оставлять небольшой вакуум между ними. Наконец, ветры могут иметь вертикальную восходящую или нисходящую составляющие.

Здесь, может быть, следовало бы дать специальное примечание для читателей, хорошо знакомых с соотношением между ветром и барометрическим давлением, известным всем, кто пользуется картами погоды. Это соотношение известно с середины XIX в., и мы не будем на нем останавливаться. В этом разделе мы имеем дело только с предполагаемым физическим влиянием движения воздуха на показания барометра.

В начале рассматриваемого нами периода Лейбниц писал из Ганновера 26 февраля 1700 г. по-французски, очевидно, кому-то из Парижской академии, подчеркивая влияние ветра на колебания давления: «Воздух... поддерживается сильными ветрами, и

особенно — ветром, направленным от земли при ее движении и стремящимся, в определенном смысле, вверх» ([212], II, ч. 2, стр. 80). Необходимо избегать путаницы между восходящими потоками, т. е. конвекцией, еще не известной в то время, и направленной вверх компонентой сильных ветров, постулированной Лейбницем.

Люди находились под впечатлением того факта, что в Западной Европе давление воздуха обычно выше при северных и восточных ветрах, чем при ветрах с юга или с запада. Неглупая и хорошо аргументированная попытка объяснения этого была сделана примерно в это время Иоганном Крюгером из Йены в его диссертации [64], гораздо более ценной, чем большинство диссертаций, исходивших из немецких университетов в этот период. Идея ее проста. Исходя из факта, что существует преобладающий западный поток, который он считает установленным, он говорит:

«Теперь же, если ветер дует к нашей стране с севера или с востока или из области, промежуточной между ними, он всегда будет сталкиваться с постоянным ветром противоположного направления, а следовательно, воздух вокруг нас по необходимости будет накапливаться, конденсироваться и становиться тяжелее, так что вес его, действующий на ртуть, будет заставлять ее подниматься. Наоборот, если в нашей стране господствует южный или западный ветер или ветер промежуточных между этими направлений, постоянный ветер будет добавляться к нему, так что он будет уносить массу накопленного воздуха, а ее место будет занимать более разреженный и легкий воздух, снимая с ртути большой вес и заставляя ее намного опускаться» ([64], стр. 46).

Приблизительно в это же время энергичный экспериментатор Френсис Хауксби был введен в заблуждение колебаниями барометра при порывистом ветре, теперь обычно называемыми «рип-ринг»; такие колебания вызываются динамическим воздействием ветра на давление, если комната, где помещен барометр, неплотно закрыта. Это искусственное явление не имеет никакой связи с чем-либо, происходящим в свободной атмосфере, однако то, что в дни быстрого падения барометра ветер часто бывает очень сильным, было замечено справедливо.

Хауксби, следуя своему влечению, построил сложный аппарат, в котором воздушный поток с большой скоростью мог проходить над резервуаром барометра в закрытом ящике. Для большей уверенности этот ящик был соединен трехфутовой трубкой с другим аналогичным ящиком, в котором был помещен резервуар другого барометра. Случилось так, что механическая схема и относительные размеры входной и выходной трубок были таковы, что вызывали падение давления [162]. Так же легко он мог

бы получить и противоположный эффект, на что позднее указывал Христиан Вольф [367]. Здесь уместно отметить, что Вольф, первоклассный ученый, чьими заслугами перед метеорологией несколько пренебрегли*, высказывал в 1709 г. предположение, что ветры дуют от места, где давление выше, к тому месту, где оно ниже [368].

В уже упомянутой статье [211], опубликованной в 1715 г., Лейбниц говорит, что «очень сильный ветер может также поддерживать вес воздуха», и поясняет далее, что ветры могут вызывать и другие эффекты, особенно ветры противоположных направлений, упомянутые в начале этого раздела.

Однако человеком, совершившим самую решительную попытку объяснить движение ртути влиянием ветра, был Меран, который в своей премированной диссертации в 1715 г. [229] идет весьма далеко, чтобы показать, что любое движущееся тело, включая воздух, меньше давит на расположенную под ним поверхность, чем то же тело в покое. Из диссертации Мерана совершенно ясно, что он, по существу, использовал древнюю народную примету, возникшую из таких элементарных открытий, как возможность быстро бежать по тонкому льду. Действительно, он даже цитирует Гомера, который, говоря о скорости колесницы, указывает, что ее колеса оставляли лишь слабый след на тонкой пыли. Тем не менее было бы очень интересно узнать, не было ли у него смутных ассоциаций с центробежной силой, сравнительно незадолго до того открытой Христианом Гюйгенсом [183].

Делюк допускал, что Меран действительно думал о центробежной силе, но вычислил, что жестокий порыв ветра, имеющий скорость приблизительно 60 миль в час, изменил бы высоту барометра лишь на $\frac{1}{244}$ линии ([88], § 195). Заметим, между прочим, что уже Гюйгенс рассчитал скорость, с которой должен двигаться снаряд, для того чтобы выйти на орбиту. Во всяком случае Делюк полностью разрушил теорию Мерана, и совершенно удивительно, что в 19-м столетии в Британской энциклопедии появилась длинная статья Джона Лесли, где он пространно развивал свою собственную теорию, согласно которой ветры стремятся дуть прочь от земли по касательной [218]. Каким-то образом он ухитрился убедить самого себя в том, что чем дальше течет ветер в одном и том же направлении, тем сильнее уменьшается давление под ним, и он приводил расчеты, имевшие целью оценить этот эффект количественно. Репутация Лесли как ученого была очень высока, но — увы! — это был не последний случай, когда доверие неискушенных покупателей энциклопедий было обмануто знаменитостью, носившейся с какой-либо своей причудой.

* В книге А. Вольфа [366] о нем имеется большой раздел.

5. Адвекция воздуха

Одним из предрассудков, которые следовало преодолеть для того, чтобы метеорология могла по-настоящему прогрессировать, было убеждение в том, что атмосфера имеет определенную верхнюю границу, располагающуюся на более или менее одинаковом расстоянии от уровня моря над всем земным шаром. Чтобы увидеть, насколько далеко мы ушли от этой простой модели, достаточно лишь подумать о картах барической топографии для высоких уровней, используемых сейчас прогнозистами в их ежедневной работе.

Наиболее четкое и раннее утверждение, что «высота атмосферы» может изменяться, принадлежит, по-видимому, Филиппу Лагиру, руководившему метеорологическими наблюдениями в Парижской обсерватории в самом начале 18-го столетия. В 1705 г. [201] Лагир высказал предположение, что большие изменения в показаниях барометра должны соответствовать изменениям полной высоты атмосферы, поскольку ему «представляется неразумным предполагать, как это делают некоторые философы, что у поверхности земли имеются различные жидкости различного веса, которые иногда текут в одном направлении, а иногда в другом, ибо, как показывают нам наблюдения, они должны были бы обычно быть легче, если воздух содержит больше паров» ([201], стр. 3). Это, конечно, было плохое основание для хорошего вывода. Далее он высказывает предположение, что атмосфера представляет собой вытянутый сфероид, ось которого совпадает с осью Земли. Тогда, поскольку обычно дождь идет при южном ветре, причина падения барометра в дождливую погоду заключается в том, что южные ветры приносят на высоте порцию менее высокой атмосферы. Но, с другой стороны, если ветер имеет южное направление только у поверхности земли, а наверху ветер дует с севера, дождь может идти, даже если барометр поднимается.

Лишь несколько позднее начали понимать, что температура существенно влияет на плотность атмосферы. Внимание к этому, вероятно, привлекли исследования Гийома Амонтонса по термометрии [14]. Во всяком случае Плачентини [273] считал это главной причиной колебаний барометра, полагая, что, поскольку высота столба воздуха остается постоянной, ибо это жидкость, то давление должно быть функцией температуры. Заметим, что это является прямой противоположностью доводам Лагира, но из мнения Плачентини все же вытекает необходимость наличия адвекции на верхних уровнях для поддержания одинаковой высоты атмосферы.

Меран [229] использует аналогичное доказательство для объяснения высоких показаний барометра в холодную погоду и, как он говорит, в холодных странах. Холод вынуждает массу

воздуха над охлажденной частью поверхности земли сжиматься, но, поскольку уровень жидкости должен сохраняться, в верхней части атмосферы должен наблюдаться приток воздуха из соседних областей; следовательно, наверху будет больше вещества, что приведет к росту давления. Сходные идеи высказывались в уже упоминавшейся книге Христиана Вольфа [367], но не в виде застывшего догмата, как это и приличествует великому философу. «Это большая ошибка, — пишет он, — при объяснении Природы приписывать единственную причину вещам, которые могут иметь много их». Он высказывает предположение, что перехваченная облаками солнечная радиация может нагреть как их, так и воздух над ними, который, в свою очередь, может затем растекаться «в сторону».

Делюк ([88], § 711—714) ввел понятие об адвекции для того, чтобы объяснить, каким образом добавление водяного пара к воздуху может привести к понижению барометра. Пар стремится подняться, поскольку он легче, но так как равновесие никогда не достигается, то в столбе воздуха всегда содержится некоторое количество этого более легкого вещества. Считается, что добавка водяного пара должна увеличить массу столба воздуха и вызвать повышение барометра. Но, говорит Делюк, этот воздушный столб у своей вершины будет растекаться и смешиваться с окружающим воздухом, в котором испарение было меньше, и поскольку удельный вес столба меньше, то он с меньшей силой будет давить на ртуть.

Все это было вполне хорошо как качественное объяснение, но это не могло быть единственной или даже главной причиной вариаций барометра. На это в 1783 г. указывал Орас Бенедикт Соссюр, о котором желательно сказать несколько слов. Он родился в 1740 г. в Женеве, где в возрасте 22 лет стал профессором философии. Сначала занимался ботаникой, но вскоре обратился к геологии и метеорологии Альп, которые затем полностью его захватили. Он был первым большим ученым, изучавшим горы, и наблюдения, которые он считал нужным проводить, заставили его изобрести многочисленные приборы и усовершенствовать другие. Наиболее примечательным примером такого рода является волосной гигрометр, конструкцию и калибровку которого он описал в своих «*Essais sur l'hygrométrie*» [308] — небольшом мастерском очерке по экспериментальной физике, где содержатся также многие его идеи о дожде. Однако самой большой его книгой была сводка его научных исследований (хотя и не всех) в горах [307 а]*. Нет сомнений, что именно такая напряженная деятельность привела его после восьми лет пошатнувшегося здоровья к кончине в возрасте 59 лет. Он был образцом самоотверженного научного работника.

* Имелось также 8-томное издание в $\frac{1}{8}$ листа, вышедшее в 1780—1796 гг.

В своих «Essais sur l'hygrométrie» Соссюр говорит, что данное Делюком объяснение причин вариаций барометра казалось настолько правдоподобным, что он вначале надеялся, что оно может быть подтверждено с помощью *experimentum crucis* (решающего опыта). Это заставило его сделать исследования с большим стеклянным шаром, в результате которых он нашел, что удаление всего или почти всего водяного пара из насыщенного воздуха при 16°R понижает давление лишь на $\frac{1}{54}^*$. Таким образом, если бы даже мы могли предположить, что вся атмосфера переходит от полного насыщения к абсолютной сухости (чего, конечно, не бывает), то изменение составило бы лишь $\frac{1}{2}$ дюйма (парижского).

Рассматривая различные явления, в особенности сравнительно малую изменчивость барометра вблизи экватора, он показывает, что изменения температуры в ограниченной области должны являться существенной причиной вариаций давления, причем эти изменения отчасти вызваны перемещением воздуха с одного места на другое. На возражение, что если холод заставляет барометр подниматься, то он должен также приводить к конденсации паров и к образованию дождя, Соссюр отвечает, что в Европе холодные северные ветры являются также и наиболее сухими. Они вытесняют воздух, находившийся в этой области до их прихода, и мы наблюдаем высокие показания барометра при хорошей погоде ([308], стр. 304).

Соссюр, очевидно, был в меньшей степени создателем новых систем, чем большинство его современников, а его скромность была исключительна. В ходе выводов, которые мы рассматриваем, он говорит:

«Не претендуя на полное решение столь трудной задачи, которую тщетно пытались решить великие физики, я удовлетворюсь лишь тем, что изложу некоторые общие взгляды» ([308], стр. 289).

Что касается необходимости совместного рассмотрения изменений как температуры, так и влажности, то Джон Дальтон имел на этот счет те же соображения, что и Соссюр. Он приводит пример, который является мучительно ясным для североамериканских метеорологов:

«Климат восточного побережья Северной Америки устроен так, что в зимний сезон понижение средней температуры в направлении к северу происходит значительно быстрее, чем на западном побережье этого материка (Европы); вследствие чего любое место здесь подвержено большим и внезапным флуктуациям температуры зимой, а это создает пропорциональные флуктуации барометра — в зависимости от того, какой преобладает воздух: теплый и насыщенный парами или холодный и сухой» ([67], стр. 104).

* По современным данным, на $\frac{1}{44}$.

Даже если бы вы не знали, что водяной пар легче воздуха, вы могли бы объяснить падение барометра, когда с юга приходит влажный воздух. Дю Карла сделал это в 1780 г. на основе теории, по которой слой влажного воздуха, относительно тонкий, отдает свое тепло воздуху, расположенному выше; тот расширяется и, вероятно, растекается в сторону у вершины воздушного столба. Однако он не разъяснил это.

В 1788 г. Ричард Кирван опубликовал «Очерк о колебаниях барометра» [189], в котором сделал большой шаг вперед, стремясь показать с помощью расчетов неадекватность многих существовавших теорий. Он доказал, например, что изменения температуры воздуха в пределах первых 5000 футов, если считать их не зависящими от высоты, далеко не достаточны, чтобы объяснить изменение давления при пересечении того, что мы теперь назовем холодным фронтом, и он показал численно, что изменение это могло бы возникнуть в результате лишь конденсации водяного пара. Тогда,

«показав таким способом недостаточность тех причин, которым приписывалась изменчивость веса атмосферы и высоты барометра, я перейду теперь к объяснению того, что мне представляется единственно годным для объяснения возникающих эффектов; а именно — к накоплению воздуха над теми частями земного шара, где столбик ртути превышает среднюю его высоту, т. е. высоту, свойственную его положению, и к уменьшению или вычитанию соответствующих количеств воздуха над теми районами, где ртуть падает до уровня ниже ее средней высоты» ([189], стр. 60).

Поэтому поскольку среднее давление не очень сильно отличается в различных частях земного шара и в тропиках у земли воздух намного теплее, то атмосфера над экватором должна быть выше, чем над полюсами. Это была очень здравая догадка, как мы это знаем теперь, особенно если мы вместо «атмосферы» подставим «тропопаузу». Так же, говорит Кирван, сравнительно большая часть массы атмосферы располагается выше некоторого заданного среднего уровня вблизи экватора.

После такого многообещающего начала Кирван обратился к модным тогда областям химической и электрической метеорологии. Он, например, думал, что верхняя атмосфера в основном состоит из «горючего воздуха» (водорода), что он в изобилии образуется между тропиками, растекается к северу и к югу и сгорает в северных и южных полярных сияниях и что «его сгорание является первопричиной самых сильных возмущений в атмосфере» ([189], стр. 62).

Наиболее важным было постепенно возникшее представление о том, что колебания барометра невозможно понять вне связи с общей циркуляцией атмосферы. Это было полностью признано, например, Джоном Фредериком Даниелем, хотя его доводы, сопровождавшиеся численным примером, трудно проследить [77].

Он полностью отдавал себе отчет в важности распределения суши и воды на земном шаре.

6. Различные объяснения

Трудность загадки барометра можно оценить по тем буйным взлетам фантазии, которые она порождала даже у первоклассных ученых. Одним из них был Даниель Бернулли, разработавший кинетическую теорию газов, вкратце упоминавшуюся во второй главе. Знаменитый десятый раздел его «Гидродинамики» [35] озаглавлен: «О составе и движении упругих жидкостей, особенно воздуха». Первые параграфы этого раздела, где излагается кинетическая теория газов (увы, столь преждевременно!), часто цитируются. Но в этом разделе содержится также многое другое, и для нас важно доказательство того, что уровень ртути в барометре на данной высоте в значительно большей степени зависит от изменений плотности воздуха, расположенного *ниже* этого уровня, чем находящегося выше его. Давление на поверхности Земли сильно меняется, следовательно, воздух должен существовать и под ее поверхностью, и именно здесь Бернулли ныряет на самое глубокое дно:

«...вероятно, колебания давления в большей части связаны с быстрыми изменениями температуры в подземных пещерах. Уже давно стало известно, что существует много огромных пещер такого рода, и поры в твердой земле также могут действовать, как пещеры. Если вы соберете все пустоты (как в форме пещер, так и пор, содержащих воздух), имеющиеся до 20 или 30 футов под поверхностью земли, и сравните их емкость с объемом земной коры, в пределах той же глубины, и определите последний как в 1000 или в 100 000 раз превышающий первый, то все же эта причина несомненно останется достаточной для объяснения самых больших колебаний барометра...»

Некоторые места вблизи пещер будут подвержены большим изменениям ветра и давления — из-за сопротивления воздуха движению. Возможно, что это и является причиной того, что, чем ближе к экватору, где океан занимает почти всю поверхность, тем слабее оказываются наблюдаемые колебания барометра по сравнению с колебаниями в наших, северных районах» ([35], стр. 211).

Быстрые подземные изменения могут, конечно, проявляться в виде землетрясений. Далее, в этом же разделе, Бернулли использует эту идею для создания примечательного, но абсурдного правила для барометрической гипсометрии, рассматривать которое здесь у нас нет необходимости.

К счастью, идея Бернулли не нашла приверженцев. Более пространенной ересью оказалось утверждение, что «упругость» воздуха не зависит от его «веса», так что показания барометра могут изменяться без какого бы то ни было изменения массы столба воздуха над ним. Поскольку почитатели этой доктрины

происходили, по-видимому, — за исключением одного полностью денатурализовавшегося англичанина — с материка, то соблазнительно предположить, что она могла возникнуть из трудности понимания Роберта Бойля, у которого различие терминов «spring» (упругость) и «weight» (вес) для воздуха могло затемнить их тесную связь для любого, чей родной язык не был английским. Как бы то ни было, в 1701 г. мы встречаемся с Фридрихом Гофманном из Галле, утверждающим [171], что высота уровня ртути зависит «не столько от веса и массы воздуха, сколько — и главным образом — от движения и расширительного давления воздушных частиц» ([171], стр. 57) *. Они больше при сухом воздухе и северных ветрах, чем при облачной и дождливой погоде и южном ветре.

Каждому известно, что многие вещи тверже и более упруги в сухом состоянии, чем во влажном, так почему же это не может относиться и к атмосфере? Эта ложная аналогия, вероятно, лежащая в основе рассматриваемой нами доктрины, была сжато выражена Николаусом Бегелином:

«Опыт учит нас, что упругие тела становятся более гибкими при сухой погоде, а влажность ослабляет их эластичность. Из этого наблюдения мы имеем основания сделать вывод, что сухость воздуха должна увеличивать давление атмосферы и делать ее способной поддерживать более высокий столбик ртути» [31].

И наоборот для влажного воздуха. Но поскольку последний нагружен водными частицами, которые в 800 раз плотнее самого воздуха, то вес его будет больше, а вес сухого воздуха — меньше. Следовательно, делает вывод Бегелин со свойственным академическим метеорологам скептицизмом, не существует способов узнать заранее — будет ли давление расти или падать из-за изменений влажности.

Эта доктрина была принята без всяких сомнений Теодором Августом Манном, англичанином, который в то время был министром народного образования в Брюсселе [231]. Он, по-видимому, считал эту доктрину оригинальной. Бегло упомянув о Джозефе Старке [327], для которого она была лишь одной из нескольких возможных, мы укажем лишь на Жана Батиста ван Монса, брюссельского профессора химии и физики, пришедшего к выводу, что вес и давление атмосферы изменяются совершенно независимо. В доказательство этого он провел одновременные наблюдения с помощью барометра и «манометра» [344]. Его манометр представлял собой просто «статический бароскоп» Бойля — легкий пустой шар, висящий на одном плече весов ([241],

* Я не думаю, что это можно рассматривать как предвестие кинетической теории газов, но тем не менее сопоставление „motus“ и „nisus expansivus“ представляется очень интересным.

стр. 373). Это очень малочувствительный прибор, с весьма малым отношением сигнала к шуму, как сказали бы инженеры-электрики, и совершенно неудивительно, что ван Монс нашел то, что искал. Он решил, что этот прибор — ценное дополнение к арсеналу метеорологии, и был удивлен, что Соссюр и другие «смешивали его показания с показаниями барометра» ([344], стр. 323).

В другой статье, опубликованной в том же году, ван Монс, бывший активным членом Бельгийской академии, еще более упорно настаивал на отсутствии зависимости между весом воздуха и его упругостью [343]. Он проявил себя при этом как один из отчаянных фантазеров-теоретиков, изобиловавших в то время, как мы увидим в главе VI. Он пишет о взаимном преобразовании

«света, электрической жидкости, субсвета и субэлектричества, если оно действительно существует, и тепла. Мы не можем ни шагу ступить ни в физике, ни в химии, не поняв ту легкость, с которой эти факторы превращаются один в другой, — превращение, от которого зависит очень большое число явлений» ([343], стр. 107).

Если оно действительно существует.

Следует рассмотреть еще одну теорию, настаивающую на том, что для того, чтобы барометр падал или повышался, часть атмосферы должна быть абсорбирована или высвобождена. Эту идею поддерживал П. Н. Шанжэ из Парижа, который построил первый прекрасный барограф и другие приборы. Шанжэ думал, что абсорбция и замещение или регенерация воздуха должны осуществляться в основном водой или облаком [55]. При испарении воды высвобождается много воздуха. Это бывает при хорошей погоде, и высвобождение воздуха отражается в повышении барометра. Когда начинается конденсация, вода поглощает свой воздух обратно и барометр падает. Эта теория в основных чертах сходна с теорией Лоренцо Пиньотти, профессора физики из Пизы, который, будучи воодушевлен наблюдениями Пристли за горением и дыханием и данными Кавендиша об удельном весе различных газов, считал, что «пламенные» (phlogistic) пары, выходящие из земли перед дождем, уменьшают вес нижней части атмосферы [272]. Но он не исключал другие вторичные причины колебаний давления.

В заключение сошлемся на предрассудки бессмертного Гёте, чьи творения в области метеорологии представляют превосходное — хотя и ненужное — доказательство различия между поэзией и наукой или, возможно, превосходства поэзии. Гёте обладал своеобразной чувствительностью к явлениям погоды, сочетавшейся с нечувствительностью к научному климату его времени. Барометр, по-видимому, зачаровал его, и он пришел к выводу, что изменения давления воздуха, зависящие от полностью

внеатмосферных причин, фактически *являются причиной* всех остальных метеорологических явлений. Василевский [355] сообщает о его карандашной заметке: «Высота барометра обуславливает все другие атмосферные действия и не обуславливается ни одним из них». Гёте пренебрегал энергией, получаемой от Солнца, и поскольку изменения температуры не казались тесно связанными с барометрическим давлением, он уделил им мало внимания. Из его собственных слов ясно, что у него не было четкого представления о природе атмосферного давления:

«... мы ищем причину барометрических колебаний не вне земного шара, а в нем; эта причина не космическая, не атмосферная, но скорее теллурическая. Пока для нас не загорится новый свет, мы будем упорно настаивать на этой гипотезе и говорить: Земля изменяет силу своего притяжения и притягивает атмосферу [Dunstkreis] больше или меньше. Атмосфера не имеет веса, как не оказывает и давления, но когда она притягивается сильнее, то кажется, что она давит и весит больше...»

Однако для всех нас, вероятно, это удача, что он не был более глубоким ученым, ибо, как заметил Х. Фиккер, «при деятельной, неутомимой натуре этого человека более интенсивное занятие метеорологией сократило бы время, которое у него было для других видов работы, более родственных его таланту» ([126], [316]).

ГЛАВА V

ТЕОРИИ ДОЖДЯ И СНЕГА В СЕМНАДЦАТОМ И ВОСЕМНАДЦАТОМ СТОЛЕТИЯХ

Можешь ли возвысить голос твой
к облакам, чтобы вода в изобилии по-
крыла тебя?

*Книга Иова, гл. XXXVIII,
стих 34-й*

1. Введение

В последних трех главах я попытался заложить нужную основу для краткого обсуждения многих теорий дождя, сформулированных в 17 и 18-м столетиях. Термин «теория дождя» следует здесь понимать как попытку объяснить превращение взвешенного пара в падающие капли дождя или снежные хлопья (в последние — при тех условиях, при которых вода может появляться в твердом состоянии).

Очевидно, проблема состоит из двух частей: формирование облачных частиц из пара и развитие дождевых капель из облачных частиц. Даже при отсутствии сколько-нибудь подробных знаний о физике облаков — предмете, относящемся к последним восьмидесяти годам или около того, — всегда наблюдалась тенденция объединить эти два процесса в один и подумать, каким образом невидимый пар может быть превращен в дождь, причем облака считались неизбежной промежуточной стадией этого процесса. Лишь в небольшом числе исследований имелись рассуждения о физике роста дождевых капель, а в последней части периода она часто связывалась с тем фактом, что в дождемере, расположенном ближе к поверхности земли, собирается больше дождя, чем в расположенном выше.

Конец 18-го столетия ознаменовался беспрецедентным развитием химии, начавшимся вскоре после того, как были достигнуты

большие успехи в изучении статического электричества. Это внезапное расширение научного горизонта привело к появлению массы экстравагантных метеорологических гипотез, которые заслуживают рассмотрения в отдельной главе (глава VI).

2. Элементарные понятия о расширении и сжатии

В 1637 г. Декарт рассуждал о причинах, заставляющих облачные капельки сливаться в дождевые капли. Для того чтобы это вообще могло случиться, должно иметься изобилие пара, а чтобы перемешивание «тонкой материи» * не препятствовало влиянию, должно быть холодно.

«И необходимо также, чтобы западный ветер, препятствующий облачному движению паров **, собирал их и конденсировал их в месте, где он останавливается ***, или еще чтобы два или большее число других ветров, направленных с разных сторон, сжимали бы капельки и накапливали бы их в месте их встречи, или чтобы один из ветров гнал их навстречу уже сформировавшемуся облаку, или еще чтобы пары собирались у основания какого-либо облака по мере того, как они исходят от земли» [101].

Очень трудно понять, как Декарт мог прийти к мысли, что ветер может гнать пары навстречу существующему облаку, а облако не удаляется при этом с точно такой же скоростью. Возможно, что он наблюдал некоторые по видимости стационарные облака, образующиеся с подветренной стороны горного хребта при сильном ветре, хотя эти облака обычно не дают дождя. Даже его хорошо известные идеи о непрерывности трудно обнаружить в вышеприведенном отрывке.

Представление об облаках, подвергающихся сжатию, и о частицах, согнанных вместе, всплывает время от времени на протяжении почти всего периода. Зная, что иногда дождь может идти при повышении барометра, Джордж Гарден отмечает, что это почти всегда бывает после внезапного изменения направления ветра, по нашей терминологии — после прохождения холодного фронта:

«... если направление ветра неожиданно переходит в другую четверть, эти пары, до того рассеянные в виде малых частиц и потому взвешенные в воздухе, внезапно встречаются и сливаются в капли и вынуждены падать в виде дождя...» [133].

Дезагюлье хотел видеть причину того же явления во внезапном действии другого рода:

«Не спокойное опускание облака, а только ускоренное нисходящее движение создает дождь» [100].

* См. выше, стр. 24, и [101].

** Декарт думал, что нормальным ветром должен быть восточный ветер, но не указал причины этого.

*** „Aux endroits où il se termine”.

Исключениями являются удар от вспышки молнии и столкновение облака с холмом. Последнее не ставится в связь с вынужденным подъемом.

«[Облако], встретив на своем пути высокий холм, конденсируется и выпадает в виде капель, особенно если в дневное время ветер уносит его от солнечного света к затененной стороне горы» [100].

Идеи Дезагюлье были повторены вместе со множеством других идей в той научной мусорной свалке, которую представляют собой «Essais de physique» Мушенбрука [249]. Даже в 1765 г. преподобный Хьюг Гамильтон из Дублина считал, что процесс, в результате которого облака превращаются в дождь, — это слияние их частиц под действием встречных ветров [158]; а в 1772 г. Делюк, публикуя свои «Modifications», все еще был под чарами этой идеи, которую он и изложил под заголовком «Причина дождя»:

«Когда — при изобилии пара, на склоне горной цепи, при действии ветра встречного направления или, наконец, благодаря сопротивлению, которое само облако оказывает несущему его ветру *, — эти облака испытывают сжатие; когда это случается — капли воды приходят в соприкосновение и объединяются, огненные частицы, которые служат для них средством перемещения **, также объединяются и ускользают — тем легче, чем более разрежен воздух, или их поглощают сами горы, и так образуются дождевые капли, которые затем падают, поскольку они тяжелее воздуха» ([88], стр. 724).

Очевидно, «огненные частицы», содержащиеся в воздухе, могут также быть абсорбированы самим дождем и унесены им вниз, на землю; таково объяснение, данное очень большому холодному фронту, наблюдавшемуся 21 августа 1764 г., когда температура внезапно упала от 22 до 8° R (от 27,5 до 10° C) ([88], стр. 720).***

Делюк никогда не оставлял совсем идею о частицах, приходящих в соприкосновение, но в более поздних своих сочинениях он уже придавал меньше значения сжатию облаков. Около 1786 г. он решил, что дождевые облака отличаются от других следующим: в них *образуется так много пара*, что частицы — пузырьки, как считалось тогда, — приходят в контакт и объединяются, лопааясь при этом, подобно большим мыльным пузырям; образовавшиеся капли на своем пути вниз увлекают другие пузырьки ([90], стр. 621).****

* В предыдущем параграфе он даже говорил, что облака имеют почти тот же удельный вес, что и воздух, в котором они плавают!

** См. выше, стр. 38.

*** По европейским условиям — огромное падение.

**** Читатель найдет фразу, выделенную мною курсивом, еще более многозначительной, после того как прочтет главу VI.

Другая группа физиков придерживалась диаметрально противоположного взгляда и считала, что для образования дождевых капель или даже облаков необходимо не сжатие, а расширение воздуха. Эту точку зрения хорошо выразил Эдмонд Галлей:

«...если, при высоком барометрическом давлении, воздух накапливается под действием встречных ветров, то пары сохраняются еще лучше и удерживаются от коагуляции или конденсации в капли, почему облака и формируются не с такой легкостью, а ночью пары падают вниз просто потому, что они поднимаются в виде мельчайших атомов воды. В то же время, когда ртуть стоит низко, а воздух разрежается в результате отсасывания его двумя растекающимися в разные стороны ветрами, атомы воздуха не удерживают пары столь полно разделенными и они сливаются в видимые капли в облаках, а из них легко превращаются в большие по размеру капли дождя» [156].

Парди, считавший, что облака состоят из маленьких пузырьков, думал, что дождевые капли образуются при их разрушении «или потому, что воздух, который в них содержится, разрежается чрезвычайно сильно, или по какой-либо другой причине» [260]. Не совсем ясно — подразумевает ли он, что воздух вне их должен также разрежаться.

Восемьдесят лет спустя Дю Карла основывал свои замечательные теории на представлении, что именно разрежение воздуха приводит к конденсации воды в восходящих потоках [109].

Происхождение этой идеи несомненно шло от знаменитого и всех восхищавшего опыта Отто фон Герике* с «облачной камерой», который видел каждый физик и практически почти каждый любитель науки. Здесь можно было *увидеть*, как образуется облако при разрежении влажного воздуха и, по-видимому, именно этим путем — до тех пор, пока, приблизительно в 1755 г., не было обнаружено, что расширение вызывает одновременно падение температуры.** Было также замечено, что при подходящих условиях достаточно лишь небольшого разрежения.

3. «Солевые» испарения

Сразу же после приведенной выше цитаты мы находим у Галлея:

«Возможно, и не невероятно, что некоторый род солевых или угловатых частиц земных испарений, будучи перемешан с водными, которые я считаю пузырьками, могут прорезать или разрушать их оболочку и таким образом способствовать более быстрой конденсации их в дождь» ([156], стр. 473).***

До этого он высказывал предположение, что если бы вся земля была покрыта слоем глубокой воды, то погода не была бы разнообразной, если не считать

* См. выше, стр. 45.

** См. [199], а также ниже, стр. 93.

*** См. выше, стр. 68 и стр. 69.

«периодических изменений, одинаковых каждый год, поскольку смешение всех земных, солевых, гетерогенных паров отсутствовало бы: ведь, приносимые ветром и смешиваемые в различных пропорциях, они-то, по-видимому, и являются причиной возникновения тех различий сезонов, которые мы наблюдаем» ([156], стр. 470).

Это предположение почти наверняка идет от рассуждений о «нитро-эфирных спиртах» Майо, рассмотренных в главе IV, или подсказано ими. В 1715 г. Эдвард Барлоу думал, что образование дождя требует добавления «извлечений из минералов и серных испарений, исходящих из недр Земли» [28]. Мушенбрук, естественно, также упомянул о них. Но, к некоторому нашему удивлению, потом эти субстанции практически перестали фигурировать в теориях дождя.

4. Рост дождевых капель

В главе I мы рассматривали странную теорию Аристотеля о том, что самые большие дождевые капли — и градины — рождаются вблизи от земной поверхности. Это оказалось неприемлемым уже в 17-м столетии, и все авторы, обсуждавшие этот предмет, насколько я знаю, соглашались, что обычно дождевые капли растут по мере их падения. По-видимому, вообще этим вопросом интересовались не очень многие. Очевидно, существуют два механизма роста дождевых капель: объединение капель при их падении и конденсация воды на каплях.

Вторая составляющая этой альтернативы привлекла Антуана Ле Грана, картезианского философа, жившего в Оксфордшире. Летом, говорит он, дождевые капли больше, потому что «они падают с более высоких уровней и, проходя в воздухе более длинный путь, увеличиваются при этом в размерах, собирая на себе воду» [209]. Точно такое же мнение было высказано в 1686 г. Эдме Мариоттом, добавившим, что зимой облака располагаются ниже ([232], стр. 18—19).

Первую часть альтернативы защищал Барлоу, приписывавший слияние элементов, образующих осадки, различной скорости их падения, из-за которой большие по размерам перехватывают меньшие ([28], стр. 47). В одном из своих лучших параграфов Мушенбрук приписывает различия в скорости падения неодинаковому соотношению между поверхностью и объемом и отмечает также, что скорость дождевых капель быстро достигает максимума, соответствующего их размерам. Он дает также правильное объяснение максимальных размеров дождевых капель (около 6 мм): сопротивление воздуха разрывает их, если они становятся сколько-нибудь больше, и «способность притяжения» оказывается недостаточной ([249], стр. 794).

Гамильтон также принял теорию слияния, чтобы объяснить рост дождевых капель:

«...и по этой причине капли, выпадающие из более высоких летних облаков, обычно оказываются большими, чем зимой, когда облака располагаются ниже» [158].

Однако вскоре, после некоторых опытов с дождемерами, проведенных в Вестминстере знаменитым врачом Уильямом Геберденом старшим [163], появился новый стимул для развития этого вопроса. Он установил три сходные воронки: одну — вблизи поверхности земли, другую — выше самых высоких дымовых труб дома и третью — на крыше Вестминстерского аббатства, так чтобы она не затенялась западными башнями. Во все месяцы с июля 1766 г. до июня 1767 г. количество собранных осадков уменьшалось с ростом высоты, причем общие суммы осадков составляли 22,608 дюйма в саду, 18,139 дюйма на доме и только 12,099 дюйма — на крыше Аббатства.* Ясно, что такой разительный эффект должен иметь свою причину: таковая, как говорит Геберден, не была открыта, но

«возможно, что к этому явлению имеют отношение некоторые, до сих пор неизвестные, свойства электричества. Эта сила несомненно принимает большое участие в падении дождя, которое вряд ли вообще осуществилось бы, если бы воздух и электрические приборы были достаточно сухими и не было признаков электричества в воздухе» ([163], стр. 361).

Те, кто знал об электричестве больше, были более осторожными, используя его в качестве объяснения. Бенджамин Франклин в 1771 г. в письме к Томасу Персивалю говорил, что каждая дождевая капля «получает непрерывное пополнение на своем пути вниз», и предлагал два возможных механизма: один, с помощью которого бутыль, наполненная холодной водой, притягивает влагу «из окружающего ее с виду сухого воздуха», и второй, с помощью которого наэлектризованное тело притягивает пылинки. Тогда уже было известно, что капли, приходящие сверху, холодны и что они наэлектризованы, но Франклин не думал, что этих знаний достаточно, чтобы предложить обоснованную теорию [267].

Важность опытов с дождемерами была ясна Дэйнису Баррингтону. Услышав об экспериментах Гебердена, он установил два дождемера в северном Уэльсе, оба у земли, но с разницей в высоте в 1350 футов. Благодаря исключительной удаче — или неудаче — он обнаружил лишь незначительное различие в показаниях дождемеров [29]. Сдержанное примечание Гебердена, добавленное к статье Баррингтона, заканчивалось так:

* Данные в XVIII в. почти никогда не округлялись.

«Следовательно, разница ... не зависит от большей мощности атмосферы, сквозь которую падает дождь, хотя это и предполагали многие, которые сделали отсюда вывод, что этот факт может быть легко объяснен накоплением большего числа капель при падении через большой слой атмосферы» ([29], стр. 297).

Мы, вероятно, не должны придавать большое значение словам «большее число капель» в этой цитате. Тогда считали возможным решить с помощью таких экспериментов лишь вопрос о том, растут ли капли, объединяясь с более мелкими, или это происходит путем заимствования дополнительной воды из влажной атмосферы. Теперь мы знаем, что в росте капель участвуют оба процесса, но и до сих пор одна из наиболее сложных проблем современной физики облаков — это решить, каков их относительный вклад. Что же касается проблемы дождемеров, установленных на разных высотах, то она была решена значительно позднее, как это станет ясно из главы VIII.

В этой части нашего повествования снова появляется Бенджамин Франклин. 22 декабря 1784 г. он направил Манчестерскому литературному и философскому обществу статью под названием «Метеорологические фантазии и догадки». Одна из них может быть процитирована здесь полностью:

«Возможно, что летом большая часть того, что выпадает на землю дождем, могло быть снегом, когда только начиналось его падение, но, растаяв при прохождении сквозь теплый воздух вблизи земли, оно превратилось из снега в дождь» [132].

Это мнение было предвосхищено Дж. Г. Ламбертом, который вывел его из того факта, что дождь часто холоднее, чем воздух у поверхности земли [202]. В настоящее время считается, что во многих случаях дождь начинает свое выпадение в виде снега.

5. Влияние местности

Из наблюдений на побережьях, как обращенных к западу, так и к востоку, вероятно, уже давно было известно, что большее количество дождя выпадает на холмах, расположенных в глубине материка, чем на плоских равнинах вблизи морского побережья. Сегодня осадки, вызванные наличием холмов, называют орографическими, и мы знаем теперь, что причина выпадения больших количеств осадков в горах заключается в охлаждении воздуха в процессе его вынужденного подъема при перетекании через них. Но задолго до того, как это стало понятно, Галлей сделал свое первоклассное описание гидрологического цикла, в котором вначале предполагалось, что земля полностью покрыта океаном [156].*

* См. выше, стр. 86.

Однако фактически на ней существуют высокие горы,

«высота которых намного превосходит ту, на которую сами по себе поднимаются водяные пары, и на вершинах которых воздух столь холодный и разреженный, что он в состоянии удержать лишь небольшую часть тех паров, которые туда приносят ветры» ([156], стр. 470).

Таким образом, вода выпадает,

«просачиваясь* вниз через трещины в камнях, а часть паров проникает в пещеры в холмах, и вода, образовавшаяся из них, собирается, как в перегонном кубе, в находимых ею каменных бассейнах. Так, если мы можем проследить конечные причины, то таковыми должны быть формы холмов, а именно что их гребни, расположенные в центре континентов, должны действовать как если бы они были перегонными кубами для дистиллирования воды на пользу человеку и животным, а их высоты дают возможность этим потокам спокойно сбегать вниз, подобно многим кровеносным сосудам вселенной, и становиться весьма благотворными для творения» ([156], стр. 473).

Примерно до 1780 г., по-видимому, лишь Дезагюлье (1729 г.)** и Мушенбрук отмечали роль холмов, хотя Делюк (1772 г.) видел в них одну из причин «сжатия облаков»***. Делюк сделал много наблюдений в горах, но их главной задачей было усовершенствование барометрической гипсометрии, что повлекло за собой некоторую односторонность в анализе результатов этих наблюдений. Он предложил также две неудачные конструкции гигрометров [240], и это оказало влияние на его представление о дожде. Мы еще вернемся к Делюку в главе VI.

Наиболее настойчиво указывал на влияние местности Дю Карла в книге, уже упоминавшейся в главе III [109], и в более поздних статьях [110]. Он приводил дюжины примеров того, как ветер откладывает приносимую им влагу на наветренных склонах гор. Наиболее впечатляющий пример этого дают южноамериканские Кордильеры, достаточно высокие для того, чтобы захватить почти всю влагу, приносимую восточными ветрами, так что затем они приходят в Перу, как выжатая губка, и высушивают все по дороге, стремясь восстановить свою влажность. В статье 1781 г. Дю Карла поясняет эту идею, предлагая представить себе стену в несколько тысяч саженей высотой на меридиане Парижской обсерватории и постоянно дующий восточный ветер. Это, говорит он,

«приведет к тому, что в Венсенне будет вечный потоп, а Марли превратится в абсолютную пустыню, хотя Венсенн и Марли отстоят друг от друга менее, чем на шесть лиг» ([110], стр. 447).

* „gleet“ — просачиваться, медленно течь (вышедшее из употребления слово) — см. Оксфордский словарь английского языка.

** См. выше, стр. 84.

*** См. стр. 84.

Если бы ветер дул с запада, то распределение климатов было бы обратным. Стена — или горный хребет — меньшей высоты лишь частично осушала бы текущий над ними воздух, но даже очень небольшое возвышение будет заставлять осаждаться часть влаги из насыщенного воздуха. Вообще говоря, влажными ветрами являются ветры восходящие, а сухие ветры — те, которые опускаются.

Книга Дю Карла, которая, конечно, не могла быть издана очень большим тиражом, привлекла внимание меньше, чем она заслуживала. Он не только подчеркнул значение гор для образования дождя, но и ясно представлял себе причину образования «стационарных» облаков с подветренной стороны гор. Он был также, насколько я знаю, первым, кто понял, что воздух может быть вытеснен вверх протекающим под ним потоком более плотного воздуха, хотя он и относил это представление только к Центральной Африке. Соответствующая цитата гласит:

«Солнце, перешедшее в северное полушарие, находится над Лунными горами в начале апреля. Это там, где располагаются «глаза» Нила; покрывающий их воздух, более разреженный в это время, чем весь остальной воздух на этом же меридиане, вытесняется вверх воздухом с севера, который, как приходящий из районов зимы, наиболее уплотнен...» ([109], стр. 27).

6. Конвекция

Мы уже отмечали, что Дю Карла, вероятно, независимо от Франклина и Ламберта, обнаружил, что неравномерное нагревание различных частей местности создает конвекцию *. Всякий раз, когда поверхность гор теплее, чем воздух, возникают восходящие течения, приводящие к конденсации и, в конечном счете, к дождю. Заслуживает внимания и та идея Дю Карла, что горные вершины почти постоянно оказываются теплее, чем окружающий их воздух, благодаря внутреннему теплу Земли. Более того, он, по-видимому, думал, что горы сохраняют почти постоянную температуру в 10°R во все сезоны.

Соссюр, читавший Дю Карла, развил сложную теорию поднятия пара конвекцией [308]. Он исходил из того, что первоначально имеется совершенно сухая атмосфера над влажной поверхностью земли, нагреваемой солнцем. Воздух, нагреваясь, поднимается и «непрерывно замещается северным ветром». Вероятно, он думал при этом о Женеве, где ветер, называемый «séchard» («осушающий ветер»), поднимается при установившейся хорошей погоде около 8 или 9 часов утра.

* См. выше, стр. 58.

Если вместо этого воздух уже насыщен, то вблизи земли будут образовываться отдельные облачные частицы — конечно, «пузырьки». Однако затем они снова рассеиваются слегка нагреваемым воздухом, и этот воздух увлекается вверх вертикальными течениями до уровня, где снова могут образовываться облака. Плотность облаков будет расти, пока будет продолжаться приток пара, но в конце концов они прекратят доступ солнечного света и тепла к нижним слоям и облака опустятся или начнется дождь.

Соссюр часто пишет о *столбе* воздуха, смежных столбах и т. д.; это позволяет думать, что у него имелось хотя бы смутное представление о том, что мы теперь называем ячейками конвекции. В заметке на стр. 277 его «*Essais*» он пишет, что поднимающийся воздух должен замещаться ветрами, дующими из более прохладных районов. Но он не уяснил это себе полностью, как, очевидно, и Делюк, который в 1787 г. энергично отрицал существование восходящих течений воздуха ([90], стр. 600, 651). Один из его доводов состоял в том, что если теплый воздух поднимается под действием тепла, получаемого им от солнца, то он не будет становиться холоднее на вершинах гор, хотя, как мы сейчас увидим, этот довод был опровергнут И. Г. Ламбертом. Но некоторые из его возражений настолько нелепы, что их можно объяснить лишь желанием любой ценой опровергнуть идею вертикальной конвекции, поскольку она угрожала собственной теории Делюка о дожде, которая будет рассмотрена в следующей главе. Например:

«Г-н Де Соссюр продолжает говорить о *столбе*, но все рассматриваемые причины являются общими для очень большой части полушария, освещенной солнечными лучами» ([90], стр. 661).

Я не склонен думать, что такой бывалый альпинист, как Делюк, не понимал — хотя бы тогда, когда на это обратили его внимание, — что воздух над склоном, обращенным к югу, будет нагреваться значительно больше, чем над склоном, обращенным на север. Нельзя ожидать, чтобы он знал, как мы это знаем теперь, что различные поверхности неодинаково отражают и поглощают тепло, но, несомненно, различие между скалами и снегом он мог заметить. *

В тот же период Эндрю Оливер из Салема, Массачузетс, использовал понятие конвекции, чтобы объяснить смерч [258], и на протяжении многих лет лучшего объяснения этого поразительного явления не было дано.

* См. также выше, стр. 76.

7. Охлаждение при разрежении

Дю Карла ясно понимал, что именно разрежение поднимающегося воздуха приводит к конденсации части содержащейся в нем воды, и даже утверждал, что количество осадков на единицу площади за единицу времени пропорционально скорости подъема ([109], стр. 29). Но знал ли он, что существует необходимая связь между разрежением и охлаждением? Очевидно, да, ибо в 1781 г. он ясно говорил, что

«воздух ... не может подниматься в атмосфере, не охлаждаясь и не разрежаясь и не теряя, *по той и другой причине*, своей способности содержать в растворе инородные субстанции».

Из слов, выделенных мною курсивом, ясно, что его познания о процессе были полностью эмпирическими и что он верил, что одно разрежение способно вызвать конденсацию водяного пара. Это представление господствовало среди ученых, начиная со времени эксперимента Герике с «облачной камерой».

В 1755 г. Уильям Кэллен, позднее профессор медицины в Глазго, заметил охлаждение воздуха, подвергавшегося в лаборатории быстрому расширению, но приписал это испарению первоначально содержащейся в приборе воды [65]*. Теория не прогрессировала до опубликования И. Г. Ламбертом его «*Rugometrie*» в 1779 г., где он объяснил как это явление, так и нагревание воздуха при сжатии изменением концентрации частиц «жара», т. е. упругой жидкости, из которой, как предполагалось, состоит тепло [203]. Легко увидеть, как логично было это объяснение. Но Ламберт сделал более того. Он теоретически объяснил понижение температуры с высотой в зависимости от относительной легкости «жара». Отметив, что тепло поднимается в воздухе, он продолжает:

«Такое восходящее движение тепла продолжается в воздухе все время. Поскольку тепло, получаемое Землей в течение года от Солнца, поднимается в воздух, то Земля нуждается в новом тепле от солнца для того, чтобы не охлаждаться все больше и больше. Так как движение тепла вверх зависит от его меньшего веса, его скорость будет продолжать возрастать по мере подъема. В результате частицы жара, следующие друг за другом вверх, все больше и больше отдаляются друг от друга — явление того же рода, что можно увидеть, если наблюдать за падающей сферой через каждую десятую секунды. Расстояние между ними будет увеличиваться соответственно ряду чисел 1, 3, 5, 7 и т. д. По этой причине плотность частиц жара в верхних слоях воздуха меньше и воздух там, таким образом, холоднее» ([203], стр. 232).

Это в высочайшей степени ясное объяснение, по-видимому, не было замечено метеорологами.

* См. также [199].

Так или иначе, заново за разрешение этой задачи взялся исключительный человек — Эразм Дарвин, дед Чарльза Дарвина, — который был недооценен в значительной степени благодаря тому, что писал стихи, быстро вышедшие из моды, и придерживался политических взглядов, ставших немодными еще быстрее.* Но он был человеком многосторонним, и для нас особо интересна его статья, написанная в 1788 г. [80], в названии которой изложена программа: «Эксперименты с охлаждением воздуха механическим расширением, объясняющие причину великого холода на вершинах высоких гор, внезапной конденсации воздушного пара и постоянных превращений атмосферного тепла».

Таких «холодильных экспериментов» было четыре, а именно:

1) когда воздух из «баллона приемника пульверизатора» направляется на шарик термометра — ртуть опускается;

2) она опускается также, если термометр поместить в сосуд, воздух из которого выкачивается воздушным насосом;

3) она опускается, когда шарик подставлен под струю воздуха из «воздухосборника фонтана», т. е. из сосуда, который, кроме того, что в нем собирается воздух, сглаживает пульсации, вызываемые поршневым насосом;

4) наблюдение, о котором в 1761 г. сообщал (К. Ф.?) Вольф; речь идет о том, что у выходного отверстия «Фонтана героя» в Венгрии, которое находилось на высоте 260 футов, скапливались снег и лед [369]**. Все это, говорит Дарвин

«служит хорошим основанием для вывода, что при всех обстоятельствах, когда воздух подвергается механическому расширению, он становится способным притягивать вещество флюида тепла от других тел, соприкасающихся с ним» ([80], стр. 47).

И он совершенно правильно использует это явление для объяснения холода в горах и в высоких слоях воздуха, что уже начало тогда подтверждаться воздухоплавателями, поднимавшимися на воздушных шарах***. Он также вычеканил новое слово «devaporation», являющееся синонимом конденсации пара, но на самом деле лучшее, поскольку «конденсация» может также означать и другие явления, как по этимологии, так и по употреблению. Но Оксфордский словарь английского языка, который ссылается на Дарвина, приводя это слово, не нашел, к сожалению, продолжателей.

* Смелая попытка реабилитировать его была сделана Десмондом Кинг-Хили. Кинг-Хили, математик и физик, с чутьем к литературной критике, — один из немногих людей двадцатого столетия, столь же многосторонних, как Эразм Дарвин.

** Вольф приписывал замерзание действию «соленой, азотистой и серной воды» в источнике.

*** Подъем Шарля в Париже, впервые взявшего с собой в полет термометр и барометр, был совершен в 1784 г. (Прим. ред.)

В своей статье он также отмечает, что при «воздушной де-вапорации»

«некоторое количество тепла высвобождается вместе с избытком девапорации (т. е. с конденсатом) и атмосфера становится теплее, чем перед началом конденсации» ([80], стр. 51),

но это, конечно, было ссылкой на принадлежавшее Джозефу Блеку открытие скрытого тепла, которое формально не было опубликовано Блеком, но было хорошо известно группе людей в Бирмингеме, к которой принадлежали как Эразм Дарвин, так и Джеймс Уатт и Джозеф Пристли [319].

Джон Дальтон удовольствовался в 1793 г. только тем, что интерпретировал нагревание воздуха при сжатии как результат осаждения части содержащегося в нем пара, отдающего свое скрытое тепло воздуху. Он, очевидно, оставался при этом мнении до 1834 г. ([67], 2-е изд.). И, действительно, роль скрытой теплоты конденсации в явлениях погоды начала становиться понятной только в 30-х годах 19-го столетия.

Мы как будто ушли далеко в сторону от собственно теории дождя, но уместность этих рассуждений обнаружится в главе VIII, когда речь пойдет о развитии науки в 19-м столетии.

8. Теория дождя по Хэттону

В том же году, что и статья Эразма Дарвина, была опубликована теория дождя, представленная на обсуждение Королевскому обществу в Эдинбурге несколько ранее, в 1784 г., знаменитым шотландским геологом Джеймсом Хэттоном, чья «Theory of the earth» была вехой в истории этого предмета. Свою статью, озаглавленную «Теория дождя [181], Хэттон начал с вопроса, почему дыхание видимо в холодную погоду. Это не может быть объяснено, говорит он, «общими законами тепла и холода», а должно зависеть от «растворяющей способности» воздуха, неравномерно изменяющейся с изменением температуры. Известно, что более теплый воздух «растворяет» больше воды, но какова точная связь между температурой и «растворяющей способностью»? Она может иметь один из трех видов (рис. 1): прямой линии mr , некоторой кривой mkr , выпуклой вверх, или некоторой кривой mer , выпуклой вниз. Если теперь ординаты am и br характеризуют количества воды, необходимые для насыщения заданного объема воздуха при температурах a и b , то количества «растворенной» воды (т. е. находящейся в парообразном состоянии) или нерастворенной при любых отношениях смеси насыщенного воздуха при этих двух температурах будут характеризоваться ординатами прямой mr .^{*} Таким образом, если бы

^{*} Тейлор [332] возражал, что это не является, как предполагал Хэттон, аксиомой, и доказал это.

закон представлялся линией mr , то все смеси насыщенного воздуха навверняка были бы насыщенными. Если одна или обе составные части не были насыщенны, то никакая их смесь не была бы насыщенной.

Но если закон описывается, например, кривой mer и смешиваются любые количества насыщенного воздуха при температурах a и b , тогда or , например, т. е. количество имеющейся воды, будет равно количеству oe , требующемуся для насыщения смеси, плюс er , которое появится в виде жидкой воды. Если кривая имеет вид, подобный mkr , то любая такая смесь будет ненасыщенной, поскольку $ok > or$. Сам тот факт, что дыхание и пар ста-

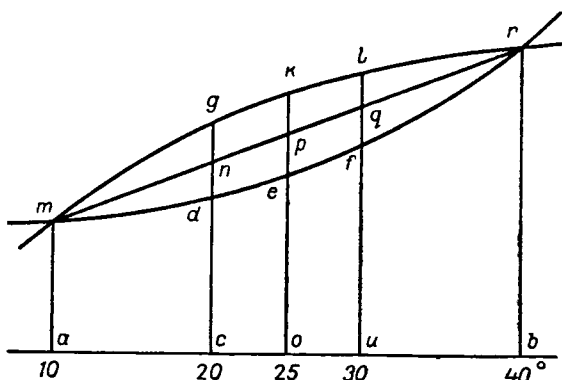


Рис. 2, иллюстрирующий теорию дождя по Хэттону.

новятся видимыми, показывает, что кривая не может иметь такую форму и что «растворяющая способность» воздуха является возрастающей функцией температуры.

Видимая конденсация требует достаточной степени насыщения в двух смешиваемых атмосферах. «Достаточно, чтобы разность температур смешиваемых порций более чем компенсировала бы недостаток точки насыщения» [181]. Хэттон легко мог показать это на графике, но не сделал этого.

Он считал, что такое смешение и есть основная причина дождя и снега, и приводил в поддержку этой идеи два случая, когда снег образовывался после того, как очень холодный воздух внезапно проникал в теплое помещение, — наблюдение, вообще говоря, не необычное для зимы в субарктических климатах. Но это далеко не всегда так. Он утверждал, что если бы конденсация не происходила при смешении нижнего полярного течения и верхнего экваториального, то на протяжении всего лета мы имели бы засуху, а всю зиму — дождь. У нас нет места для изложения во всех подробностях более тридцати страниц in quarto «Теории дождя применительно к явлениям природы»,

составляющей часть II его статьи ([181], стр. 52). Он сделал благородное усилие, но статья его страдала от одного фатального недостатка: рассуждения ее были качественными, и если бы он мог выразить их в числах, то увидел бы, насколько это смешение недостаточно, даже если бы удалось показать, что оно имеет место. То, что в холодную погоду дыхание становится видимым, как пар над котелком, превосходно объясняется его теорией, но среди метеорологических явлений лишь небольшой класс туманов действительно образуется в результате указанного им процесса.

На теорию Хэттона немедленно напал Ж. А. Делюк ([90], стр. 580), который не признавал результатом смещения даже видимое дыхание животных или пар над котелком, не говоря уже о каком-либо дожде. В этом отношении аргументы Делюка совершенно неубедительны. Хэттон ответил статьей, представленной Обществу в декабре 1787 г. [182], в общем очень вежливой, однако в конце ее он позволил себе заметить, что

«...любой человек, читавший последние публикации [Делюка], вряд ли будет ожидать, что наш автор при его метеорологических идеях будет в этом случае свободен от предвзятости» ([182], стр. 55).

В следующей главе мы увидим, насколько это было справедливо. Хотя я читал книги и статьи Делюка по этому вопросу с интервалом в двадцать лет, я только недавно понял, что в 80-х годах он был жертвой навязчивой идеи: он не мог стерпеть, чтобы кто-либо еще предложил теорию дождя, отличающуюся от его собственной теории. Как только он увидел ответ Хэттона, он написал ему длинное письмо, датированное 4 декабря 1789 г., и поспешил отдать его в печать в «Monthly Review» [91]. Здесь он повторяет свои прежние доводы и затем говорит, что возражает не против гипотезы смещения, а против основанной на ней теории дождя. Характерно, что он даже претендует на первенство в создании этой гипотезы. Затем на одном численном примере он показывает количественную недостаточность теории, и этот единственный параграф оправдывает письмо. Я не нашел, что об этом думал Хэттон, но нет сомнений, что Делюк был гораздо более умелым спорщиком. На обвинение в предвзятости он отвечает в конце письма забавной жалобой на то, что его новые идеи также заставили его отказаться от *его собственной* прежней теории, так что несправедливо обвинять его в небеспристрастности!

Теории Хэттона следовало бы умереть ранней смертью, но она продолжала жить в энциклопедиях. Джон Лесли был

* В приложении к 4, 5 и 6-му изданиям Британской энциклопедии („Encyclopaedia Britannica“, Edinburgh, 1824, vol. 5, p. 359—360).

удовлетворен ею еще в 1824 г. [218] *, но в 1833 г. Люк Говард во втором издании своей знаменитой книги о климате Лондона уже почувствовал, что наступило время поработать над ее разрушением. Отбрасывая «хэттоновскую теорию дождя», он писал:

«Наиболее надежный путь, которым мы можем пойти, обсуждая предметы, связанные с явлениями природы, несомненно путь прямой индукции по данным наблюдений и опытов: и на этом пути нам может быть разрешено пользоваться не только нашими собственными результатами, но также и опубликованными результатами других. Тем не менее иногда случается, что лишь беглая реплика изобретательного мыслителя, особенно если она подкрепляется видимостью математического доказательства, находит общее признание из уважения к его имени и к его предшествовавшим трудам — *без малейшего притязания на экспериментальную проверку или какие-либо наблюдения природы*. Такова на самом деле столь превозносившаяся теория дождя Хэттона» ([179], I, стр. 124).

На этом сентенционном приговоре мы можем расстаться с этой темой.

ГЛАВА VI

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

Метеорологические явления... несомненно, обусловлены огромным числом химических процессов, только химия может рассеять мрак, окутывающей их причины, и проникнуть в их тайны.

Fourcroy „Système des connaissances chimiques“.

1. Введение

Восемнадцатый век стал свидетелем двух событий, которые весьма обеспокоили всех тех, кто всерьез интересовался метеорологией.

Первое из них по времени произошло между 30 и 60-ми годами, которые были периодом невероятно быстрого роста знаний о статическом электричестве *. Следующий период, занявший последние тридцать лет того же столетия и продолжавшийся в XIX в., обычно именуется как «химическая революция», хотя многие и чувствуют, что для такого преобразования это неподходящий термин. Оно хотя и оказалось чревато большими последствиями, но потребовалось много времени, чтобы это преобразование завершилось.

Но, как бы то ни было, не подлежит никакому сомнению, что химия за этот период развилась грандиозно **.

Влияние новых знаний об электричестве на метеорологию было в действительности не очень велико; о нем будет кратко сказано в начале этой главы. «Химический» эпизод в истории гидрометров интереснее и сложнее. Он и составит важнейшую часть главы VI.

* Для краткого ознакомления см. книгу Э. Уиттекера ([358], гл. 2).

** См., например, [262], главы V—IX.

2. Электрические теории

Примечательно, что большинство догматических утверждений о влиянии «электрического огня» на погоду было высказано энтузиастами, заимствовавшими свои знания об электричестве из вторых рук. В XVIII в., за исключением, возможно, Беккариа, великие экспериментаторы в области электричества — такие люди, как Франклин, Уатсон и Нолле, — были более осторожны в своих метеорологических гипотезах. Как только была открыта электрическая природа молнии, изучение атмосферного электричества быстро пошло вперед, и сразу же было обнаружено, что дождевые капли почти всегда несут электрический заряд. Однако тема об атмосферном электричестве лежит вне рамок этой книги, и поэтому мы ограничимся только предполагаемым влиянием электричества на образование и выпадение осадков*.

Бенджамин Франклин первый предложил теорию дождя, в которой электричество играло существенную роль. Она была изложена в письме, написанном Джону Митчелу, члену Королевского общества, и датированном 29 апреля 1749 г. Письмо было прочтено перед Обществом, но принято им было холодно и увидело свет только в 1751 г.** В 1749 г., за три года до знаменитого опыта со змеем, Франклин придерживался мнения, что атмосферное электричество — то же, что и электричество в лаборатории. Он считал, что «электрический огонь» содействует «всеобщему огню» при расширении воздуха. Таким образом, разряд «электрического огня» способствует сближению друг с другом частиц облака так, что некоторые из них соприкасаются и сливаются. Может быть два механизма разряда сильно заряженных облаков, приходящих с моря. Облака могут войти в соприкосновение с горами (которые также и охлаждают их), а при отсутствии гор облако с моря может встретиться лишь с заряженным облаком, образовавшимся над сушей, и разрядиться вспышкой молнии.

По более поздним довольно беглым статьям Франклина по этому вопросу можно догадаться, что он не отстаивал эту теорию сколь-нибудь энергично.

Следующим, кто сообщил Томасу Берчу, бывшему тогда Секретарем Королевского общества, о своих соображениях по поводу электрической теории взвешенных паров и выпадения дождя, оказался ирландец Генри Илс ([115], стр. 124—154). Илс, по видимому, сам проводил эксперименты. Он полагал, что пар и туман поднимаются, поскольку электрический огонь, добавленный в них, делает их легче воздуха. В случае если частицы пара или тумана «сближаются внутри области их сил отталкивания» и

* Исключая град, о котором пойдет речь в главе X.

** См. Франклин [130], стр. 36—49. Это письмо было проанализировано Дж. Б. Коэном [60].

коагулируют, суммарная поверхность уменьшится и таким образом их электрическая жидкость будет передана другим частицам; они поэтому станут тяжелее и начнут падать, сталкиваясь по пути с другими частицами. Нам трудно понять, почему электрическая жидкость вообще участвует в этом последнем процессе, разве что лишь для того, чтобы отделаться от электричества, которое было нужно, чтобы содействовать поднятию пара. Все поднимающиеся пары электризованы, утверждает он; он провел эксперименты для доказательства этого положения.

Берч письменно сообщил, что Королевское общество будет радо услышать об этих экспериментах, и в другом письме Илс описывает их ([115], стр. 151—154). Он соорудил гигантский электроскоп, в котором две пушинки были подвешены на тонких шелковых нитях, закрепленных за середину горизонтальной нити длиной восемь футов. Когда пушинки были заряжены либо смоляным, либо стеклянным электричеством, их нельзя было разрядить дымом, паром из котелка, дыханием и всеми «парами и туманами», какие только он мог придумать. В его интерпретации это означало, что восходящие пары должны быть «либо непроводниками (electrics), либо наэлектризованными проводниками (nonelectrics)».

Конденсируя восходящие пары на поверхности сургуча и на стекле, которые сразу становились проводящими и разряжали пушинки, он установил, что они неэлектрики (т. е. проводники).

Хотя эта теория казалась очень остроумной, в одном из своих ранних творений молодой Эразм Дарвин произвел весьма меткий выстрел по ней ([79], стр. 240—254). Дарвин заметил, что к изолированному перышку можно даже несколько раз прикоснуться пальцем и оно при этом не потеряет свое электричество. Он также утверждал, что подъем пара, взвешенное состояние облаков и выпадение дождя могут быть объяснены без участия электрических сил.

Примерно в то же время изучал электричество в лаборатории и в атмосфере итальянский физик Джованни Батиста Беккариа. Он подметил, что струя воды, вытекающая из трубки, разбивается на мелкие капли, когда трубка заряжена, а также что капли дождя при этом электризуются. Изучая эти явления, он построил электрическую теорию дождя.

«... дождь начинает формироваться с момента, когда некоторый неизменный и непрерывный поток электрического огня начинает течь между облаками и землей... Я покажу, что такой поток наилучшим образом подходит для создания многообразия систематических явлений природы» ([30], стр. 302).

Он предполагает далее, что земля является одним зажимом, а верхняя часть облаков — другим; движения потока электричества между ними могут рассеивать облачные частицы или концентрировать их, пока они не сольются и не выпадут. Он

подкреплял это утверждение ссылкой на свои наблюдения с электроскопом до, во время и после дождя.

Ошибка Беккариа, разделенная затем большим числом гораздо менее способных людей, заключалась в том, что он хотел видеть аналогию между электрическими явлениями в атмосфере и явлениями, полученными искусственным образом в лаборатории. Было бы утомительным и неблагодарным занятием подробно рассматривать все эти идеи*, поэтому я закончу ссылкой на широко известного химика Ричарда Кирвана. Дождь, говорил он,

«есть непосредственный результат объединения частиц, образующих облака, и это объединение есть следствие исчезновения атмосферного электричества, которое удерживало их ранее на расстоянии друг от друга...» ([190], стр. 220).

Он подкреплял эту идею вполне правдоподобными аргументами; например, южные ветры, по его словам, сильнее электризованы, чем почва в более северных странах, а следовательно, значительное количество содержащегося в ветре пара быстро утратит часть своего электричества и превратится в облака. Даже орографический дождь он объяснял электрической причиной ([190], стр. 226—227).

Была всегда, вероятно, какая-то внутренняя необходимость связывать выпадение осадков с электричеством. Во всяком случае не далее как в 1929 г. двумя очень авторитетными метеорологами была опубликована работа, предполагающая применение к проблеме результатов теории коллоидов [311]. Однако сейчас мы уже не считаем, что электрическое состояние облаков оказывает большое влияние на образование осадков.

3. Химическая метеорология

Химия была введена в метеорологию в конце 17-го столетия выдающимся французским химиком Никола Лемери. Все многообразие явлений природы — землетрясения, ураганы, молнии и гром — он хотел объяснить соединением серы и железа в глубине Земли ([213], стр. 101—110). Эта фантазия родилась из эксперимента с железными опилками и жидкой серой, при котором выделялось большое количество тепла и часто возникало пламя. По его словам, серные испарения от этой реакции вызывают ураганы; и он советовал людям, застигнутым ураганом, лечь ничком и уткнуться ртом в землю, «не только для того, чтобы не сдуло, но также чтобы не дышать этим горячим серным ветром, от которого можно задохнуться» ([213], стр. 105). Не лишне заметить, что Лемери был убежденным картезианцем.

* Несколько примеров этих идей можно найти в [2], стр. 14—23, [114], стр. 395—405, [180].

По существу, химия начала влиять на теорию дождя после того, как Блеком, Кавендишем, Пристли, Шееле, Лавуазье и другими были открыты и идентифицированы различные виды «воздухов» (газов); в частности, позже было установлено, что обыкновенный воздух не простая или элементарная субстанция, а смесь (главным образом) двух газов, называемых теперь азотом и кислородом, и что вода состоит из водорода и кислорода. Все эти выводы приходится на период между 60 и 90-ми годами XVIII в., особенно на 80-е годы.* Вода и воздух — «сырье» метеорологии, и вообще неудивительно, что химические открытия, связанные с ними, должны были оказать влияние на предмет метеорологии. А то, что это влияние оказалось таким обширным и проявилось столь решительно, было главным образом делом рук Жана Андре Делюка.

Делюк стал близким другом Джеймса Уатта, великого создателя паровой машины, и приобрел известность в кругу ученых мужей Бирмингема и ближних городов, известном как Лунное общество**. Одним из членов его был Джозеф Пристли, который в 70-х годах идентифицировал по крайней мере девять основных газов и в 1781 г. отметил, что вода образуется, когда водород («горючий воздух») взрывается в смеси с кислородом («воздух, лишенный флогистона») или с обычным воздухом. По-видимому, Делюк невзлюбил Генри Кавендиша, доказавшего в 1781 г. постоянство состава воздуха; в 1783 г. Делюк убеждал Уатта, что Кавендиш заимствовал одну из идей последнего ([319], стр. 375—376). Делюк, кажется, так никогда и не смог примириться с фактом, что воздух является смесью двух газов, а в 1790 г. он даже пришел к заключению, что теория состава воды необоснована ([92], стр. 375—376). Трудно избежать впечатления, что его личные взаимоотношения оказывали влияние на его научные идеи. Тем не менее было бы несправедливо пренебречь им, как чудачком или мистиком. Нельзя забывать, что ко времени опубликования в 1786 г. своих «*Idées sur la météorologie*» [90] он вел эксперименты с метеорологическими приборами и с замечательным постоянством размышлял об атмосферных процессах уже в течение примерно сорока лет. Молодым человеком он начал с попытки объяснить закономерности погоды — изменчивой погоды Швейцарских Альп, — и даже после отъезда (в 1773 г. он уехал в Англию) свои излюбленные примеры он продолжал черпать в горах, наверное, потому, что считал существенным иметь какую-либо информацию о верхних слоях воздуха, как бы скучна она ни была.

Следует отметить, что в 1786 г. метеорологические теории были весьма неясными и неудовлетворительными.

* Читатель может полностью в этом убедиться, обратившись к «Краткой истории химии» Партингтона [262].

** См. [319], особенно главы X и XI.

В действительности и не могло быть иначе, поскольку не было ни достаточной информации, ни необходимой фундаментальной физической теории. Реальным недостатком Делюка было полное отсутствие нужной ученому скромности; теория была необходима — и такую теорию он стремился создать. То, что, возможно, было вначале его гипотезой, превратилось в навязчивую идею, и, как результат этого, все «неудобные» открытия других ученых попросту игнорировались или же подвергались энергичным нападкам.

Сами «*Idées sur la météorologie*» являются громоздким документом, предельно многословным, с аргументами, повторяющимися более чем на тысяче страниц. Документ этот не улучшает обилие фраз, выделяемых курсивом на каждой странице. Большая часть его первого тома, на которой нам здесь нет смысла задерживаться, посвящена разногласиям с О. Б. Соссюром относительно качества предложенных ими обоими гигрометров. За этим следуют «Пары, рассмотренные как класс расширяющихся флюидов» — 459 страниц. Согласно Делюку, отличительной особенностью расширяющихся флюидов является то, что они образованы из вполне материальной субстанции и из флюидов выноса («*deferent*») ([90], § 113). Пары отличаются от «воздушных флюидов» тем, что в парах слабо взаимосвязаны две компоненты флюидов. Говоря о «парах», Делюк чрезвычайно подробно описывает два особо важных вида флюидов: «флюиды электричества» и «огня». Огонь не является элементом, хотя он и образован светом, который действует как флюид выноса, и из вполне материальной субстанции, которую он называет огненным веществом (*matière du feu*). Эта последняя лишает свет его свойства создавать яркость, давая ему возможность производить тепло. То, что огонь (не свет) сам выступает как флюид выноса для всех газов (воздушных флюидов), выясняется много позднее ([90], § 261).

Подобным же образом Делюк предполагал, что «электрические флюиды» состоят из весомого (материального) флюида и флюида выноса. Он посвятил около 300 страниц обстоятельнейшему обсуждению с этой точки зрения многих экспериментов со статическим электричеством. В конце первого тома он излагает свое кредо:

«Таким образом, я заключаю из всех этих рассуждений, что, стремясь объяснить великие явления, особенно в метеорологии, нельзя ограничивать число различных субстанций лишь теми, которые непосредственно нам известны. Особенно это относится к классу флюидов, способных расширяться, чрезвычайная важность которых в метеорологических явлениях нам только начинает приоткрываться. Атмосфера — это химическая лаборатория, столь же существенная для физических явлений, происходящих на нашей планете, как и недра Земли. Пока мы в своих умозаключениях перепрыгивали через барьеры наших чувств и приписывали сходным следствиям одинаковые причины, мы могли

видеть лишь грубый внешний облик Природы, даже обыкновенные явления были темны для наших глаз, и мы видели лишь грубую внешность Природы. Это — то, что я собираюсь показать с помощью примеров в последней части этой работы» ([90], § 535).

Здесь мы сталкиваемся как бы с манифестом химика. Если известные субстанции не могут служить для объяснения явлений, тем лучше, давайте вообразим субстанцию, которая сможет это сделать. Иногда Делюк, по-видимому, переставал видеть разницу между отождествлением газов, которое сделал Пристли, и простой выдумкой.

Но прежде чем приступить к рассмотрению второго тома «Идей», следует особо подчеркнуть, что существовали две мысли, чрезвычайно важные для нашего предмета, против одной из которых Делюк энергично возражал, а вторую оставил вовсе без внимания.

Первая идея — о вертикальной конвекции, обсуждавшаяся Ламбертом и использованная Соссюром и Дю Карла.* Как мы видели в главе V, Делюк не мог или не желал допустить существования восходящих потоков. К сожалению, его собственные произведения позволяют обвинить его в неискренности. Так, в восторженном описании горного путешествия, продланного им с братом в 1770 г., он сообщает, что они наблюдали облака наутро после ужасной штормовой ночи.

«Некоторые из них распались, достигнув скал, ограничивавших наше поле зрения. Другие же, одно за другим, поднимались вертикально вдоль этих скал и сливались с шедшими поверху облаками. Очевидно, что скалы, сохранившие часть тепла, полученного в течение дня от солнца, заставляли расширяться как соприкасавшийся с ними воздух, так и сами облака, образуя восходящее течение воздуха, как в наших дымовых трубах» ([88], § 916).

Это было еще до того, как возникла его собственная теория, которую он затем отстаивал любой ценой.

Вторая идея касается связи подъема воздуха с его охлаждением, доказанной Ламбертом в 1779 г. [203]** с использованием материальной теории тепла; эту теорию Делюк мог принять во внимание. Конечно, нельзя утверждать, что Делюк когда-либо читал «Пирометрию» Ламберта; по-видимому, сравнительно немногие тогда познакомились с ней. Однако очень интересно представить, сколь значительны были бы расхождения во мнениях, если бы он ее прочел. Безусловно, полное признание этих двух идей — конвекции и охлаждения при подъеме — сделало бы ненужной собственную теорию Делюка и это продвинуло бы метеорологию на полстолетия.

* См. выше, стр. 91.

** См. выше, стр. 93, и [203].

Почти в самом начале второго тома «Идей» Делюк определяет проблему, которая является поистине стержнем книги: «В каком состоянии находилась вода перед началом дождя?» ([90], § 538.) Он ставит под сомнение обычное объяснение, что она находилась в виде пара, благодаря случайному наблюдению в горах в 1770 г., когда с его альпенштока соскочил металлический наконечник. Малая влажность наверху, вызвавшая это происшествие, была подтверждена гигрометрическими измерениями, сделанными Соссюром и им самим. Он ссылается, в частности, на случай в 1772 г. в горах, когда гигрометр отмечал большую сухость воздуха, в то время как вокруг формировались тяжелые облака; то же происходило непосредственно после окончания сильной бури. Этот случай, продолжает он,

«глубоко врезался мне в память, особенно потому, что поверг мой ум в величайшее смятение касательно метеорологии. И хотя я не придерживался принятого мнения о причине испарения, у меня до этого времени не возникало сомнений, что дождь — прямая противоположность испарению. Но где же была эта вода, где же были все элементы бури, в то время когда мой гигрометр указывал на такую незначительную влажность даже в слое, где возникла гроза... Я придумывал гипотезу за гипотезой, чтобы примирить эти факты с гидрологией*, и все тщетно. Во время этих моих размышлений пошел дождь, и в моей памяти всплыли все виденные мной в горах случаи дождя... Постепенно каждое из этих явлений укрепляло мою уверенность в том, что все виденное мной в горах дает ключ к ответу.

*Дождь не является прямой противоположностью испарению — таково основное заключение, к которому меня привело это исследование»** ([90], § 564).*

Нет сомнения, что Делюк был введен в заблуждение своим гигрометром, который был неточным, обладал значительным температурным коэффициентом и, сверх всего, имел очень большую инерцию. Но он верил в него, и это определило его подход к метеорологическим проблемам на всю жизнь.

Мы не можем ступенька за ступенькой идти по длинной и извилистой лестнице аргументов, по которой Делюк наконец приходит к своему объяснению причины дождя. Следует, однако, выделить несколько главных ступенек. Одним из его первых действий было опровержение идеи, что вода при испарении «растворяется» в воздухе***. Эта идея пережила то время, когда она приносила пользу, но многие, особенно химики, упорно за нее цеплялись. Делюк без труда доказывает по крайней мере ее ненужность ([90], стр. 550—555), но, по-видимому, ему не удалось убедить в этом всех своих критиков.

* Гидрология — термин Делюка, обозначающий физику водяного пара.

** Курсив Делюка.

*** См. главу II, § 3.

Соссюр в своих «Essais sur l'hygrométrie» [308] указал несколько механизмов, которые могут способствовать образованию дождя: конвекция и приток воздушных масс с разными температурами. Ему, так же как и Делюку, мешала чрезвычайная сложность погоды в горах; кроме того, он не знал, что поднимающийся воздух должен охлаждаться. По этим причинам он не смог дать законченной теории дождя. Тем не менее на многих страницах «Идей» Делюк оспаривал объяснения, даваемые Соссюром, вновь и вновь отвергая возможность вертикальных токов и отрицая, что влажные и теплые ветры могут охлаждаться достаточно быстро для того, чтобы вызвать наблюдаемые обильные дожди ([90], стр. 571). Он видел, что небольшой дождь может образовываться, когда идущий с юга насыщенный воздух «проходит под или над» более холодным воздухом, однако не думал, что дождь при этом будет обильным ([90], стр. 574). И снова был потерян ключ — охлаждение, неразрывно связанное с подъемом.

Другой трудностью явилось то, что в атмосфере может содержаться сравнительно небольшое количество воды в парообразном состоянии. Соссюр дает среднее значение: 10 гран на кубический фут. Почему-то в то время не доходило до сознания ни Соссюра, ни кого-либо еще, что на самом деле это большая величина, соответствующая более чем $\frac{1}{4}$ дюйма осажденной воды в слое толщиной 1000 футов. Однако Соссюр думал, что содержание воды в облаках может быть много больше, чем ее содержание в воздухе в качестве пара ([308], стр. 268—270).

После захода солнца облака нередко рассеиваются и выпадает роса. Делюк говорит, что, поскольку невозможно думать, что в это время происходит нагревание воздуха, в котором плавают облака, так, чтобы эти последние распались, то, следовательно, появление и исчезновение облаков «абсолютно независимо от гигроскопического состояния воздуха» ([90], стр. 606). Затем он отмечает, что уже существующие облака кажутся постоянно испаряющимися и возобновляющимися; это приводит Делюка к одной из его аналогий:

«По моему мнению, наблюдаемым превращениям одного и того же облака лучше всего соответствует идея невидимого котла, подвешенного в воздухе, с бурно кипящей в нем водой. Это представление дает настолько точную картину наблюдаемого, что у них, наверное, имеются сходные причины. Это, как говорят, есть некая метаморфоза субстанции. К мысли о существовании в воздухе общего источника пара, который доставляет пар при определенных обстоятельствах, меня привело то, что пар образовывался в месте формирования облаков; что, пока пар продолжает образовываться, облака существуют и даже увеличиваются в размере, хотя все это время идет испарение, и что, когда облака распадаются, то это происходит потому, что их испарение не восполняется образованием новых масс паров» ([90], стр. 617).

Дождевые облака, полагает он, отличаются от других таким большим количеством образовавшегося пара, что пузырьки соприкасаются и соединяются и в конце концов некоторые из них лопаются, образуя капли, подобно большим мыльным пузырям. При движении вниз капли увлекают другие новые пузырьки.

Делюку кажется очевидным, что даже при продолжительном дожде «пара, из которого он образовался, не существует до его появления в облаках; он только непрерывно возникает, пока существуют облака и идет дождь» ([90], стр. 625).

Он опять и опять возвращается к доказательству ошибочности теории испарения за счет «растворения» даже в модифицированной форме, данной Соссюром, и неверно истолковывает последнюю как предположение, что водяной пар смешан с воздухом на всех высотах в неизменной пропорции. Соссюр, конечно, не предполагал ничего, столь очевидно противоречащего эксперименту, однако такая идея может быть логическим следствием теории, которая уподобляет «раствор» воды в воздухе растворению твердых тел в жидкостях. Мы увидим, что критики Делюка слишком много высказывались в пользу теории «растворения», вместо того чтобы критиковать его уязвимые места, его любовь к необоснованным аналогиям и его готовность постулировать не наблюдавшиеся и даже а priori не наблюдаемые субстанции.

Примерно после двухсот страниц он подходит, наконец, к своему великому «открытию». Рассматривая длительные периоды хорошей погоды, когда испарение происходит непрерывно, он приходит к заключению, что не может таиться в верхней атмосфере так много воды в форме пара. Итак,

«испаренная влага скрывается в атмосфере под видом некоего газообразного флюида (*fluide aériforme*), поскольку только в этом случае на возрастании парциального давления воды не будет сказываться увеличение ее количества и большие перепады температур, действию которых она подвержена» ([90], стр. 672).

Но время от времени в каком-либо слое воздуха флюид возвращается к своей водной форме и пар быстро насыщается, образуя облака и, наконец, дождь. Это и есть его великое «открытие» взаимопревращаемости воздуха и воды.

Это открытие, как Делюк хочет заставить нас верить, он сделал, изучая метеорологические явления; однако он не мог сформулировать предположение относительно механизма такого процесса. Вскоре после своего прибытия в Англию в 1773 г. он встретил Джозефа Пристли и был увлечен его экспериментами с газами. В 1782 г. ему сообщили, что вода образуется при сгорании «горючего воздуха» в «дефлогистированном воздухе». Свой восторг он выражает исключительно несерьезным образом:

«Я был в высшей степени потрясен этим открытием. Для меня идея представить воду в какой-либо эфирной форме была

тем же, что для моряков, потерявших свой компас и блуждающих в поисках берега, встреча с морскими птицами»* ([90], стр. 675).

Но далее и того больше. В апреле 1783 г. Пристли осуществляет несколько остроумных опытов с использованием глиняной реторты, в которых он впервые обнаружил, как ему казалось, превращение воды в воздух ([281], стр. 398—434).

Как он сообщил в опубликованной статье, позднейшие более тщательные эксперименты убедили его в том, что он имел дело с разделением газов при диффузии через стенки сосуда; однако тем временем Уатт, который верил, что вода может быть превращена в устойчивый газ, попытался интерпретировать эксперименты Пристли с глиняной ретортой. В конце письма к Пристли, датированного 26 апреля 1783 г., Уатт писал:

«Как я себе представляю, новым в этой статье является, во-первых, Идея, что дефлогистированный Воздух образован из Воды благодаря освобождению ее от Флогистона и присоединению скрытого тепла в количествах, больших, чем содержится в Воды или Пары; во-вторых, что Вода есть чистый воздух, лишенный части своего скрытого тепла и соединенный с Флогистонном; и приложение Ваших экспериментов состоит в доказательстве этих Гипотез».**

Делюк, конечно, знал о новой интерпретации Пристли своих экспериментов, но не принимал ее. В любом случае вода состоит из двух газов, и, заканчивая изложение своего «открытия» этого факта, он торжественно заявляет:

«Такова история появления воды впервые в виде воздуха... Я смотрю на это открытие как на рассвет великого дня в метеорологии. Менее чем шесть лет тому назад любого, кто предположил бы, что вода может существовать в виде воздуха, сочли бы фантазером» ([90], стр. 691).

Я не буду следовать за Делюком сквозь джунгли пневматической химии, которой он в этом месте посвящает пятьдесят страниц и которая, видимо, должна показать, что, чем выше температура сгорания органических веществ, тем больше получается из них воды. После этого он возвращается к атмосфере и немедленно заключает, что невозможно предположить накопление наверху исчезнувшего водяного пара в виде дефлогистированного воздуха и горючего воздуха***. Если бы молнии не взрывали эту смесь, то это сделали бы костры альпинистов.

* Oiseaux de mer; однако он, вероятно, имел в виду птиц, обитающих на суше.

** Это письмо было опубликовано Робертом Е. Скофилдом в ([318], стр. 294—299). Оно является важным документом в споре об открытии состава воды (см. [261]).

*** Т. е. кислорода и водорода. (Прим. ред.)

Это, конечно, поставило новую проблему. Для того чтобы ее разрешить, он даже ухитряется отрицать, что атмосферный воздух есть смесь двух газов, и наперекор Лавуазье приводит аргумент, что «vital air» и «metaphitic air»*, обладая различными удельными весами при спокойной погоде, разделялись бы. А следовательно, атмосферный воздух является «однородной упругой жидкостью, каждая частица которой содержит могущие выделяться из нее составные части и наверняка многие другие, еще неизвестные» ([90], стр. 726). Теперь он приходит к основному пункту: ему кажется, что пар может существовать в виде обычного воздуха с момента испарения до того времени, когда он вновь обратится в облако. Делюк полагает, что обычный воздух содержит «жар» (le feu) и составные части воды. Если это так, то зависит от некоторых особых обстоятельств: образуют ли эти составные части, присоединив жар, водяной пар или атмосферный воздух» ([90], стр. 730).

Ухватившись за выуженные из работ Кавендиша и Пристли указания, часть из которых обусловлена неточностью эксперимента, Делюк делает очередное предположение, что характерная субстанция азотистого воздуха содержится в атмосферном воздухе и что именно благодаря ей воздух отличается от водяного пара. А коли так, то, по его мнению, могут быть разрешены и основные проблемы метеорологии.** Но для подкрепления этих своих идей ему неожиданно оказывается нужным его же тезис, направленный в значительной степени против Соссюра: что солнечные лучи не непосредственно нагревают тела, а образуют тепло только при соединении с некоей субстанцией. Доказательству этого он отводит девятую страниц, где снова говорит о своем полном неверии в возможность конвекции. В конце этого рассуждения, проследивать которое я не буду, мы начинаем понимать его упорство в этом вопросе:

«Хотя теперь имеется некое основание для сделанного мной выше аналитического сравнения водяного пара и атмосферного воздуха, показавшего, что их существенное отличие есть то, что составной частью воздуха является основа азотной кислоты, то не есть ли это свет, который совместно с одной из составных частей воды также производит субстанцию, являющуюся необходимой слагающей этой кислоты?» ([90], стр. 807.)

На этом его гипотезы не кончаются. Предлагая свое химическое объяснение дождя, он спрашивает, почему облака, из которых выпадает дождь, образуются над равниной всегда на некоторой высоте и часто довольно внезапно. Можно ли предположить, спрашивает он,

* Т. е. кислород и азот. (Прим. ред.)

** Был ли он знаком с предположениями Мейо [235]? (см. выше, стр. 68.)

«что превращение воздуха в водяной пар может обуславливаться его смешением с некоей разновидностью испарений с почвы, которые могут скопляться в некотором количестве в каком-либо слое воздуха, чтобы произвести это химическое действие?» ([90], стр. 835.)

Я попытался дать краткое изложение предельно запутанных и витиеватых доказательств Делюка в защиту его теории взаимопревращаемости водяного пара и воздуха. Я хочу обратить внимание на тот факт, что тогда уже пришло время для возникновения такого рода теорий, хотя еще и не наступил внезапный расцвет пневматической химии, который был делом рук Кавендиша и Пристли. Это было время, когда тепло почти всеми считалось веществом, а более правильные представления Бойля и Ньютона находились в тени. Свет (на этот раз по Ньютону) состоял из корпускул, и «электрическая жидкость» была точно так же материальна, как и другие. А поскольку все они вещественны, то можно было ожидать, что они вступают в химические соединения с весомой материей или, может быть, с любой другой. Вполне возможно, что в критический момент его размышлений на Делюка оказала сильное влияние трехтомная книга его соотечественника, Жана Сенебье, главного библиотекаря Женевской республики. Книга, название которой «Физико-химический мемуар о влиянии солнечного света на изменение существ во всех трех царствах природы», есть краткое резюме многих фантазий того времени [322]. Собственные обширные исследования Сенебье привели его к убеждению, что «свет — это не только колебание эфирной жидкости [Гюйгенс еще не был совсем забыт], а действительно совокупность (un composé) небольших тел, которые, конечно, могут объединяться с более крупными...» ([322], I, стр. 246).

И опять-таки:

«Огонь, электричество, флогистон и свет в большей или меньшей степени соединяются с субстанциями, подверженными их воздействию, и могут находиться в этих субстанциях в таком виде, что их присутствие там будет незаметно. Однако они могут обнаружиться в любой момент при обстоятельствах, необходимых для их появления» ([322], I, стр. 256).

Нетрудно представить себе влияние, которое оказали эта опрометчивая чепуха плюс все новые газы, обнаруженные Пристли, на человека, столь скорого на изобретение гипотез, как Делюк.

Делюк, безусловно, в первую очередь был метеорологом и во вторую — химиком. В 1790 г. он писал Ла-Метери, тогда издателю журнала «*Observations sur la physique*», что изучение метеорологических явлений заставило его отказаться от мнения, что вода образована соединением «жизненного воздуха» и «горючего воздуха», и от мнения (с которым мы уже встречались),

что воздух есть смесь двух газов ([92], стр. 363—379). Так как он убедил себя, что водяной пар превращается в воздух, идея о его превращении в два рода воздуха была бы лишена смысла. Он предположил также, что существует несколько неизвестных воздушных флюидов (малого удельного веса, так как они находятся в высоких слоях), которые, вероятно, образуются в различных почвах и переносятся ветром на далекие расстояния. Падение барометрического давления указывает, что удельный вес воздуха уменьшается и, поскольку пара недостаточно для этого эффекта, последний может быть вызван газами.

Так же объясняются отклонения, замечаемые при барометрической гипсометрии. Другой довод, подтверждающий наличие этих гипотетических субстанций, доставляет «инструмент, неудачно названный эвдиометром», который показывает, что «остаток атмосферного воздуха» в горах подчас больше, чем внизу. Вряд ли кто-нибудь представлял, насколько мало точно была в тот период эвдиометрия.

В другой статье ([92], стр. 278—290) Делюк выступает в адрес Лавуазье и «новых химиков» со справедливыми выражениями против допускаемого Лавуазье различия между водяным паром, образованным кипящей водой (упругая жидкость), и тем, который образуется в воздухе при более низких температурах. Лавуазье считает, что последний «растворен». Однако Делюк пытается доказать, что воздух — это не смесь газов, а однородная субстанция. После этого он делает дерзкую вылазку на вражескую территорию, утверждая по поводу кислот,

«что существует абсолютно неосязаемая субстанция, создающая все явления кислотности, и существуют другие субстанции, также совершенно неосязаемые, которые, соединяясь с первой, образуют различные кислоты. Эти сами по себе не ощутимые субстанции проявляются, только соединяясь с молекулами какой-либо жидкости» ([92], стр. 288).

В таких темных вопросах, по его словам, допустимо выдвижение гипотез «при условии, что они выдержат испытание временем». И это говорит человек, который в другой статье обвиняет Лавуазье в сообщении как фактов того, что в действительности было только гипотезами ([93], стр. 117—131). В этой статье 1791 г. он обзывает новых химиков «неологами» и подытоживает свои теории о дожде, чтобы опровергнуть новую химию.

Статьи по метеорологии, опубликованные в 90-х годах, полны химии. Эразм Дарвин, первым из членов Лунного общества уверовавший в новую химию ([319], стр. 297), поместил длинное описание ветра в своей научной поэме «The Botanic Garden». В ней он ссылается на «наши все еще неполные знания того, каким образом громадные области воздуха внезапно образуются и внезапно разрушаются» ([81], стр. 79). После длинного описания всех известных и многих предполагаемых взаимодействий

«кислорода» и «азота» воздуха с землей, морем, животными и растениями и после нескольких ссылок на опыты Лавуазье и Пристли Дарвин говорит о наличии в полярных областях «*officina acries*» — «мастерской, где воздух и производится, и разрушается». Его весьма вольные догадки о механизме этих предполагаемых процессов увлекательны, но слишком длинны, чтобы их цитировать.

Едва ли Делюк ожидал, что его революционная теория избежит критики. Соссюр, которого он особенно ненавидел, ограничился защитой своего гигрометра [309], но ссылаясь на его теорию дождя лишь для того, чтобы подчеркнуть, что они оба предполагают, будто испарение воды происходит за счет «жара» (*le feu*).

С более суровой критикой выступил Иоганн Тобиас Майер младший из Эрлангена ([234], стр. 371—383) в статье, которая интересна по двум причинам: во-первых, из-за своего названия, показывающего, что новую химию стали считать «французской химией», и, во-вторых, потому, что он показывает, как можно деликатно обойтись без выводов Делюка, ссылаясь даже при этом на конвекцию, адвекцию или охлаждение при подъеме. После воздействия тепла на воду, утверждает Майер, она соединяется с частицами воздуха (*an die Luftteilchen*). В этом состоянии она не воздействует на гигрометр, причем «воздух может быть насыщен водой, а гигрометр тем не менее показывает полную сушь» ([234], стр. 375). Это происходит, говорит он, потому, что воздух с гораздо большей силой, чем гигроскопические субстанции, притягивает воду.

Помимо этой связанной воды в воздухе есть механически рассеянная вода. Эта последняя отмечается гигрометром. Это как раз та вода, которая может выпасть в виде осадков при изменении температуры. Что же касается причины ливней, то ею может быть только изменение сил связи воды и воздуха, благодаря чему высвобождается достаточное количество воды; но он не знает, что меняет это притяжение. «В этом без сомнения играют роль электричество и свет. Но кто знает все другие тонкие субстанции, которые могут находиться в воздухе?» ([234], стр. 376.) Главное различие теорий Майера и Делюка в том, что последний хотел превратить воду в воздух, в то время как первый предполагал присоединение воды к молекулам воздуха.

Сразу вслед за этим спор о теории Делюка совершенно неразрешимо перепутался со спором о флогистоне и «французской химии», по крайней мере в трудах немецких ученых*. Среди них

* Профессор Партингтон говорит, что «немецкие химики были столь же готовы принять новые идеи, как и все другие ученые» ([262], стр. 136). Я склонен рассматривать это как преувеличение; антифранцузские настроения совершенно очевидно явствуют из немецкой периодической литературы того времени.

одним из наиболее решительных был хорошо известный физик, сатирик и многосторонний литератор Георг Кристоф Лихтенберг, бывший тогда профессором физики в Геттингене. Он много писал на эту тему; его первым значительным вкладом было предисловие к шестому изданию «Anfangsgründe der Naturlehre» Я. Х. П. Эркслебена ([123], стр. XXI—XLVII). В этой энергичной и неприкрыто националистической атаке на новую химию он использует теорию Делюка как палку против французов. Лихтенберг утверждает, что аргументация клеветников Делюка «вся состоит из чистой воды домыслов, основанных на аналогиях и предположениях», совсем не замечая при этом, что теория Делюка точно такова же.

Одной из жертв Лихтенберга оказался частный учитель из Ростка Йон Дитрих Отто Цилиус. Цилиус написал в «Geg's Journal» в том же роде, что и Майер, хотя, очевидно, и независимо от него ([373]). Во второй из своих статей Цилиус обвиняет Делюка в том, что его аргументация представляет собой замкнутый круг; он пытается понять,

«как мог Делюк сделать заключение из показаний сухости на своем гигрометре, что водяной пар не исчез, не задавшись вопросом с той точки зрения, что когда его нет, гигрометр не может показать его присутствия» ([373], стр. 56).

В 1794 г. Берлинская Академия наук, заинтересовавшись этим вопросом, учредила премию за лучшее исследование теории Делюка. Цилиус представил единственную работу и, как это следует из обширного предисловия Академии, не мог поэтому рассчитывать на получение денег. Хотя Академия предполагала получить несколько работ, тем не менее она быстро распространила эту единственную работу из-за ее важности. Если Делюк прав, «тогда, согласно мнению одного из наших наиболее проницательных физиков [Лихтенберга], нельзя сохранить французскую антифлогистонную систему, и контрреволюция удастся, по крайней мере, в химии» ([374], стр. IV). Это говорит скорее об антиякобинских настроениях, чем об антифранцузских; и в самом деле, небезынтересно, что условия конкурса, помещенные на первой странице перед работой Цилиуса, были напечатаны на французском языке.

Следует помнить, что Академия была «королевская». И если она надеялась, что Цилиус защитит Делюка, то ее постигло разочарование.

В работе его были рассмотрены два вопроса: достаточно ли наблюдений Делюка для опровержения «теории растворения», и если это так, то возможно ли физически продемонстрировать превращение пара в воздух и воздуха вновь в облака и дождь?

Отрицательный ответ Цилиуса на первый вопрос основывается на положении, что если пар растворился, то гигрометр

не обнаружит его присутствия. Его ответ на второй вопрос начинается с замечания, которое обязательно придет в голову читателю «Идей» в XX в.:

«...первый зародыш этой теории кроется целиком в *необходимости** (и в ней одной) нахождения причины явлений» ([374], стр. 77).

Далее он говорит, что Делюк не привел ни одного факта, показывающего, как пар может быть превращен в воздух, и сетует на сложность гипотез Делюка и особенно на введение им совершенно неизвестных субстанций.

Лихтенберг был взбешен и написал обширную книгу [219] в защиту Делюка и гигрометра, используя свои большие литературные способности, чтобы третировать Цилиуса («слышал ли кто-либо ранее о нем?»), и притом очень грубо. Присущее ему чванство проявляется очень ясно в «Приложении», где Лихтенберг чрезвычайно вежливо обсуждает с «господином надворным советником Майером» статью последнего, опубликованную в 1792 г., которую мы уже упоминали. Лихтенберг представляет, что Делюк задает ему вопрос, что стало со «скрытой водой, которая больше не воздействует на гигрометр», и сам же отвечает на него: «Она превратилась в воздух, ибо, невзирая на все усилия, я ничего не обнаружил» ([219], стр. 213). Любой может возразить, что проблеме пропавшей шкатулки с драгоценностями нельзя решить таким образом.

Цилиуса не сломили нападки Лихтенберга, и он написал в ответ две статьи [375], но, к сожалению, его гонитель уже не смог их прочесть. Судя по этим статьям, довольно трудно поверить, что, как впоследствии утверждал Делюк ([98], стр. 285—286), в 1799 г. Цилиус посетил Лихтенберга и ушел от него «убежденным».

В 1803 г. Делюк написал другую обширную работу [96] с решительным намерением разрушить «новые химические гипотезы» с помощью своих метеорологических теорий. В ней повторяется большинство старых нестерпимо длинных доказательств, но с переставленными ударами. Естественно, что работа была сурово раскритикована в «Annales de Chemie» [16]. К сожалению, анонимный обозреватель выбрал неудачные места для нападения на метеорологию Делюка, и в ответе Делюка [97] его аргументы действительно выглядят много лучше. Возможно, отчасти благодаря этому его теория все еще продолжала пользоваться вниманием. Он был все-таки «великим дедушкой» метеорологии*. Изданная в 1797 г. «Британская энциклопедия» толкует его теорию как евангелие. Даже в 1820 г. известный немецкий метеоролог Генрих Вильгельм Брандес, считающийся отцом синоптической

* Курсив Цилиуса.

метеорологии, не находил возможным опровергать теории, подобные теории Делюка, или хотя бы освободиться от представления о некоторых якобы происходящих химических процессах ([48], стр. 345); а в 1828 г. еще более знаменитый Генрих Вильгельм Дове полагал, что Лихтенберг был прав в своем споре с Майером ([106], стр. 305).

Однако в 1814 г. Хр. Леопольд фон Бух всерьез и весьма обоснованно раскритиковал теорию Делюка ([53], стр. 94—100). Одной из главных его заслуг было ниспровержение идеи о невозможности присутствия в атмосфере достаточного количества пара для насыщения воздуха. Фон Бух показал это на основании того, что при температуре поверхности 22°R ($27,5^{\circ}\text{C}$) и насыщенном воздухе в первых 7200 футах оказалось бы достаточно воды для выпадения $1\frac{3}{4}$ дюйма дождя. А он видел грозовые облака выше, чем Монблан. Теория Делюка окончательно потеряла свое значение около 1835 г., когда ей на смену появились идеи, более стоящие, чем она. Метеорология опять стала отраслью физики.

Остается отметить лишь своеобразную теорию, выдвинутую профессором из Риги Г. Ф. Парротом ([263], стр. 166—218), полагавшим, что имеется два вида испарения — физическое и химическое. Величина первого зависит от температуры, тогда как второго — от концентрации кислорода. Только химическое испарение создает реальную упругую жидкость, а следовательно, образование облаков и осадков способствует круговороту кислорода в атмосфере, равно как и воды. Карл Вильгельм Бекман (младший) без труда доказал ошибочность техники химического эксперимента Паррота [44], приведшую к тому, что он нашел значительные вариации содержания кислорода там, где их вообще нет. Полемика была продолжена в «Письмах к редактору» (Гильберту) от К. Ф. Вреде ([370], стр. 319—352) и Паррота [264], однако в других местах она, по-видимому, прошла незамеченной.

* В 1805 г. „Edinburgh Review“, т. 6, стр. 515, в редакционной статье назвала его «почтенным философом».

ГЛАВА VII

ВОДЯНОЙ ПАР В ДЕВЯТНАДЦАТОМ ВЕКЕ

Нужно... представить себе, что бесконечный мир состоит из одних только этих бесконечных атомов, очень плотных, очень простых и совершенно не поддающихся разложению.

Сирано де-Бержерак. «Иной свет, или Государства и Империи Луны»

В химико-метеорологическом храме, описанном в предыдущей главе, был один неверующий, которого обычно считали химиком. Джон Дальтон писал [67]* в 1793 г.:

«Факты показывают, по-видимому, что испарение и конденсация не являются эффектами химического характера, а что водяной пар всегда существует в виде жидкости [fluid sui generis], рассеянной среди прочих флюидов воздуха».

Дальтон был крестьянином из Камберленда с весьма незначительным формальным образованием, однако он стал членом нескольких известнейших научных обществ и умер знаменитостью. Определить его настоящее место в истории науки я предоставляю другим**. Здесь мы коснемся его идей в отношении водяного пара и влияния их на теории дождя. Прежде всего следует отметить, что он изучал метеорологию раньше, чем стал мыслить как химик, и, по-видимому, даже к своей атомной теории он подошел благодаря размышлению о свойствах атмосферы ([147], стр. 75 и далее).

* Здесь в предисловии (стр. XV) указано, что второе издание (1834 г.) «дословно перепечатано с первого (1793 г.), как текст, так и примечания».

** Это весьма трудная проблема. См. Франк Гринвей «Биографический очерк о Джоне Дальтоне» [147].

В 1786 г. Джозеф Пристли писал:

«...если две любые составные части воздуха, с сильно различающимися удельными весами и не имеющие оснований для взаимодействия друг с другом, смешать вместе в одном сосуде, в покое они никогда не разделятся, а останутся равномерно проникающими друг в друга» ([280], стр. 390).

Семь лет спустя Дальтон упомянул об этом утверждении и сделал правильное предположение, что вариации содержания влажности в нижней атмосфере могут изменить средний удельный вес столба воздуха и показания барометра и что при этом не требуется предположения об изменении высоты атмосферы.

Ж. А. Делюк в 1786 г. также писал о зависимости максимума количества водяного пара от температуры и добавлял:

«Этот максимум водяного пара безусловно одинаков в любом месте, есть ли там воздух или нет его. На это нам указывает эксперимент. Отсюда мы видим, что минимальное расстояние между частицами пара, которое определяет его максимальную плотность, зависит только от собственно пара, независимо от флюидов воздуха, смешанных с ним» ([90], стр. 12).

Невозможно установить, заглядывал ли Дальтон когда-либо в «Мысли о метеорологии» Делюка или хотя бы в более раннюю его работу — «Исследования о модификациях атмосферы», хотя он и отмечает в предисловии к первому изданию своих «Observations and essays», что он только что видел большую статью об «Исследованиях» в одном старом номере «Monthly Review». В любом случае в 90-х годах он, очевидно, усиленно размышлял о паре, а также экспериментировал с ним, поскольку на трех заседаниях Манчестерского Литературного и философского общества — 2, 16 и 30 октября 1801 г. — он зачитал длинную статью, которая вызывала споры и неправильные толкования в течение более чем шестидесяти лет [68].

Нас здесь интересует главным образом первая часть статьи. Мы приведем четыре «закона» Дальтона именно в том виде, в каком они им были там записаны:

«1. Когда две упругие жидкости, обозначенные *A* и *B*, смешаны друг с другом, между их частицами нет взаимного отталкивания; т. е. частицы *A* не отталкивают частицы *B* таким образом, как они отталкивают друг друга. Следовательно, давление или полная нагрузка на любую частицу является результатом действия частиц, относящихся только к этому виду.

2. Сила * пара всех жидкостей одинакова, при равных отклонениях вверх или вниз относительно тех температур, при которых они кипят на открытом воздухе; и эта сила неизменна при любом давлении посторонней упругой жидкости или в вакууме. Таким образом, сила водяного пара при 212° ** равна

* Force здесь, очевидно, означает «давление». (Прим. перев.)

** Здесь везде применяются градусы Фаренгейта. (Прим. ред.)

30 дюймам рт. ст.; при уменьшении на 30° , т. е. при 182° , — вдвое меньше, а при увеличении на 40° , т. е. при 252° , сила удваивается; подобным же образом пар серного эфира, который кипит при 102° , обладает при этом силой в 30 дюймов рт. ст., при понижении температуры на 30° сила уменьшается вдвое, а при возрастании ее на 40° удваивается. Так же обстоит дело и в других жидкостях. Более того, водяной пар, помещенный в торричеллиеву пустоту, при 60° имеет силу, равную примерно $\frac{1}{2}$ дюйма рт. ст., а вода при той же температуре, соприкасающаяся с совершенно сухим воздухом, увеличивает упругость его как раз на такую же величину.

3. Количество какой-либо жидкости, испарившейся на открытом воздухе, пропорционально силе ее пара при данной температуре при прочих неизменных обстоятельствах.

4. Все упругие флюиды несколько расширяются при нагревании; и это расширение очень близко по своему характеру к равномерному расширению ртути — по крайней мере от 32 до 212° . Представляется возможным, что расширение каждой частицы жидкости или сферы ее влияния непосредственно определяется количеством поглощенного ею тепла, а следовательно, расширение жидкости пропорционально кубу температуры, отсчитываемой от точки полного его отсутствия» ([68], стр. 536).

Это тяжелая расплата за недостаточно точный эксперимент. Не все эти законы относятся к нашему предмету. Первая часть второго закона ошибочна; Дальтон здесь обобщает наугад опыты, сделанные только с двумя жидкостями. Вторая часть этого закона, как мы видели, была совершенно ясно установлена Делюком. Третий закон не был достаточно обоснован. Четвертый был очень важен, и в том же году Луи Жозеф Гей-Люссак дал ему гораздо лучшее экспериментальное доказательство ([137], стр. 137).^{*} Гей-Люссак обнаружил, что воздух, водород, кислород и азот обладают одинаковым, с точностью до нескольких тысячных долей, расширением. Он дал критический обзор, в котором отметил, что главный источник ошибок при таких экспериментах — это присутствие жидкостей или летучих твердых веществ в приборе. Он установил также, что физик Ж. А. К. Шарль еще за пятнадцать лет до этого проделал эксперименты с кислородом, азотом, водородом, углекислым газом и воздухом и получил подобные же результаты, но не опубликовал их. Благодаря Гей-Люссаку закон температурного расширения газов часто называется законом Шарля.

До сих пор я ссылался, конечно, лишь на первый вывод Дальтона в параграфе 4. Все последующее в нем довольно удивительно: здесь Дальтон безрассудно фантазирует, причем надо заметить, что понятие «сферы влияния» частицы едва ли совместимо с первым законом, к которому мы собираемся теперь обратиться.

^{*} В это время он был еще студентом Национальной школы мостов и дорог.

При объяснении закона парциального давления Дальтон помнит, что существуют два взгляда на состав воздуха: что оба газа просто смешаны друг с другом и что они находятся в химическом соединении. Он говорит, что если газы смешаны, то почему бы им не разделиться за счет опускания более тяжелого? А если они химически соединены, то почему они не образуют «азотнокислый газ»? Он сумел преодолеть эти трудности благодаря своей теории.

Дальтон основывает ее на двух предположениях, принятых как аксиомы. Первое — это закон Бойля, хотя он и не упоминает имени его автора. Второе — то, что «однородные упругие жидкости состоят из частиц, отталкивающих друг друга с силой, уменьшающейся пропорционально увеличению расстояния их центров друг от друга» ([68], стр. 542). При этом он ссылается на Ньютоновские «Начала», кн. II, предл. 23, и, по-видимому, считает доказанным, что газ на самом деле имеет такую структуру.

Ознакомься он до конца с «Поучением» к этому предложению, он бы обнаружил, что Ньютон прямо отрицает наличие каких-либо сведений по этому вопросу.* Здесь нет неправильной интерпретации, так как шестью годами позже Дальтон заявил [72]**:

«Ньютон из явлений сгущения и разрежения показал, что упругие жидкости составлены из частиц, отталкивающих друг друга с силами, которые возрастают прямо пропорционально уменьшению расстояния между их центрами; другими словами, сила обратно пропорциональна расстоянию. Этот вывод годеи, пока законы упругих жидкостей остаются в силе.

Достойно сожаления, что все пытавшиеся рассуждать или теоретизировать относительно строения упругих жидкостей не утруждали себя глубоким знакомством с этим непреложным Законом и применением его всякий раз, когда они выступали с каким-либо новым начинанием!»

Что было действительно достойно сожаления, так это то, что те, которые грелись в лучах ньютоновского гения, должно быть, даже не удосужились прочитать внимательно его труды, чтобы до конца постичь всю его глубину!

По-видимому, несколько позднее Дальтон вновь обратился к этой теме. Около 1826 г. он уже ясно представлял, что Ньютон

* «Но состоят ли в действительности упругие жидкости из частиц, отталкивающих друг друга, это есть физический вопрос. Здесь мы математически показали свойство жидкостей, состоящих из частиц этого рода, что для философов, следовательно, может служить поводом для обсуждения этого вопроса».

Это «Поучение» отсутствовало в латинском подлиннике «Начал» Ньютона издания 1715 г. (с которого акад. А. Н. Крылов сделал в 1915 г. русский перевод). Оно появилось в 1732 г. в английском переводе Мотта, сделанном еще при жизни Ньютона, вероятно, с его ведома. (*Прим. ред.*)

** Нежелание Дальтона вносить поправки в свою книгу видно из того факта, что это утверждение повторяется дословно в издании 1834 г., стр. 168.

не утверждал, будто газы должны состоять из взаимноотталкивающих частиц ([73], стр. 174).

Но вернемся к 1802 г. Допуская такое отталкивание, Дальтон исследовал возможность его существования в смешанных газах и рассмотрел четыре таких возможности. 1. Частицы данного вида могут отталкивать другие частицы с такой же силой, с какой они отталкивают друг друга. Но если это так, говорит он, то они бы разделились в соответствии с их удельными весами. 2. Частицы данного вида могут отталкивать другие частицы с силой, большей или меньшей, чем та, с которой эти частицы взаимодействуют друг с другом. Эта гипотеза наталкивается на те же возражения. 3. Имеется химическое сродство; с этим трудно согласиться, поскольку оно всегда приводит к изменению состояния или объема или и того, и другого. 4. Частицы одного газа могут быть совершенно нейтральны, или неупруги, по отношению ко всяким иным частицам. В последнем случае, утверждает он, каждая упругая жидкость заполнит все пространство и ее парциальное давление будет пропорционально ее относительному количеству в объеме.

Дальтон был, очевидно, воодушевлен этой последней идеей. Если признать эту гипотезу, говорит он,

«исчезают все трудности и все факты оказываются простым и непреложным ее следствием. Атмосфера или, точнее, составные части атмосферы могут существовать совместно в смеси независимо от их удельных весов и не оказывая давления друг на друга. Кислородный газ, азотный газ, водородный газ, углекислый газ, водяной пар и, вероятно, несколько других упругих флюидов могут существовать вместе при любом давлении и любой температуре, причем каждый из них (как бы парадоксально это ни казалось) целиком занимает пространство, отведенное им всем. Пространство, заключающее их, сравнительно мало отличается от вакуума, настолько упругие флюиды разрежены» ([68], стр. 545).

Теперь-то мы, конечно, знаем, что гипотеза о независимости различных газов была излишней. Дальтон также мог понять это, если бы он читал «Гидродинамику» Даниеля Бернулли [35]. Однако никто из его современников не обратил внимания на «Гидродинамику». То, что создавал Дальтон, можно было назвать статической теорией газов, в отличие от кинетической теории, введенной Бернулли и развитой — точнее говоря, открытой вновь — лишь в XIX в. Собственно, дальтоновская формулировка не могла причинить ущерба метеорологии. Но одно следствие, почерпнутое из нее, создало большую путаницу. Оно касалось испарения воды.

Если удалить все другие газы, кроме водяного пара, пишет Дальтон,

«из небольшой примеси получилась бы водная атмосфера, потому что она и так существует повсеместно, близкая к наиболее плотной, допускаемой соответствующей температурой; ис-

парение воды в этом случае осталось бы, по существу, таким же, оно лишь заканчивалось бы за меньшее время. Короче говоря, представление о том, что давление препятствует испарению жидкостей, современными философами принимаемое как аксиома, было источником стольких ошибок и недоразумений, как никакое другое необоснованное мнение» ([68], стр. 548).

Значительно далее в этой же большой статье он говорит, что

«воздух затрудняет испарение «по причине *vis inertial*» * частиц воздуха, и она подобна тому сопротивлению, которое встречает поток воды, струящийся среди камней» ([68], стр. 581).

Наиболее удивительно, что он не понял то, что отстаивал: а именно утверждения, что вся атмосфера «повсеместно» почти насыщена. Чем же тогда вызвана сухая или влажная погода? Здесь он был виноват либо в сбивчивом мышлении, либо в небрежном изложении, которые несомненно ничуть не уменьшили общее количество «ошибок и недоразумений» в этом трудном вопросе. В следующем году он причинил еще больший ущерб, написав:

«Согласно моему принципу, плотность водной атмосферы на любой высоте совершенно не зависит от плотности составляющих воздуха и может быть вычислена по плотности пара у земной поверхности и его удельному весу; точно так же, как мы можем определить плотность кислородной или азотной атмосфер или атмосферы из водорода на любой выбранной высоте на основании аналогичных данных» ([70], стр. 119).

Удивительная вещь: противоречивость всего этого как бы исчезла из поля зрения на некоторое время, тогда как его теория получила широкую известность и признание **. Правда, эта теория была сразу раскритикована приверженцами теории испарения как «растворения» и как раз приведенная выше цитата непосредственно взята из ответа одному из них — Ричарду Кирвану ([192], стр. 143, 251). Теория подверглась нападкам и со стороны тех, кто, подобно знаменитому химику Томасу Томсону, полагал, что воздух является соединением ([335], т. III, стр. 269). Дальтон ответил Томсону в «*Nicholson's Journal*» ([69], стр. 267), выражая сожаление по поводу того, что был понят неправильно.

Те, кто полагал, что воздух является химическим соединением, получили желанную поддержку в 1804 г. от человека, который несомненно не думал этого. 16 сентября этого года Гей-Люссак во имя науки осуществил удивительный и, вероятно, рискованный подъем на воздушном шаре, достигнув высоты 6636 метров. Анализы воздуха, взятого у земли и с наибольшей высоты полета, дали в точности одинаковую концентрацию кислорода: 21,49% *** ([138], стр. 454).

* Силы инерции. (Прим. перев.)

** Например, Л. В. Гильберт в своей работе [141] утверждает, что эксперименты Клемана и Дезорма [59] находятся в согласии с этой теорией.

*** По весу. (Прим. перев.)

Насколько я знаю, первым человеком, заявившим, что представления Дальтона о смешанных газах не вытекают из опытов самого Дальтона, был неудачник Г. Ф. Паррот, оказавшийся на сей раз правым ([265], стр. 82). Однако никто на это не обратил внимания, за исключением, возможно, самого Дальтона, который в 1805 г. сообщил об экспериментах с двумя сосудами и длинной стеклянной трубкой для демонстрации диффузии газов против силы тяжести ([71], стр. 259). Он использовал полученные данные для объяснения результатов экспериментов Пристли 1783 г. с пористой ретортой*. Но теория Дальтона все еще не имела теоретической базы, и в 1807 г. Дж. Г. Траллес возразил, что диффузия газов друг в друга — просто следствие того, что они не заполняют все имеющееся пространство, и не свидетельствуют в пользу упомянутой теории ([341], стр. 400). Он также противопоставил почти мгновенное заполнение газом пустого пространства медленной диффузии газов друг в друга и противопоставил теории Дальтона наблюдения Гей-Люссака на воздушном шаре.

Другая примечательная трудность возникла из акустической теории. Еще Ньютон показал, что скорость звука в газе изменяется прямо пропорционально корню квадратному из давления и обратно пропорционально корню из плотности. Отсюда следовало ([34], стр. 165), что если дальтоновская теория независимых атмосфер верна, то мы должны слышать несколько звуков от одного удаленного взрыва и несколько тонов одновременно в духовом инструменте. Вес этого довода ослаблялся тем фактом, что ньютоновская формула давала неправильную величину скорости звука. Однако в 1816 г., после того как Лаплас исправил теорию Ньютона, учтя, что разрежения и сжатия в звуковой волне являются адиабатическими ([207], стр. 238), было получено удовлетворительное согласие с экспериментом.

Как раз в это время кинетическая теория газов, которая на долгое время была законсервирована в виде, приданном ей в «Гидродинамике» Бернулли, возродилась, хотя и обратила на себя при этом почти столь же мало внимания, как и при первом рождении. Совершенно независимо от Бернулли Джон Херепат между 1816 и 1821 гг. опубликовал ряд статей в «Annals of Philosophy», где он установил закон идеальных газов и дал простые объяснения диффузии, изменениям состояния и свойствам звука. Его статьи не были приняты Королевским обществом главным образом из-за противодействия Хэмфри Дэви, в то время президента Общества. Они оставались в забвении до 1848 г., когда Дж. П. Джоуль обратил на них внимание**. Между тем теория Дальтона вошла в учебники, например, в книгу Джона

* См. выше, стр. 109.

** О Херепате см. ([52], стр. 188).

Фредерика Даниэля «Meteorological essays and observations» ([77], стр. 72), хотя Даниэль совершенно ясно понимал, что количество водяного пара на той или иной высоте должно быть ограничено температурой.

Сам Дальтон в 1826 г. вернулся к этой теме, показав с помощью мысленного, хотя и не очень понятного эксперимента, что количество отдельных газов в атмосфере должно уменьшаться с высотой весьма различным образом. Однако затем он признал, что все сказанное применимо к покоящейся атмосфере, и выразил сомнение по поводу возможности теоретического описания состава реальной, всегда движущейся атмосферы ([73], стр. 174). Как мы увидим в главе VIII, этот скептицизм не оправдался. В 1837 г. Дальтон опубликовал продолжение этой статьи, где детально перечислил опыты, проведенные между 1824 и 1835 гг. для выяснения состава воздуха на различных высотах ([74], стр. 347). Они обнаружили лишь небольшие вариации, которые вполне можно было приписать ошибке эксперимента. Статья эта содержала следующее заключение:

«Кажется, однако, что диспропорция двух элементов [кислорода и азота] на различных высотах ни в коей степени не больше, чем этого требует теория, а следовательно, мы должны заключить, что непрерывное перемешивание атмосферы течениями и противотечениями достаточно для поддержания почти неизменной смеси на доступных нам различных высотах» ([74], стр. 356).

Учитывая это, а также возражения против его теории, настаивать на ней было просто упрямством. Он, действительно, мог устать от этого: так, в 1834 г., дословно переиздав свои «Meteorological observations and essays» 1793 г., он добавил только «Приложение ко второму изданию». В нем в порядке критики он бегло упомянул о «другом исследовании», в котором показано, что «один газ {есть} как бы вакуум по отношению к другому при их взаимодиффузии» ([75], стр. 211).

Незадолго до смерти он сформулировал теорию смешанных газов в модифицированном виде:

«1. Диффузия газа в любой другой осуществляется благодаря отталкиванию, которое присуще однородным частицам, или тому влиянию, которое всегда производит расширение газа.

2. Когда между двумя или многими газами устанавливается равновесие, упругая энергия действия каждого на поверхность сосуда или на любую жидкость в точности такая же, как если бы все пространство занимал только один газ, а все остальные были удалены» ([75], стр. 191).

Читатель может заметить, что первый параграф стал исходным для кинетической теории газов.

Тем временем теория Дальтона продолжала порождать множество споров. Ю. Ф. Бенценберг, усвоив эту теорию, посвятил ее защите в 1830 г. объемистую книгу [33]. В ней он выражал

свою уверенность, что, подобно Копернику и Харвею, Дальтона со временем ожидает триумф. Специальностью Бенценберга была барометрическая гипсометрия, и он применил теорию Дальтона к некоторым старым наблюдениям Д'Обюиссона (1809 г.) и Соссюра (1787 г.), утверждая, что благодаря ей их результаты совпали с высотами, определенными тригонометрически. Совпадение было слишком точным, чтобы быть убедительным, и интересно лишь постольку, поскольку благодаря ему грозный Карл Фридрих Гаусс почуял неладное. Он рецензировал книгу в «*Göttingenische gelehrte Anzeigen*» ([136], стр. 1945)*, показав сначала, что вычисления Бенценберга ошибочны и должны в действительности приводить к разнице противоположного знака, а затем продемонстрировал, что точность метода в целом далеко недостаточна для суждения о теории Дальтона, в которую Гаусс несомненно не верил.

Таким же неверующим был способный шотландский химик Томас Грэхэм, который в 1834 г. установил законы диффузии и взаимообмена газов через пористую перегородку. Он обнаружил, что многочисленные опыты с разными газами противоречат теории Дальтона ([145], стр. 222).

Хотя после всего этого теория захирела, но она не умерла и все еще продолжала тревожить метеорологов и даже астрономов. В подробном исследовании об астрономической рефракции Ж. Б. Био показал на численном примере, что если принять давление пара постоянной долей общего давления на всех высотах и если не считать воздух у поверхности чрезвычайно сухим, то при подъеме вскоре были бы получены нереальные величины рефракции ([39], стр. 29). Рассуждения такого рода появлялись и во второй четверти века, и кульминационным пунктом их явилась блестящая статья подполковника Ричарда Стрэчи, который, рассмотрев как наблюдения Джозефа Хукера в Гималаях, так и некоторые свои собственные, установил, что давление пара на высоте 18 000 футов составляет только около четверти того, которое получилось бы из теории Дальтона, и что, если исходить из неизменности пропорции пара, точка росы при подъеме стала бы вскоре выше, чем температура ([330], стр. 182). Его основные заключения были превосходно сформулированы:

«Мы можем поэтому сделать общее заключение, что известное уменьшение температуры в атмосфере несовместимо с существованием в верхних слоях таких больших количеств водяного пара, как того требует в этом случае теория; и, следовательно, упругости водяных паров, наблюдаемые у поверхности, не сбалансированы и не обусловлены давлением пара в более высоких частях атмосферы и не зависят от него (так, как собственно барометрическое давление зависит от веса всего находящегося выше столба воздуха), то есть последнее недостаточно для

* Обзор не подписан, но, очевидно, принадлежит Гауссу.

объяснения первых. Для того чтобы на самом деле могла существовать независимая атмосфера водяного пара, потребовалось бы падение температуры воздуха около 1° на 1500 футов или менее четверти того, что наблюдается в действительности.

Из этого будет также следовать, что, поскольку упругость водяных паров в какой-либо точке превышает сумму всех давлений водяного пара над ней, она должна быть частично обусловлена действием частиц воздуха, которые должны, следовательно, давить на пар, вопреки предположению, из которого мы исходили» ([330], стр. 185).

Директор Мюнхенской обсерватории Иоганн фон Ламонт написал серию статей по этому вопросу в период с 1860 по 1864 г. ([204], стр. 181; [205], стр. 110; [206], стр. 439). Комбинируя результаты метеорологических наблюдений со своими собственными лабораторными экспериментами, он установил то же, что и Стрэчи, но подчеркнул при этом, что нет оснований для допущения, что водяной пар всегда успевает прийти в состояние равновесия в присутствии воздуха. Показания гигрометра в любом данном месте описывают не более чем локальную влажность воздуха и ни в коей мере не распределение водяного пара по вертикали. Статьи Ламонта, как немецкие, так и английские, были не очень вразумительны, но они были ценны тем, что привлекли внимание к кинетическим свойствам материи.*

За этим последовало забавное событие. Завязкой послужил раздраженный выпад Дж. К. Блоксхэма против Ламонта ([41], стр. 362), — выпад, вызванный, очевидно, патриотическими мотивами и показавший лишь то, что его автор не понял цели возражений Ламонта.

Королевский астроном Джордж Бидделл Эри, очевидно, по просьбе издателя — Ламонт был астрономом — попытался загладить неловкость ([5], стр. 365). Сомнительно, представлял ли он до конца, сколь была пуста эта суета, однако в конце он сделал одно полезное замечание:

«... поскольку гигрометр показывает большую плотность пара у земли, было предположено, что плотность пара в любом выше лежащем слое можно вычислить по этой нижней плотности по тому же закону, как если бы пар был единственным газом над землей, рассеиваясь по обычным законам газов [т. е. диффузии]. Я не знаю, выразил ли кто-либо из авторов этот закон в столь общем виде, в каком я его сформулировал; но я знаю, что некоторые вплотную подошли к нему, и я несколько не сомневаюсь, что им руководствуются молчаливо многие метеорологи» ([57], стр. 366).

Бедный Блоксхэм отступил, и притом гораздо более дипломатично ([42], стр. 41), сказав, что понимает, что верхние слои

* Подробности других экспериментальных и статистических исследований, отмечающих неправильность теории Дальтона, можно найти в [169], I, стр. 157 и след.

могут быть очень влажными при сухих ниже лежащих и наоборот, но он не желал критиковать Дальтона.

«Насколько я понимаю, было бы, однако, грубой ошибкой допустить, что закон Дальтона в том виде, в каком его трактуют английские метеорологи, ложен» ([42], стр. 44). Мне почти стыдно говорить, что в этой же статье Блоксхэм предположил существование «электрического управления» (control) «вязкостью водяного пара». В своем заключении [206] Ламонт еще раз подчеркивает, что для метеорологии не безразлично, считаются или не считаются атмосферы воздуха и водяного пара независимыми друг от друга.

Однако теория Дальтона, хотя и была покалечена, не умерла окончательно: в 1874 г. знаменитый австрийский метеоролог Ю. Ханн — директор Центрального института метеорологии и геодинамики в Вене — счел необходимым цитировать возражения Стрэчи и Ламонта ([160], стр. 193—200). Он тоже использовал наблюдения в Гималаях, в Армении, на Тенериффе и в Альпах, так же как и наблюдения Уэлша и Глэшера при полетах на воздушных шарах. Он установил эмпирическую формулу, связывавшую давление пара с высотой, которая весьма близко соответствовала результатам Стрэчи. Нам нет необходимости касаться этой формулы, но одно из ее следствий представляет большой интерес. Оказывается — как и отмечал Стрэчи, — что $\frac{9}{10}$ всего водяного пара в атмосфере находятся ниже 20 000 футов и, следовательно, высокие горные цепи образуют надежную преграду для переноса пара.

Пока некоторые английские метеорологи ошибочно защищали Дальтона, физики и математики Великобритании и других стран усердно трудились в своих лабораториях и за своими письменными столами. Были сделаны многочисленные определения максимума давления водяного пара как функции температуры, со все возрастающей точностью: от Шмидта ([314], стр. 251) и Дальтона ([68], стр. 535) до превосходных исследований Анри Виктор Реньо, которые оставались непреложными многие годы ([288], стр. 1120, 1220). Очень скоро, как бы ради забавы, математики стали изобретать интерполяционные формулы для этой функции. Ю. Зольднер был одним из первых, кому это удалось ([325], стр. 44), а в 1833 г. Эген ([116], стр. 9) смог привести уже двадцать девять таких формул, добавив четыре своих собственных.

Было предположено, что присутствие воздуха не влияет на максимум давления водяного пара, но в 1854 г. Реньо усомнился в этом утверждении ([289], стр. 301, 345, 397). Во всех его девяти опытах давление насыщающих паров в воздухе оказывалось несколько меньше, чем в вакууме. Что меня заинтересовало в этой работе, так это то, что Реньо относился к «закону Дальтона» просто как к закону сложения давлений

пара и газа, не делая каких-либо предположений о независимости молекул ([289], стр. 397).^{*} Великий экспериментатор несомненно изумился бы, если бы узнал обо всех спорах об этом законе, происходивших далеко внизу, ниже его Олимпа.

Выше мы упоминали, что Джон Херепат безуспешно пытался заинтересовать ученых кинетической теорией газов. В 1828 г. Роберт Броун открыл беспрестанное беспорядочное движение очень маленьких частиц в жидкости, которое затем было названо броуновским движением. В 1851 г. Джеймс Прескотт Джоуль, более известный своим определением механического эквивалента тепла, показал приближенно, что закон Бойля согласуется с гипотезой, согласно которой газы состоят из частиц, летающих по всем направлениям с большими скоростями ([187], стр. 107). Это доказательство было несколько уточнено А. Кренигом пятью годами позже ([197], стр. 315), а в 1857 г. Р. Дж. Е. Клаузиус ([58], стр. 353) впервые отчетливо изложил кинетическую теорию газов, приняв во внимание перемещение, вращение и колебания молекул. Для нас еще важнее, что им была создана также кинетическая теория испарения. Он пришел к заключению, что молекулы обладают определенной средней скоростью, но среди них есть более быстрые и более медленные; молекулы, обладающие большой энергией, могут покинуть поверхность жидкости и вылететь в пространство над ней. Любая частица, ударяющаяся о жидкость, вновь возвращается в нее. Испарение продолжается до тех пор, пока число частиц, покидающих жидкость, не сравняется с числом возвращающихся частиц, и, чем выше температура, тем больше будет их в пространстве в любой момент.

В последующие годы XIX в. кинетическая теория была усовершенствована многими учеными. В 1886 г. У. Феррель счел возможным написать в официальном отчете [125], что он может дать законченное объяснение явлению парциального давления, корректно описанному Далтоном, но неправильно им объясненному. По словам Ферреля, Дальтон был неправ в двух пунктах: относительно скорости, с какой происходит распределение газов в смеси, и относительно причины этого явления. Первая ошибка Дальтона мешала ему понять, что атмосфера никогда не может даже близко находиться к такому состоянию равновесия.

^{*} Дальтон получил больше, чем заслужил, ибо именно такова, по-видимому, современная интерпретация «закона Дальтона».

ГЛАВА VIII

ТЕОРИИ ДОЖДЯ В ДЕВЯТНАДЦАТОМ ВЕКЕ

Нельзя полагать, что любую погоду, нормальную или аномальную, можно приписать единственной причине.

N. Shaw. „Manual of meteorology“

1. Введение

К 1800 г. объект нашего исследования находился в особенно неудовлетворительном состоянии. Большинство идей, которые позднее доказали свою плодотворность, таких, как формирование восходящих токов и охлаждение воздуха при подъеме, было почти позабыто. Их место заняли идеи почти или вовсе не имевшие будущего, такие, как псевдохимическая теория Делюка, которую мы изучали в главе VI. Типичное для XVIII в. построение систем, особенно ярким примером которых была система, созданная Делюком, только еще начало отступать перед лицом экспериментальных данных или ввиду их недостатка.

Что также, вероятно, было неудачным, так это то, что большинство деятельных метеорологов второй половины XVIII в. происходило из Альп. Погода в горах часто представляет эффектное зрелище, и, возможно, именно это стимулировало активность ученых в этом вопросе; но в то же время погода горных мест очень сложна, или, вернее, присутствие гор затрудняет понимание ее запутанных физических процессов. Показательно, что первый реальный прогресс в XIX в. пришел из такой страны, как Соединенные Штаты, где рельеф значительно менее существен по отношению к размерам области, доступной для изучения. Это возрождение зависело также от наличия хорошо организованной синоптической сети; и хотя Соединенные Штаты не были первой страной, где возникли синоптические метеороло-

гические наблюдения, они были первыми, где проводилось много наблюдений на достаточно обширной площади.

Прогресс теории нашего вопроса в XIX в. был основан на достижениях термодинамики. Когда они были должным образом поняты, был сразу совершен большой шаг к пониманию различных крупномасштабных механизмов образования дождя. Только к концу периода был достигнут значительный успех в понимании более сложных мелкомасштабных процессов. Эта тема, чрезвычайно подробно изучаемая в наше время, будет затронута вкратце в двух последних разделах этой главы.

2. Первая четверть века

Непосредственно после 1800 г. наибольшая активность в данном вопросе наблюдалась на Британских островах. Приятно отметить, что даже независимо от Дальтона, о котором шла речь в главе VII, она была весьма важна. Мы признательны Л. Говарду и будем неизменно благодарны ему за создание первой пригодной для практики классификации облачных форм, однако он не был настолько компетентен в точных науках, чтобы внести сколь-нибудь существенный вклад в теорию дождя. Он никогда не мог освободиться от веры в электричество как в важный фактор образования дождя: «дождь почти всегда — результат электрического действия одного облака на другое» ([177], стр. 99). Однако электричество — только «вторичный фактор, который видоизменяет действие двух основных предопределяющих причин — падения температуры и притока пара» ([177], стр. 11). Восемью годами позже он говорит, что формы перистых облаков отражают структуру электрических токов в верхней атмосфере ([178], стр. 57). При этом он остается верным своему мнению о важности электричества (хотя он и считает его вторичным фактором) для формирования дождя ([179], стр. 128). Он знал, что кучевые облака формируются в восходящем потоке, но, не зная ничего о необходимой связи между подъемом и охлаждением, он полагал, что восходящий пар «изменяет свой климат и приходит туда, где окружающий воздух имеет более низкую температуру» ([178], стр. 51). Это пример широко распространенного мнения, что пар может быстро подниматься совершенно независимо от движения воздуха, в котором он содержится. Вероятно, теория Дальтона о независимости газовых атмосфер в течение ряда лет поддерживала существование этой идеи.

Химики, подобные Кирвану и Томасу Томсону, не отказались от идеи, что вода растворяется в воздухе. Это заводило в тупик и могло привести лишь к заключениям, подобным следующему заключению Кирвана:

«Когда барометр поднимается, облака отчасти растворяются, поскольку плотный воздух является лучшим растворителем, чем разреженный воздух, и отчасти поднимаются выше вследствие возросшего удельного веса воздуха, находящегося ниже; когда барометр падает, происходит обратное» ([191], стр. 258).

Более плодотворный, хотя все еще весьма эмпирический подход использовал Хэмфри Дэви, который отметил обычное уменьшение температуры с высотой, но каким-то образом сумел спутать его с эффектом простого удаления от земли:

«Когда воздух расширяется... происходит уменьшение температуры... исходя из этого, легко объяснить соотношение между уменьшением температуры атмосферы и высотой; для этого можно представить себе, что емкость (по отношению к теплу) воздуха, разреженного за счет нагрева, возрастает при его подъеме; теплота, определяемая температурой, которая послужила причиной подъема, должна на определенной высоте стать теплотой, определяемой теплоемкостью; и чем выше и более разрежен воздух, чем более он удален от источников тепла, тем энергичнее происходит уменьшение его температуры» ([83], стр. 90).

Дэви был химик, и мы можем оценить это просто как случайное замечание в книге по химии. Однако мы не можем оправдать подобным же образом Джона Лесли, чье исключительное невежество в вопросах метеорологии мы уже отметили выше*. В книге, опубликованной в 1813 г. [217] и интересной для историка метеорологических инструментов, мы видим, как подхваченные Лесли идеи Дэви развиты в качественную теорию конвективного равновесия:

«Увеличенная емкость (по отношению к теплу) разреженного воздуха является истинной причиной холода, преобладающего в верхних областях атмосферы. Из-за неодинакового воздействия солнечных лучей и смены дня и ночи между верхними и нижними слоями поддерживается *непрерывная и быстрая циркуляция; и несомненно, что для каждой порции воздуха, которая поднимается с поверхности, существует равная и соответствующая порция воздуха, которая должна опускаться*. Но те из них, которые поднимаются и испытывают увеличение емкости пропорционально этому, охлаждаются, в то время как соответствующие опускающиеся массы уносят тепло с собой и распространяют его вниз» ([217], стр. 11—12).

Слова, выделенные мною курсивом, являются наиболее ясным описанием процесса конвекции из тех, которые, насколько мне известно, имелись к тому времени. До этого было много разговоров о «восходящих потоках», но наконец настало время отметить, что то, что поднимается, должно и опускаться. Было бы анахронизмом искать в выдержках, подобных этой, интуитивное понимание принципа сохранения энергии, но,

* См. выше, стр. 74.

безусловно, понятие о меняющейся «емкости» для тепла было уже пригодно для перевода в термины термодинамики.

Мне кажется, что Лесли редко возвращался к раз уже им написанному. Во всяком случае далее в своей книге он поддерживает теорию дождя Хэттона:

«Воздух при охлаждении готов расстаться со своей влагой. А как он охлаждается в свободной атмосфере? Обязательно только при контакте или смешении с более холодной порцией того же флюида» ([217], стр. 125).

Далее он стремится показать, что лишь малая доля всей влажности двух масс воздуха при обычной температуре конденсируется при смешении, по принципу Хэттона. Но, кроме того, он предлагает нам представить, что два потока дуют навстречу друг другу, скользя один над другим вдоль их общей границы. Он считает, что так может образоваться большое количество дождя. На первый взгляд, здесь налицо ложный вывод: он как будто бы полагает, что весь дождь, образующийся на большом протяжении этих потоков, концентрируется в сравнительно небольшой области. Но несколькими страницами дальше мы останавливаемся как вкопанные перед следующим утверждением:

«В хорошую тихую погоду, после того как лучи заходящего солнца перестают нагревать землю, опускание более высоких масс воздуха постепенно охлаждает самый нижний слой» ([217], стр. 132).

Что же случилось с теплом, принесенным вниз опускающимся воздухом, емкость которого уменьшается? Видимо, Лесли был хорошим лабораторным ученым, совершенно терявшимся, когда он выходил на открытый воздух.

Интересно, что объяснение низким ночным температурам приземного воздуха было дано лишь немного позднее Уильямом Чарлзом Уэллсом, о котором мы еще много будем говорить в главе IX [357]. Объяснением служила, конечно, невидимая радиация.

Восходящий поток (*Courant ascendant*) становится модным. В 1816 г. на собрании Берлинской академии наук Леопольд фон Бух заявил, что «принцип восходящего потока воздуха должен поистине быть ключом ко всей науке метеорологии»*. Беллани [32] в 1817 г. одобрительно цитировал аналогичные идеи Дэви. Тем более удивительно, что в 1820 г. Генрих Вильгельм Брандес — значительная фигура в истории метеорологии**, — зная,

* Прочитировано по [153], стр. 178. В главе X мы увидим, как Бух использует этот принцип в своей теории града.

** Ему приписывается построение первых синоптических карт погоды (для 1783 г.) в 1816 г. См. ([317], стр. 156 и 200).

что кучевые облака образуются при конвективном подъеме влажного воздуха, усомнился, что пар конденсируется при смешении с холодным воздухом наверху, как все полагали тогда ([48], стр. 314), и придерживался мнения, что при этом существенную роль играет электричество. Он также полагал, что для возникновения непрерывного дождя, а особенно дождя сильного или длительного, необходимо присутствие двух взаимодействующих слоев облачности ([48], стр. 327).

Еще более крупным метеорологом — возможно, я должен назвать его климатологом, — чем Брандес, был Генрих Вильгельм Дове, с которым мы еще встретимся ниже. Известно, однако, что и Дове — по крайней мере в течение многих лет — не понимал правильно процесс адиабатического охлаждения при подъеме. Я полагаю, дело тут в том, что это явление можно понять только с помощью математических выкладок, а и Дове, и Брандес были людьми другого склада ума.

Математические выкладки эти появились примерно с 1823 г., когда Симон Дени Пуассон вывел формулы, связывающие температуру и давление, или температуру и плотность газа, сжимаемого или расширяемого адиабатически (т. е. без потери или притока тепла), ([276], стр. 337.) Было ясно, что они относились только к ненасыщенному воздуху. Вскоре, как мы увидим, было понято, что насыщенный воздух должен вести себя иначе; но правильное математическое описание подъема насыщенного воздуха было создано лишь много лет спустя.

3. Классификация дождей

Как я пытался показать в предыдущих главах, убеждение, которое существенно тормозило развитие теории дождя, заключается в том, что все дожди образуются одинаковым образом. Около 1825 г. для нескольких человек уже стало очевидно, что это отнюдь не так. Одним из них был молодой Г. В. Дове, который в 1826 г. в Берлине получил степень доктора* и немедленно развил бурную деятельность в области метеорологии, продолжавшуюся свыше 50 лет. Он выбрал в качестве главного поля деятельности область, которая ныне была бы названа «динамической климатологией», и его мышление было всегда скорее статистическим, нежели физическим. Поскольку модель, созданная осреднением ряда гроз, не похожа ни на одну из реальных гроз, его теория гроз никогда не приносила много пользы. Однако его авторитет был настолько велик, что, по мнению некоторых позднейших метеорологов, он в течение примерно 30 лет ([169], стр. 45) препятствовал признанию более

* Его диссертация озаглавлена „De barometri mutationibus“. Экземпляр ее имеется в библиотеке службы погоды ФРГ в Оффенбахе-на-Майне.

правильных теорий. Климатологический подход был виден уже в диссертации Дове, а к 1828 г. он стал окончательно преобладать, что видно и из названия статьи, которую нам теперь следует рассмотреть ([107], стр. 305). Эта статья сослужила большую службу для классификации дождей по процессу их образования.

Осадки *, говорит Дове, «должны возникать, когда температура воздуха понижается до точки конденсации (точки росы) водяного пара, содержащегося в нем» ([107], стр. 307). Таким образом, изучая осадки, мы должны выяснить, почему происходит понижение температуры. Различая причины охлаждения, он устанавливает четыре класса гидрометеоров.

1. Охлаждение за счет излучения. Роса, изморозь, иногда гололед.

2. Охлаждение при орографическом подъеме (он приводит примеры).

3. Теплопроводность — от или к поверхности:

а) соприкосновение с холодной поверхностью; вечерние туманы;

б) внезапная адвекция теплого воздуха над холодной поверхностью (он приводит в качестве примера выпадение осадков, сопутствующее юго-западному шторму [1], а также снегопад у границы ледяного поля или на холодном побережье);

в) понижение температуры без изменения направления ветра;

г) подъем воздуха над сушей (примеры: дневные грозы в тропиках, град, вулканические облака).

4. Смешение ветров (примеры: торнадо [1], грозы, переходящие в устойчивые дожди, ливни из мокрого снега, «апрельская погода», устойчивый снегопад, перистые и перисто-слоистые облака).

«Дождь смешения», по словам Дове, встречается наиболее часто, а другие осадки существенны лишь при слабом ветре. Дожди четвертого класса наиболее сильно влияют на показания барометра. Из своих статистических исследований он вывел, как ему казалось, ясное правило: барометр падает при дождях с восточным ветром и поднимается во время дождей при западном ветре.

Классификация Дове, безусловно, несовершенна; особенно это относится к примерам, приводимым в классах 3 б и 4. Интересно видеть, как он пытается дать статистическое толкование сведениям о дожде и ветре, полагая, что то, что мы называем фронтальными дождями, возникает либо при смешении, либо при охлаждении за счет контакта с землей. Еще интереснее его подстрочное примечание о том, что «южные ветры... натекают

* Под осадками Дове понимал образование видимых форм воды.

на сопротивляющийся им более холодный воздух, как на гору» ([107], стр. 315)*. Удивительно, что такой плодотворной идее, изложенной столь ясно, потребовалось почти столетие, чтобы стать действительно полезной метеорологам.

Предположение, что продолжительные южные дожди образуются при охлаждении от земли, восходит к XVIII в., как мы видели в главе V, и с тех пор не произошло ничего, что могло бы его поколебать. Более удивительны примеры Дове для «дождя смещения», особенно «апрельская погода», т. е. ливневые осадки. По-видимому, лучшее место таким явлениям по его классификации в классе 3 г.

Гораздо более последовательная и лучше обоснованная классификация была предложена в 1841 г. Элиасом Лумисом, который в метеорологии интересовался больше синоптикой, чем статистикой ([221], стр. 125). Лумис постулировал четыре причины выпадения осадков, во многом схожие с указанными Дове: 1) излучение; 2) теплый воздух, вступающий в контакт с холодной землей или водой; 3) смешение теплого и холодного потоков; 4) внезапный перенос воздуха в возвышенные области. Лумис отличался от Дове в своей оценке их относительной влажности.

Излучение, по его мнению, может образовывать лишь росу. Вторая причина вызывает туманы, такие, как в районе Ньюфаундлендской банки. За счет третьей причины может образовываться слабый дождь. Четвертая же причина — подъем воздуха — намного более важна, чем прочие, и заслуживает более подробной классификации, а именно: а) подъем по склону горы, б) извержение вулкана, в) вихри и г):

«Когда встречаются теплый и холодный потоки,двигающиеся в противоположных направлениях, более холодный, имеющий большой удельный вес, сместит более теплый, который, будучи таким образом внезапно поднят над поверхностью земли, охладится и часть содержащегося в нем пара выпадает в осадки. Эта причина может действовать в любом месте и почти с любой интенсивностью. Она, вероятно, является наиболее общей причиной дождя, по крайней мере в наших широтах» ([221], стр. 157).

4. Бурь большие и малые

Период между 30 и 50-ми годами XIX в. увидел беспрецедентную активность в изучении бурь — торнадо, тропических ураганов и больших штормов на суше и на море, названных впоследствии циклонами. Результатом всех этих исследований явился чрезвычайно большой прогресс в понимании систем ветров на земном шаре — в том, что позднее было названо Гильдебрандс-

* „Südwinde... an der widerstehenden kälteren Luft wie an einem Berge hinauffliessen“.

соном и Тейсеран де-Бором «динамической метеорологией» в книге, о которой уже шла речь [169]. Читатели, интересующиеся этим вопросом, могут обратиться к ней; здесь я попытаюсь, по возможности, лишь охарактеризовать прогресс в понимании процесса образования дождя в этих бурях.

С изучением этого вопроса после 1830 г. связаны имена Эспи, Лумиса, Пекле, Рейда, Редфилда * — трех американцев, француза и англичанина. Я добавлю потом еще второго француза, оказавшегося совершенно забытым. После 1850 г. европейцы захватили почти всю инициативу, а сам вопрос перешел в большей степени в область теории.

Уильям К. Редфилд начал изучать тропические бури в 20-х годах. Для нас важно, что он впервые истолковал такие бури, как род вихрей ([286], стр. 17)**. Сам по себе этот вывод еще не помог полностью разобраться в теории дождя, но знание его было необходимо. К сожалению, Редфилд приписал падение барометра при приближении такой бури центробежной силе, заметив, что поверхность воды в цилиндрическом сосуде становится вогнутой, если ее там перемешивать.

Прискорбно также, что впоследствии Дове использовал свой авторитет для поддержки этой бесполезной и в принципе неверной идеи. Тем не менее было ясно показано, что такие бури представляют собой большие вихри, и если и были необходимы какие-либо другие доказательства, то они были даны подполковником Рейдом, губернатором Бермудских островов, который, используя сообщения Адмиралтейства, опубликовал большое количество убедительных данных о бурях [290]. Но Рейд интересовался теорией дождя еще меньше, чем Редфилд, и стремился лишь оказать услугу мореплавателям, что ему несомненно удалось.

Примерно в это же время выдающихся успехов в решении этой проблемы добился Джеймс Поллард Эспи. Он оставался глубоко преданным ей до конца своей жизни — столь преданным, что оказался пленником собственных теорий. Его первое публичное выступление на эту тему в довольно мало известном журнале было существенным, поскольку он попытался использовать свойства влажного воздуха для объяснения подъема воздушных масс и образования облаков и дождя ([117], стр. 342; [237], стр. 634).

Хотя в этой статье он не описывает какие-либо лабораторные опыты, из более поздних статей видно, что он делал простые эксперименты, показавшие, что сухой воздух охлаждается примерно в два раза сильнее, чем насыщенный воздух при задан-

* Вклад же других, таких, как Пиддингтон, существен лишь при изучении ветров.

** В XVII в. Варениус [345] и Дампье [76] высказали предположение, что они являются вращающимися штормами.

ном изменении давления. Он знал также, что влажный воздух легче сухого, так что масса влажного воздуха, окруженная более сухим, должна подниматься. Поэтому,

«...если существует в природе какая-то причина, порождающая движение вверх воздуха, содержащего много пара, и поддерживающая это движение долгое время, то количество сконденсировавшегося таким путем водяного пара может быть очень велико и возникший таким образом дождь длился бы, пока влажный воздух продолжал подниматься» ([117], стр. 342).

Далее излагается важнейшая идея:

«Можно предположить, что равновесие вскоре восстановится, в особенности если, как обычно полагают, благодаря конденсации пара сгустится также и воздух, его содержащий.

Это последнее предположение, однако, не факт, поскольку я рассчитал, что количества скрытой теплоты, выделяемой при превращении пара в воду или облако, достаточно для расширения воздуха, в шесть раз большего, чем сжатие, вызываемое превращением пара в воду. Этот расчет основан на следующих трех принципах, доказанных опытом: 1) сумма скрытой и ощущаемой теплоты пара есть постоянная величина и равна 1212° по Фаренгейту; 2) теплоемкость атмосферного воздуха равна 250, а воды 1000; 3) расширение воздуха при нагревании равно 1/480 от всего объема, взятого при 32°, на каждый градус Фаренгейта.

Из этих фактов следует, что всякий раз, когда в восходящем потоке воздуха пар начинает конденсироваться в облако, происходит расширение всей массы воздуха в объеме облака. Это вызывается преобразованием скрытой теплоты пара. Более того, это тепловыделение предохраняет воздух при подъеме от столь быстрого охлаждения, которое происходило бы, если бы расширяющийся воздух был сухим» ([117], стр. 342).

Эспи никогда не излагал детали этих вычислений. Нам неизвестно, читал ли он работы Пуассона, однако в любом случае он не мог почерпнуть эту идею у последнего.

Пойдем, однако, дальше. Приведя некоторые расчеты, он продолжает:

«Далее из этих принципов следует, что, чем выше поднимается этот воздух, тем сильнее нарушается равновесие и последнее не может восстановиться, пока находящийся у поверхности земли очень влажный воздух продолжает притекать к столбу восходящего воздуха.

Ибо во влажном поднимающемся воздухе будет всегда конденсироваться часть пара и происходить выделение его скрытой теплоты, а следовательно, его удельный вес станет меньше, чем у окружающего воздуха. Пока этот процесс происходит, барометр под формирующимся облаком будет падать, даже если дождь не начался: ведь воздух, когда он расширяется в области облака, будет распространяться там в стороны и тем самым уменьшать количество материи, оказывающей давление на ниже лежащие области, и, если известно, на сколько понизилось давление, можно вычислить скорость движения воздуха вверх» ([117], стр. 343).

Он придает этому процессу огромное значение:

«Короче говоря, несомненно все явления — дождь, град, ливни, изменения ветра, понижение давления — легко и естественно объясняются как следствия выдвинутой теории, согласно которой *воздух, содержащий невидимый пар, расширяется, когда этот пар конденсируется в воду*...» *

Уже более трех лет, как я создал эту теорию, и всевозможные факты, собранные мной с тех пор, особенно касающиеся ливня и града, убедили меня в ее правильности» ([117], стр. 344).

На следующий год он опубликовал расширенное изложение своей теории в более доступном месте ([118], стр. 240, 309). Здесь он дает свою собственную, совершенно особую картину тропических бурь и торнадо, исходя из того, что они образованы радиально сходящимися ветрами и что воздух поднимается вверх в их центре. Его вычисления вертикальных скоростей, возникающих таким образом, не совсем ясны, но они привели к эффективным результатам, хотя в то же время могли породить серьезные сомнения в правильности его теории.

Его теория привлекла общее весьма благосклонное внимание, и в 1837 г. он уже — председатель одного временного комитета Конгресса Соединенных Штатов. Теория эта, конечно, противопоставила его Редфилду ([119], стр. 100; [287], стр. 112), утверждавшему, что многие бури по своей природе являются вихрями или смерчами. В первой статье, написанной в 1836 г., Эспи назвал свою радиально-сходящуюся модель «вихрем», употребив это слово несколько раз, и вполне понятно, что Редфилд возражал ему. Он — правда, довольно вежливо — обвинил Эспи и его комитет в том, что они заимствовали некоторые его обобщения, не сославшись на его работы. Я полагаю, что они просто не поняли друг друга: Эспи считал, что Редфилд предполагает наличие нисходящего движения в центре вихря.

В 1840 г. Эспи пересек Атлантику и прочел доклад о своей теории перед Британской ассоциацией ([120], стр. 30). Согласно Эспи, который позднее издал этот доклад в полном виде [121]**, там возникла дискуссия, во время которой Джон Стевелли заявил, что в 1834 г. он использовал идею об охлаждении при разрежении, чтобы объяснить движение бурь. Однако анализ статьи Стевелли ([328], стр. 564) мало что поясняет: он полагал, что выпадение дождя внезапно создает вакуум, куда устремляется воздух.

Эспи послал также сообщение в Парижскую академию наук. Это сообщение было рассмотрено комиссией, состоящей из Араго,

* Курсив Эспи.

* «Введение» на стр. VI—XXVIII. О дискуссии, описываемой на стр. XXVIII—XXXI, в сообщении Ассоциации не говорится, и там вообще отсутствует какая-либо ссылка на нее.

Пулье и Бабинэ, которые необычайно пространно и с большим энтузиазмом доложили его Академии в 1841 г. ([18], стр. 454), выразив в конце надежду, что правительство Соединенных Штатов предоставит Эспи возможность продолжать его важные работы.

Удивительно, что никто из трех весьма заслуженных членов этой комиссии не пытался разобраться в вычислениях Эспи. Так или иначе, принятие его сообщения Академией лишь увеличило самоуверенность Эспи.

В 1841 г. он опубликовал обширную книгу о данном предмете [121], и многие ее страницы были посвящены данным, которые, по мнению Эспи, подкрепляли его идеи о структуре бурь. К этому времени он распространил свою теорию на более обширные перемещающиеся атмосферные системы. В этом случае он истолковывал данные наблюдений, исходя из того, что воздух конвергирует не к центру, а к линии, проходящей обычно в направлении с юго-запада на северо-восток и постепенно продвигающейся через страну. Это, как можно теперь видеть, было правильной и совсем не фантастической интерпретацией имевшихся в то время неполных синоптических данных.

Но еще лучшая интерпретация была разработана Элиасом Лумисом в статье, рассмотренной в конце параграфа 3 настоящей главы и датированной тем же годом, что и книга Эспи. Лумис терпеливо разобрал все метеорологические наблюдения, какие только могли попасть ему в руки, для изучения сильной бури, прошедшей над северо-восточной частью Соединенных Штатов между 20 и 23 декабря 1836 г. Он был поражен резким падением давления на каждой станции и последовавшим за тем быстрым его ростом, а также чрезвычайно неожиданным падением температуры и изменением ветра на северный, произошедшими, когда давление стало расти. Падение температуры было наиболее впечатляющим: в Огасте (Иллинойс) в течение одного утра оно достигло 38°F. Анализируя данные о ветре, Лумис убедился, что «неизбежно следующее заключение: северо-западный ветер оттеснял юго-восточный, подтекая под него... Юго-восточный поток нашел выход, поднявшись выше над поверхностью земли» ([221], стр. 154). На стр. 159 он изображает поперечное сечение того, что теперь можно было бы назвать фронтальной поверхностью.

Лумис, как легко увидит читатель, если он вернется к стр. 135, обратил внимание на процесс «подтекания», в то время как Эспи, проявив гораздо меньшую прозорливость, пренебрег им.

Громадный вклад Эспи в метеорологию заключается в том, что он привлек внимание к одному из источников энергии, приводящих в движение бури, хотя и сильно переоценил энергию поднимающегося воздуха. Вместе с тем он упорно цеплялся за свои ранние заключения и вскоре перестал поспевать за

прогрессом науки. В популярной биографической статье, написанной много лет спустя после смерти Эспи, Кливленд Аббе осторожно указывал на его ошибки:

«Эспи был обременен одним научным дефектом — глубокой убежденностью в правильности своей теории, питавшей его энтузиазм. Из-за нее он не мог продвинуться дальше определенной точки в развитии теории, и по этой же причине его умозаключения часто были ненадежны. Он не был склонен проверять и перепроверять свои послылки и заключения, но считал, что вынесенный им однажды приговор является окончательным и непреложным» ([1], стр. 840).

Мы не можем расстаться с Эспи, не отметив его грандиозное предложение, касающееся вызывания дождя, предположение, которое могло быть сделано лишь во время расчистки или уничтожения — это зависит от точки зрения — величайших лесов Северной Америки.

«Теперь, когда массы древесины с пятидесяти акров леса на расстоянии двадцати миль друг от друга должны быть приготовлены и сжигаться одновременно через каждые семь дней в течение лета на западе Соединенных Штатов на протяжении шестисот или семисот миль с севера на юг, тогда, согласно теории (хотя подобные эксперименты пока не проводились), дождь в области большой протяженности с севера на юг выпадает на линию или рядом с линией огня. Дождь будет продвигаться на восточные окраины и не прекратится, пока не достигнет Атлантического океана. Таким образом, дождь будет по всей стране к востоку от места его возникновения; дождь в любом месте продлится лишь несколько часов ... и количество дождя будет достаточно, но не слишком велико в любом месте...» ([122], стр. 20).

Эспи, таким образом, обещает всевозможные блага, перечисляемые им, по цене полцента на душу в год. Это всесожжение не одобрялось Конгрессом, который в те дни часто возражал даже против довольно небольших научных расходов; однако предложение Эспи заслуживает упоминания как типичное для американского характера. Если бы оно и было осуществлено, это, конечно, не вызвало бы предсказанных им обложных дождей.

Возвращаясь к Лумису, который в 1846 г. опубликовал исследование еще нескольких бурь ([222], стр. 161), мы обнаруживаем, что он в это время знал о том, что энергия, выделяемая при конденсации водяного пара в поднимающемся воздухе, будет мощной добавкой к эффектам «подтекания», и понимал, что вертикальный градиент температуры устанавливается за счет вертикального перемешивания.

Однако до этого во Франции профессором физики Ж. К. Э. Пекле был сделан интересный и важный для будущего вклад в теорию [266]*. Пекле, по-видимому, был первым, кто

* Я воспользовался обзором в „Ann. der Phys.“, 1843, стр. 655—660.

указал, что охлаждение при изменении давления, рассчитанное по уравнению Пуассона, больше, чем обычно наблюдавшееся на воздушных шарах, при котором теплый воздух нижних слоев не может подниматься и даже масса очень теплого воздуха может подняться лишь до определенной высоты. Он указал, как найти эту высоту для массы воздуха, имеющей определенную начальную температуру, при помощи диаграммы, где по оси абсцисс было отложено давление, а по оси ординат температура, строя две кривые — кривую состояния атмосферы и кривую Пуассона для нагретого воздуха. Этот воздух не может подниматься выше уровня, на котором давление соответствует точке пересечения кривых Пуассона и состояния атмосферы. Это было, насколько я представляю, первым использованием аэрологической диаграммы, и это было возможно лишь для ненасыщенного воздуха, к которому применимо уравнение Пуассона.

Теперь я хочу вернуться к 1832 г., году, когда Парижская академия возобновила конкурс на премию за лучшую и полную теорию града. Первоначально конкурс был объявлен в 1830 г., но ни один конкурент не удовлетворил Академию, что было неудивительно ввиду того, что поставленные требования были слишком определены. На повторное приглашение поступило своевременно девять работ. Снова никто не получил приз: Академия требовала невозможного. Однако статья № 7 была отмечена довольно пространно в Заключительном отчете о конкурсе.

Эту статью прислал П. Х. Майль из Сент-Флорентина (департамент Йонна), и если бы она была опубликована, то оказалась бы первой среди всех других попыток применения теории Пуассона к атмосфере, и в частности, для изучения подъема влажного воздуха. Она, конечно, не удовлетворяла всем требованиям конкурса, но если бы комиссия, состоявшая из Араго, Беккереля, Гей-Люссака и Дюлонга (докладчик), действовала не столь административно, а с большей научной проницательностью, это блестящее творение безусловно увидело бы свет.

К счастью, благодаря интересу и помощи г-жи П. Гожа — секретаря-архивариуса Академии — в архивах последней был найден оригинал рукописи Майля вместе с приложением. Основная рукопись, представленная 28 февраля 1834 г., содержит сорок пять листов, исписанных с обеих сторон, а приложение — размером в двадцать одну страницу — поступило 30 сентября 1836 г., гораздо позднее окончания конкурса. Это — пример бескорыстной преданности науке, ясно видимой повсюду в работе Майля, вероятно, не имевшего систематической научной подготовки.

Манускрипт является замечательным документом*, доказы-

* Более обширный анализ работы Майля будет опубликован отдельно.

вающим ясное понимание проблем метеорологии в их тогдашней постановке и столь же похвальную способность к самокритике. Майль начинает с напоминания о взаимозависимости метеорологических явлений и о трудностях, порождаемых невозможностью проведения крупномасштабных экспериментов. Затем он рассматривает модель атмосферы, в которой кубический метр воздуха с определенным начальным давлением, температурой и влажностью поднимается потому, что он немного теплее окружающего воздуха. Используя формулу Пуассона, он прослеживает подъем воздуха до уровня насыщения, однако над этим уровнем — и это собственный вклад Майля — он принимает во внимание как тепло, высвобождаемое при конденсации, так и изменение объема, обусловленное той же причиной, и находит, что поднимающийся насыщенный воздух охлаждается не столь быстро, как ненасыщенный. Он откровенно добавляет, что не способен аналитически разобрать эту проблему, и решает ее численно после ряда попыток и ошибок.

При этом, как он с сожалением указывает, он пренебрег эффектом теплопроводности от окружающего воздуха, перемещиванием на краях и радиацией. Не умея надежно оценить их количественно, он показывает, что эти факторы не могут опорочить его главный вывод. Далее он исследует количество воды, выпавшей из всего столба воздуха, и показывает, что этого более чем достаточно для объяснения ливня. Его, конечно, затрудняет нехватка знаний о вертикальном профиле температуры в окружающем воздухе, и он просто допускает, что последний повсюду на 2°C холоднее, чем восходящий поток, хотя окончательный вывод и не зависит от более точной цифры.

Не больше, чем Эспи, он понимает, что высота, до которой сможет подняться его объем воздуха, непосредственно зависит от распределения температуры в окружающем воздухе.

Но, как бы то ни было, нет сомнения, что он имел бы приоритет перед Эспи, если бы его статья была опубликована. Его приоритет признал Бабинэ в 1849 г. ([23], стр. 301), но по какой-то причине Академия наук не опубликовала его мемуар, даже в том значительном расширенном и улучшенном виде, в каком он, наконец, выпустил его в свет в 1853 г. за свой собственный счет [228]. Он, видимо, так и не привлек внимания ученых.

Но, так или иначе, развитие теории дождя продолжалось и без Майля, и с некоторого времени оно стало зависеть от физиков-теоретиков ([236], стр. 203). В 1862 г. Уильям Томсон (позднее лорд Кельвин), исходя из указаний Джоуля, разработал теорию конвективного равновесия ([336], стр. 170; [337], стр. 125). Непосредственный метеорологический подход к ней предложил Теодор Рейе, который объяснил, что восходящий влажный воздух требует особого рассмотрения, и подчеркнул заключение

Пекле о необходимости изучения вертикального распределения влажности и температуры в окружающем пространстве ([293], стр. 250—276).

В результате он показал, что оценка развиваемой восходящим воздухом мощности, сделанная Эспи, слишком оптимистична и что для того, чтобы вообще произошло выделение энергии, необходимо, чтобы вертикальный градиент температуры превышал определенную величину.

Однако наиболее важная статья 60-х годов по этому вопросу — возможно, самая существенная работа по метеорологии за десятилетие — была написана горным инженером из Тарба А. Пеленом ([269], стр. 299). К несчастью, работа была опубликована в журнале, где ее вряд ли увидели бы метеорологи, и Пелен имел шансы быть упомянутым в истории лишь в скобках*.

Пелен начинает свою работу с расчета адиабатического градиента как для насыщенного, так и для ненасыщенного воздуха и сравнивает результаты своих вычислений с реальными величинами, находя их чрезвычайно хорошо согласующимися.

Далее он спрашивает, как получается, что этот эффект существеннее, чем влияние солнечной и земной радиаций, ветров и бурь. Это не случайно, но зависит от того факта, замечает он, что величины, даваемые его формулами, указывают предел устойчивости атмосферы.

Представим атмосферу, в которой уменьшение (температуры) быстрее, чем соответствующее предельное уменьшение. Для этого рассмотрим

«бесконечно малую массу воздуха и проследим за ее виртуальными перемещениями по вертикали. Она будет охлаждаться при подъеме, но, согласно нашему предположению, понижение ее температуры будет меньше, чем разность температур между слоем, из которого она вышла, и слоем, в который она прибыла. Следовательно, масса воздуха после своего перемещения окажется теплее, чем воздух в слое, в который она пришла; таким образом, она будет легче при том же давлении и будет стремиться продолжать свой подъем за счет одной плавучести, не нуждаясь в каком-либо новом импульсе...

Эти восходящие потоки, видимые глазом благодаря образованию и движению кучевых облаков... можно сравнить с терморегулятором — они возникают в наиболее быстро нагретых местах и прекращают там повышение температуры, они переносят теплый воздух в слои, где атмосфера пока еще холодна» ([269], стр. 306—307).

Благодаря совокупности всех этих эффектов градиент температуры стремится к постоянству. Энергия аккумулируется главным образом в нижних слоях в силу большого поглощения солнечной энергии водяным паром атмосферы и землей.

* Как это и сделал Ю. Ганн ([160], стр. 321). Даже Шнайдер Кариус в своей блестящей фундаментальной работе ([317], стр. 259) упоминает о Пелене, лишь когда цитирует этот отрывок из Ганна.

Пелен затем покусается на динамическую теорию бурь, используя, как и Пекле, диаграмму, на которой, однако, отложена высота по оси абсцисс и температура по оси ординат. Он учитывает, что было бы неверно рассматривать только горизонтальную компоненту перемещения воздуха. Учитывая вращение, он заключает, что энергия, движущая бурю, берется из скрытой теплоты конденсации и что она тем больше, чем больше вертикальный градиент и чем ближе воздух к насыщению. Если воздух станет устойчивым, буря сразу уляжется. Таким образом, каждая вихревая буря сопровождается дождем, ибо лишь тогда, когда воздух охлаждается ниже точки насыщения, возникает движущая сила. Пелен также показывает, что даже очень сильный дождь в умеренных широтах уносит меньше половины воды, находящейся в атмосфере. Чтобы подкрепить свою теорию, он ссылается на большие величины градиента температуры, наблюдавшиеся при граде, и на тот факт, что бури в Северной Атлантике часто как бы следуют Гольфстриму, где преобладают нужные для них условия температуры и влажности.

Рейе, в бытность свою профессором в Страсбурге, поддержал основные выводы хорошо продуманной статьи Пелена в книге, опубликованной в 1872 г. [295]*. Рейе сделал шаг вперед по сравнению с Пеленом, предположив, что поступательное движение вихревых бурь обусловлено обильной конденсацией с их передней стороны, однако в своей рецензии на эту статью Ю. Ганн отметил, что все еще нет объяснения, почему бури движутся на восток и к полюсу, а не по какому-либо другому направлению ([159], стр. 111).

В следующем году, анализируя движение бурь за период в 314 дней в 1872—1873 гг., Элиас Лумис объяснил, что циклоны движутся на восток потому, что к востоку от их центра выпадает больше дождя ([223], стр. 1). Высвобожденная скрытая теплота расширяет воздух, который поднимается и уходит в более высокие области, создавая к востоку от центра бури пониженное давление. Здесь следует отметить, что даже в четвертом издании «Закона штормов» Г. В. Дове ([108], стр. 161) — великого климатолога, которого, однако, не коснулся прогресс динамической метеорологии, — утверждается, что восходящий поток воздуха не поддерживает движение бури и не управляет им, но допускается, что вихри наблюдались над большими пожарами.

В своей уже упомянутой статье 1874 г. Ганн дает блестящее обобщение современной ему теории. Но из него видно, что даже

* Упоминание о солнечных пятнах в заглавии ее связано с совершенно ошибочной теорией циклонов, которую в течение более тридцати лет упорно защищали А. Мариэ-Дави и А. Фай, занимавшие крупные официальные посты в Париже. Для рассмотрения их теории у меня нет места.

Ганн — безусловно один из крупнейших метеорологов — не понимал всех следующих из теории выводов. Описывая то, что теперь мы называем теплым фронтом, у которого перисто-слоистые облака предшествуют слоисто-кучевым, он так объясняет дождь, выпадающий из них:

«...образование нижнего слоя слоисто-кучевых облаков происходит незаметно из опускающихся перисто-слоистых. Это значит, что потоки воздуха наверху должны быть относительно столь холодными, что они могут охлаждать ниже лежащие слои даже при опускании» ([160], стр. 340).

Так происходит летом. Для зимы Ганн мог лишь допустить, что верхнее теплое течение становится сильнее и перемешивается с более холодным воздухом внизу близ их границы. В оправдание ошибки Ганна следует сказать, что это явление оставалось непонятым вплоть до первой мировой войны.

Упоминание перисто-слоистых облаков дает нам повод вернуться к 1866 г. — к двум статьям Рену ([291], стр. 825), более известного как климатолога. Он полагал, что для образования осадков нужны два слоя облаков: перистообразные облака вверху, из которых ледяные кристаллы попадают на переохлажденные капли облаков нижнего слоя. Эта идея на несколько десятилетий опередила свое время и — конечно, в скрытой форме — поставила много вопросов, на которые тогда не было ответа. Но Рену отметил возможную роль воды в твердом состоянии — факт, приведший Генриха Герца к дальнейшему развитию термодинамики влажной атмосферы ([167], стр. 421).^{*} Герц указал, что если объем воздуха поднимается достаточно высоко, он пройдет последовательно четыре состояния: 1) сухую стадию, пока он не насыщен; 2) стадию дождя, когда в нем присутствуют насыщенный пар и жидкая вода; 3) стадию града, когда вместе присутствуют насыщенный пар, вода и лед; 4) стадию снега, при которой в воздухе присутствуют пар и лед.

В 1888 г. В. Бецольд, тогда профессор метеорологии в Берлине, написал первую ([37], стр. 485, 1189) из серии статей, показавших, как применять теорию к данным о верхних слоях воздуха, которые к тому времени стало возможным изучать. Эти методы, однако, выходят за рамки нашей книги.

Я закончу этот раздел цитатой из статьи, открывающей блестящую серию статей Фрэнка Г. Биджлоу из Бюро погоды США, дающей представление о том, каким образом термодинамическая теория взаимодействовала с синоптическими и аэрологическими наблюдениями в первом десятилетии XX в.:

«Окончательно установлено, что над Соединенными Штатами в атмосфере не бывает местных циклонов или антицикло-

^{*} Герц известен благодаря принадлежащему ему экспериментальному доказательству существования электромагнитных волн, известных сегодня как микроволны.

нов с холодными или теплыми центрами и что все дискуссии о них шли по ложному пути. Наблюдения показывают, что в нижней атмосфере истинный механизм заключается скорее в мощных противотечениях холодного и теплого воздуха, которые текут под преобладающим здесь переносом к востоку. Центры вихрей находятся неизменно в области, где встречаются друг с другом приземные потоки, на краю, а не в середине теплых или холодных областей. Примерно половина циклона — относительно теплая, а другая половина — холодная, в то время как у антициклона теплой является противоположная половина, а другая половина — холодная. Таким образом, в Соединенных Штатах восточный и северный секторы циклона, а с ними западный и северный секторы антициклона теплые, а остальные секторы — холодные. Теплый воздух течет с юго-запада на восток в циклоне и на запад в антициклоне, а холодный воздух течет с северо-запада на восток в антициклоне и в западную часть циклона. Тот и другой образуют два потока, чьи температуры отличаются друг от друга и от общей температуры преобладающего восточного переноса. Эти потоки стремятся выравнять их температурное различие посредством взаимопроникновения, образуя циркуляционные структуры, известные как циклоны и антициклоны. Тепло, полученное тропическими зонами земли от солнечной радиации, в значительной степени переносится в умеренные зоны протяженными горизонтальными течениями в нижних слоях и там расходует на образование локальных циркуляций. А те проникают в верхние потоки восточного переноса и стремятся замедлить его движение до умеренных скоростей, которые существуют в пределах десятимильной зоны над землей. Эта стратификация и взаимопроникновение потоков с различными температурами являются истинными источниками энергии бурь. Тепловая энергия, создаваемая конденсацией водяного пара, и энергия, произведенная чисто динамическими вихрями, совершенно второстепенны по сравнению с термодинамической энергией, выделяющейся при столкновении и натекании теплых южных потоков на холодные северные потоки под восточным воздушным течением» ([38], стр. 9).*

Таков был материал, который получил применение позднее, между двумя мировыми войнами.

5. Рост дождевых капель

Имеются два очевидных способа роста мелких капелек до размеров дождевых капель, которые падают с неба и стучат по мостовой: они либо накапливают воду, пролетая через влажный воздух, либо растут за счет слияния. Возможно, что происходит то и другое, и оценка относительного вклада этих двух процессов — важная задача физики облаков.

Читатель может вспомнить, что в XVIII в. было показано, что с увеличением высоты установки того же самого дождемера

* Заметим, что подобную идею о происхождении энергии атмосферных движений изложил подробно годом раньше в статье «Об энергии бурь» М. Маргулес („Über Energie der Stürme“, „Jahrb. d. k. Zentralanst. f. Met.“ Bd. XL, 1905, S. 12). (Прим. ред.)

зарегистрированное им количество дождя уменьшается*. Согласно объяснению, принятому тогда почти всеми, капли растут за счет конденсации на них пара по мере приближения к земле. Со временем возникло сомнение в правильности такого объяснения: например, Х. Боаз из Пензанса в 1822 г. заметил, что различие осадков на разных высотах по какой-то причине пропорционально скорости ветра ([43], стр. 18), и, предполагая, что оно вызвано вихрями, рекомендовал измерять осадки дождемером, отверстие которого расположено на уровне большой площадки Земли. Но в это время почти никто не сомневался в том, что капли растут по пути вниз.

Здесь нет места, чтобы вдаваться в детали этого вопроса**. В. Грей младший и Дж. Филипс в Йорке провели исследование, нашедшее большой отклик, о котором было доложено Британской ассоциации в 1833—1835 гг. ([146], стр. 171, 401, 560). Обнаружив, что различия осадков в зимнее время больше бросаются в глаза, чем летом, они предположили, что эти различия определяются температурой и отказались в довольно ясных выражениях от идеи зависимости явлений от ветра и вихрей.

Это исследование было аккуратно изложено в сообщении Поггендорфа в его «Appalen», однако он дополнил его некоторыми вычислениями ([275], стр. 222). Делая довольно широкие допущения о содержании водяного пара, он показал, что наблюдения Грея и Филипса нельзя объяснить, если конденсация является единственной причиной обнаруженных различий. В 1838 г. профессор А. Д. Бейк из Филадельфии, не согласившийся с заключениями Грея и Филипса, сделал сообщение ([24], стр. 25) о том, что он установил четыре одинаковых дождемера по углам парашута квадратной артиллерийской башни высотой 162 фута и со стороной 12 футов. Он нашел, что в дождь при сильном западном ветре показания юго-восточных и северо-западных дождемеров относятся как 2,32 к 1. Когда дождемеры на шестах поднимали на 6 футов над парашутом, их показания почти выравнивались.

Этот простой и, как можно видеть, убедительный эксперимент остался, по-видимому, незамеченным. Так, в 1840 г. известный физик Джеймс Форбс из Эдинбурга в официальном отчете Британской ассоциации принял теорию Грея и Филипса, оптом и в розницу ([129], стр. 112). Однако опыт накапливался, и в 1861 г. У. С. Джевокс смог окончательно доказать связь явления с ветром и с возмущением линий тока ветра вблизи такого препятствия, как дождемер ([185], стр. 421).

В результате всех этих работ было доказано, что крупные

* См. выше, стр. 88.

** В работе [200] перечисляется 77 исследований о влиянии высоты установки на измерение дождя.

дождевые капли не растут заметно на последнем участке своего пути к земле; однако что же происходит в облаках? В XIX в. сведения об этом могли быть получены лишь косвенным путем.

В теоретическом аспекте чрезвычайно важный шаг вперед был сделан Томсоном в 1870 г. ([338], стр. 63). Он показал, что из-за поверхностного натяжения давление пара над искривленной поверхностью жидкости отличается от давления над плоской поверхностью. Над капелькой избыток давления по сравнению с плоской поверхностью пропорционален обратной величине радиуса капельки. Применение этого вывода к нашей проблеме очевидно. Пусть облако состоит из большого числа капель различных размеров. Тогда давление пара над поверхностью более мелких капелек будет больше, чем над более крупными, и вода, следовательно, будет испаряться с более мелких и конденсироваться на более крупных.

Таким образом, рост облачных капелек должен в некоторой степени происходить за счет накопления пара. Но в какой мере? Знаменитый инженер О. Рейнольдс в 1877 г. рассмотрел этот вопрос в [296] и нашел, что процесс этот развивается слишком медленно. А следовательно, капли должны расти, присоединяя другие облачные частицы, пока не достигнут своего предельного размера, при котором они разбиваются на брызги под напором встречного потока воздуха.

Но к концу XIX в. было очень немного известно о действительных размерах дождевых капель и о скорости их падения. Последние были исследованы обстоятельно П. Ленардом в 1904 г. ([214], стр. 249).

Капли, установил он, можно по их диаметру разделить на три группы: *A* — малые капли, конечная скорость которых пропорциональна квадрату радиуса *; *B* — более крупные капли, диаметром до 1,1 мм, скорость которых растет как корень квадратный из радиуса благодаря турбулентности; *C* — капли эти настолько крупные, что они деформируются при падении; последние можно изучать лишь экспериментально. Он утверждает, что наблюдал эту деформацию уже в 1887 г. при освещении вспышкой; фактически Г. Магнус наблюдал ее таким же образом еще в 1859 г. ([226], стр. 21). Ленард проводил тщательные эксперименты, в которых капля определенного размера подвешивалась в направленном вверх потоке воздуха. Наиболее неожиданный результат заключался в следующем: капли любого диаметра более 4,5 мм имеют скорость около 8,0 м/сек.⁻¹; эта скорость лишь в два раза больше скорости падения капли диаметром 1 мм.

Вычисления показывают, полагал Ленард, что капельки могут часто сталкиваться, если они отличаются размерами, — как

* Согласно закону Стокса (см. выше, стр. 56).

это и происходит в природе. Но тем не менее многие облака не образуют дождя. Очевидно, многие столкновения не приводят к слиянию, и Ленард полагает, что этому мешает абсорбированный ими слой воздуха или, возможно, электрические заряды.

Распределение дождевых капель по размерам было изучено в 1895 г. Юлиусом Визнером ([359], стр. 1397) в тропиках и более подробно в Европе в 1905 г. А. Дефантом ([85], стр. 585). Проверив точность метода Визнера — улавливания дождевых капель на фильтровальную бумагу, покрытую краской (эозинном), и измерения образовавшихся пятен, — Дефант измерил 10 017 дождевых капель. Он нашел, что веса капель группируются около значений, кратных некоторому небольшому весу, особенно около значений 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16 и т. д. с главными максимумами около 1, 2, 4, 8. Так было в отдельных дождях, как в спокойных и затяжных, так в сильных и бурных.

Этот вывод, очевидно, подкреплял теорию роста капель посредством слияния. Дефант полагал, что перегонка пара на крупные капли происходит очень медленно и что основной рост обуславливается слиянием. Его результаты позволили считать, что капли одинаковых размеров сливаются легче, чем капли разных размеров.

В 1908 г. Вильгельм Шмидт ([315], стр. 496) объяснил это гидродинамическим притяжением, возникающим, когда две капли падают бок о бок с одинаковыми или почти одинаковыми скоростями. Он показал, что необходимые для слияния начальная скорость и время соответствуют наблюдаемым.

Эти исследования заложили фундамент для большей части той увлекательной области знания, которую ныне называют физикой облаков. Усовершенствование техники и теории быстро пошло вперед, особенно после 1945 г. *

6. Ядра конденсации

Теперь мы должны вернуться к процессам, которые превращают невидимый водяной пар в видимые осадки, и вспомнить сравнительно недавнюю историю физики первой стадии этого процесса — конденсации пара в мельчайшие частицы облаков и туманов.

В течение более чем двух столетий, прошедших после того, как Герики заметил облачко в своем воздушном насосе, считалось, что это изменение состояния происходит без какого-либо посредника. Когда стало известно, что при расширении воздух охлаждается **, было без колебаний предположено, что водяной

* Читатель может обратиться к книге Б. Мейсона [233].

** См. выше, стр. 133.

пар конденсируется в облако или туман, как только воздух, в котором он содержится, достигает точки росы. Никаких осложнений в толковании этого процесса не предвиделось вплоть до 1875 г., когда П. Ж. Кулье сообщил о нескольких поразительных экспериментах ([63], стр. 165, 254).

Кулье проводил опыты с туманом, возникающим при внезапном расширении воздуха. Его прибор состоял из стеклянной колбы, содержавшей некоторое количество воды; она соединялась трубкой с полым резиновым шаром. Это была полностью замкнутая система, и давление в колбе могло быть внезапно понижено или повышено по желанию без проникновения в систему свежего воздуха извне. Кулье обнаружил, что при повторных опытах туман образовывался не каждый раз. Это с очевидностью противоречило обычному объяснению. Кулье также обнаружил, что, если воздух оставить в колбе на несколько дней или если несколько минут встряхивать колбу с водой, при расширении воздуха в нем не будет образовываться туман. Однако если некоторую часть этого неактивного теперь воздуха заменить комнатным воздухом, облака вновь появятся. Кулье предположил, что при этом в колбу попадает что-то помимо атмосферных газов; он попытался фильтровать комнатный воздух через вату. Воздух стал неактивным, и Кулье пришел к заключению, что для образования облака в колбе необходима пыль. Понимая, как это важно, он обратился к очень известному физику Э. Э. Н. Маскару, который повторил его эксперименты и подтвердил их результат.

Интересно, что еще в 18-м столетии к этому же открытию был совсем близок виртуоз эксперимента аббат Нолле ([253], стр. 243), когда он искал причину появления «пара» в приемнике его воздушного насоса при первых движениях поршня. Первоначально он предположил, что это конденсируется влага из кольца влажной кожи, на котором стоял колокол насоса. Тогда он удалил его и приклеил колокол к плате мягким воском. Сделав это, он думал, что отделался от источников влаги; но «пар» вновь появился, когда он привел в действие насос. Тогда он заключил, что:

«Есть все основания полагать, что этот род пара, причину которого мы ищем, является не чем иным, как инородными телами, которые находятся в воздухе, содержащемся под колоколом» ([253], стр. 244).

Заметим, что Нолле представлял туман состоящим из невидимых инородных частиц, которые становятся видимыми, слипаясь в комки. Многие из его многочисленных опытов были очень остроумны. Он обнаружил ослабление тумана в своем сосуде, когда эксперимент проводился в чистой комнате со стороны дома, противоположной его лаборатории, в которой он перегонял лаванду, пользуясь различными сортами красок. Он,

по-видимому, не пытался фильтровать воздух. И, конечно, он не представлял, что влаги, содержащейся в воздухе при условиях, в которых он работал, достаточно для образования тумана, состоящего из жидких капель.

Возвращаясь к Кулье, мы с удивлением обнаруживаем, что его замечательный результат был заново открыт Джоном Айткеном, который доложил о нем Королевскому обществу в Эдинбурге в 1881 г., будучи уверенным, что его работа вполне оригинальна ([6], стр. 337). И только когда письмо в «Nature» ([149], стр. 337) обратило его внимание на опыты Кулье, он понял, что его обогнали, и легко это признал ([7], стр. 374).

Исследования Айткена пошли значительно далее, чем сделанные Кулье и Маскаром. Он обнаружил, что чем меньше частиц, тем крупнозернистей структура образовавшегося тумана. Очевидно, наличный пар распределился по частицам. Из чего же состоит пыль? Должно существовать много источников ее:

«Все то в природе, что стремится разрушать вещество на мельчайшие частицы, вносит свой вклад.

Вероятно, брызги морской воды, после того как они высохнут, оставив лишь мельчайшую соляную пыль, создают один из наиболее важных источников облакообразующей пыли. [Имеются также] метеоритная пыль, вулканическая пыль и сконденсировавшиеся газы» ([8], стр. 343).

Различные вещества доставляют ядра конденсации при нагревании, но прокаленные металлы, стекло и т. п. потом перестают образовывать (если их поддерживать чистыми) ядра при более низкой температуре. Продукты сгорания, даже те, что находятся в бездымном пламени обеспыленного газа в профильтрованном воздухе, содержат многочисленные частицы, на которых при подходящих условиях будет формироваться туман.

«Из этого следует, что видимые частицы пыли не образуют ядра тумана и облачных капель... Ядра тумана и облаков — гораздо более тонкий род пыли и совсем невидимы. И, хотя они всегда присутствуют в нашей атмосфере в громадных количествах, действие их чаще всего нельзя обнаружить» ([8], стр. 350).

Айткен писал в манере, даже тогда нечасто встречавшейся в научных трактатах. Я не устою перед искушением процитировать заключение первой части статьи, о которой идет речь:

«Океан, который под тропическим солнцем спокойно отдает воду, уносимую текущим воздухом, как будто раскаивается в содеянном. Когда он мрачен и взволнован бурным ветром, он разбрасывает свои брызги, которые, высохнув и превратившись в мельчайшую пыль, становятся его посланцами. Они принуждают воду прекратить ее существование в виде пара, выпасть оплодотворяющим дождем и вновь вернуться в свою водяную обитель» ([8], стр. 355).

В дальнейших опытах он показал, что различные вещества в состоянии мельчайшего раздробления крайне неодинаковы по своей способности становиться ядрами. Многие гигроскопические «пыли» могут образовывать «сухой туман» в ненасыщенном воздухе, и Айткен использует это в качестве еще одного доказательства важности высохших морских брызг для метеорологии.

У нас нет возможности проследить за дальнейшими исследованиями этого великого экспериментатора касательно ядер атмосферы*. В 1888 г. он сообщил Королевскому обществу в Эдинбурге, что может сосчитать не только частицы, содержащиеся в единице объема воздуха, но и частицы, активные при любой данной степени перенасыщения ([9], стр. 1). Из-за зависимости давления пара от радиуса частицы для конденсации на более мелких частицах требуется большее перенасыщение. Эта работа была выполнена с помощью очень громоздкого прибора. Позднее Айткен сделал портативный прибор; в конце концов он создал «простой карманный счетчик пыли» ([11], стр. 39), который и служил ему и многим другим наблюдателям всего мира много лет.

У меня нет возможности разбираться в деталях исследований Айткена, но я считаю необходимым дать представление о его выводах. Наиболее существенный из них заключался в том, что на многих ядрах вода осаждается, даже если воздух не насыщен. Облако, образующееся при этом из мелких капелек, — это то, что мы знаем как дымку. Если относительная влажность возрастает, частицы собирают большее количество воды и вырастают, так что дымка становится плотнее. Близ точки насыщения меняется природа конденсации; обильный пар конденсируется предпочтительно на более крупных капельках и быстро формируется облако с иными оптическими свойствами, чем у дымки ([10], стр. 193). Однако гигроскопичность ядер уменьшает тенденцию более крупных капель расти за счет более мелких. Это происходит из-за того, что по мере испарения более мелких капель в них возрастает концентрация гигроскопических веществ, в то время как в больших каплях она уменьшается, когда их размер увеличивается ([12], стр. 416).

Как было отмечено Генрихом Махе ([284], стр. 554), при небольшом перенасыщении могут становиться активными даже негигроскопические ядра. При данной степени перенасыщения капли определенного радиуса находятся в равновесии с окружающим водяным паром; однако требуемая величина перенасыщения быстро возрастает с уменьшением радиуса и, поскольку перенасыщенность атмосферы всегда очень невелика, очень малые негигроскопичные ядра не могут стать в ней активными.

* Его книга „Collected works“ весьма увлекательна для чтения.

Газовые ионы и группы молекул воды также не будут действовать как ядра конденсации в атмосфере*.

Информацию об истинном составе ядер было трудно получить, но Айткен не сомневался, что морская соль и продукты сгорания — два главных класса ядер. Это было подтверждено Альбертом Вигандом, по крайней мере для нижней атмосферы ([360], стр. 10). Виганд, который весьма интересовался верхней атмосферой, полагал, что там должны играть большую роль «растворенные газы», и искал доказательство этому. Он также делал опыты, которые показали, что твердые частицы реальной пыли в процессах конденсации играют незначительную роль, если пыль негигроскопична. Прибор Айткена, как он правильно предложил, было бы вернее называть счетчиком ядер (Kernzähler), а не счетчиком пыли. В дыме содержится очень большое число ядер из-за присутствия в нем гигроскопичных продуктов сгорания.

* Читатель, хорошо знакомый с камерой Вильсона, должен помнить, что она действует при больших степенях перенасыщения.

ГЛАВА IX

ТЕОРИИ РОСЫ И ИНЕЯ

1. Ros. roris, m. . . роса
2. Ros, Roris, m. [Макробий] — имя, данное божеству, сыну Воздуха и Луны.

Кишера и Давелюи «Латинско-французский словарь»

Среди всех гидрометеоров роса, вероятно, наиболее тесно связана с художественной литературой, с фольклором и, как подсказывает приведенная цитата, с мифологией. Лунные ночи — ночи ясные, благодаря им древние люди и предположили, что луна (*rorifera luna*) вызывает росу.

Аристотель подошел к этому явлению более сложно. В «Метеорологии» он говорит нам:

«То количество влаги, испарившейся за день, которое не поднялось высоко потому, что количество огня, поднимающего ее, мало по сравнению с количеством воды, находящейся во взвешенном состоянии, выпадает вновь, во время ночного похолодания, и это называется росой или инеем. Иней образуется, когда то, что испарено, замерзает прежде, чем сгустится опять в воду. . . Роса возникает, когда пар сгустился в воду. И роса, и иней образуются при ясной холодной погоде: влага поднимается лишь при ясной погоде, а конденсация невозможна при ветре» ([19], стр. 73).

Мы можем предположить, что мало кто рискнул бы не согласиться с этим выводом, который даже на современный взгляд выглядит вполне физичным, за исключением одной или двух фраз; и на протяжении многих веков вывод этот повторяли вновь и вновь. Мы перескочим сразу в год 1548-й, когда Антуан Мизо, проницательный наблюдатель, немного улучшил Аристотеля и добавил свои собственные правильные замечания ([243], стр. 22), как, например, то, что роса не будет образовываться под палаткой. Аристотель считал, что роса лучше возникает при южных

ветрах, чем при северных, «...что Вы признаёте, при погоде, господствующей в этой стране [Франции], — говорит Мизо, — не всегда правильным» ([243], стр. 23). Важнее то, что он сравнивает образование росы и технический процесс дистилляции; именно, роса может образоваться за счет

«превращения и кругооборота самого пара, когда он входит в соприкосновение с неким холодным и массивным телом, что, как мы видим, происходит в кубе дистиллятора и в котле, кипящем на огне; а когда пар вновь попадает на крышку котла, то, если она вообще холодная, пар накапливается на ней и превращается в субстанцию воды» ([243], стр. 24).

А мороз, даже слабый, может превратить в изморозь и туман (*grimas et brouillat*) вещество, которое при других условиях образовало бы росу.

Таким образом, к XVII в. было совершенно ясно, что роса — это результат конденсации пара; однако остались две проблемы. (1) Поступает ли пар из земли или из воздуха, или говоря более простым языком, «падает» роса или «поднимается»? (2) Что является источником холода, необходимого для конденсации пара? Второй вопрос заострился в дискуссию о причине и следствии: холод ли образует росу или наоборот? На эти вопросы не было дано полного ответа вплоть до конца XIX в.

Что на первый вопрос могут быть два ответа, стало ясно по крайней мере уже в 1687 г., это видно из дискуссии в Королевской академии наук (в Париже), где было сказано вот что:

«Некоторые говорят, что роса поступает от земли, а не выпадает сверху, потому что на стеклянных колпаках* мы наблюдаем такое же количество росы, как и в открытых местах. Другие полагают, что роса непосредственно приходит от земли, но поднимается на некоторую высоту и вновь падает вниз, так как у тех, кто прогуливается по вечерам или рано утром, волосы оказывались влажными от росы. В течение дня эти частицы влаги перемешаны и удерживаются в воздухе, а в течение ночи они уплотняются и таким образом становятся тяжелее» ([170], стр. 21).

Здесь налицо два различных явления, и в XVIII в. почти все главные исследователи этой проблемы допускали, что роса может либо «подниматься», либо «падать», но, конечно, прогресс в этом вопросе не мог опережать изучение природы и свойств самого водяного пара.

Один из первых серьезных экспериментов сделал Христиан Людвиг Гарстен, чьи мысли о росе — по-видимому, самая лучшая часть его книги по метеорологии [134]. Гарстен пришел к заключению, что в действительности роса поднимается от земли. Он отметил, что, когда медная пластинка была

* Cloches de verre, которыми пользовались в садоводстве.

положена на землю или подвешивалась низко над ней на нитях, нижняя поверхность ее оказывалась покрытой росой, но, если она подвешивалась на высоте пяти футов, росой покрывались обе поверхности.

Такие вещества, как сено, солома и шерсть, в одинаковой степени покрывались росой как с верхней стороны, так и со стороны, обращенной к земле.

О гораздо более тщательных экспериментах сообщил К. Ф. дю Систерней дю Фей, чья безвременная смерть в 1739 г. лишила науку об электричестве одного из самых талантливых его исследователей. В большой статье о росе [111] дю Фей высказал мысль, что она поднимается от земли. Оказалось, что росы всегда собиралось больше на поверхностях, более близких к земле, и почти всегда было больше росы на нижних сторонах горизонтальных пластин. Эти эксперименты, которые он ставил по советам Петруса Мушенбрука, находились в тесной связи с подобной работой, проводившейся последним в Утрехте. 27 августа 1735 г. Мушенбрук написал ему о нескольких экспериментах, в которых несколько поверхностей, одинаковых, но окрашенных в разные цвета, собирали различные количества росы. Дю Фей немедленно окрасил несколько сосудов, а один оставил невыкрашенным; этот последний собирал наибольшее количество росы, а желтый и белый — наименьшее. Он также обнаружил, что стекло, фарфор и другие материалы, подобные стеклу, собирают очень много росы, в то время как на полированных металлах она почти не образуется. Эксперименты такого рода, очевидно, чрезвычайно усложнили проблему.

Наблюдения Мушенбрука были опубликованы в его распространенном учебнике физики, на который я ссылался ранее [249]. Большая статья о росе (стр. 753—785), которая касается его собственных наблюдений, составляет один из лучших разделов книги. Он признает, что причина, по которой роса более обильно выпадает на некоторые виды поверхностей, чем на другие, ему непонятна. Однако он завоевывает наше уважение тем, что отвергает гипотезы об электричестве и о химическом притяжении. По его мнению, роса на растениях есть выделение самих растений, отличное от росы на других объектах. Он полагает, что большая часть росы поднимается, но допускает также, что некоторая ее часть падает — по крайней мере в Утрехте, оговаривается он с обычной для него осторожностью, ссылаясь в подтверждение этого на несколько экспериментов. Как же смачивает она поверхности, ориентированные в том или ином направлении?

«В самом деле, когда мы говорим, что роса падает, мы не утверждаем, что она падает столь стремительно, как дождь, а лишь крайне медленно, подобно очень тонкому туману, тихо оседающему из воздуха, в котором он взвешен. Если при этом

частицы притягиваются каким-либо предметом, либо сбоку, либо сверху, либо снизу, то они неизбежно будут двигаться к нему. В этом отношении он аналогичен полной бутылке вина, извлеченной из холодного подвала в теплую и влажную атмосферу, когда она сразу становится влажной со всех сторон, так как тепло, связанное с частицами влаги (*le feu, qui tient aux porties humides*), стремится проникнуть внутрь холодной бутылки со всех направлений и поэтому отделяется от частиц влаги, которые и остаются на наружной поверхности бутылки» ([249], стр. 766).

Этот последний отрывок есть блестящее описание соотношения между теплом и водяным паром, как его представляли в то время. Что мы не должны упускать из виду, так это то, что здесь поведение бутылки с вином — только лишь подобие, или модель, образования росы. Следующим шагом было доказательство их идентичности.

Это было сделано Шарлем Леруа из Монпелье, важную статью которого ([216], стр. 481—518) я цитировал довольно подробно выше, в главе II.* Леруа проделал много наблюдений со своим конденсационным гигрометром и заключил, что роса выпадает из воздуха. За исключением случаев, когда менялся ветер, роса на площадке Обсерватории в Монпелье наблюдалась всегда, когда температура за ночь падала ниже точки росы (*degré de saturation*). В качестве стандартного предмета для наблюдения за росой он использовал бутылку из белого стекла. Он заметил, что в центре города роса появлялась реже, по его словам, потому, что температура там не падала столь низко, как за городом.

Роса, говорит Леруа, образуется в атмосфере повсюду вблизи земли и оседает на ближайшей поверхности, и таким образом намокают обе поверхности, верхняя и нижняя. Однако поверхность не должна отталкивать росу — свойство, которое он приписывает полированным металлам.

Помимо этой воздушной росы, имеется два других вида ее — «плотный пар, подобный туману», который поднимается в течение ночи на несколько футов над сырыми луговинами, и роса, которая образуется на растениях, когда ее нет на твердых телах. Эти явления следует приписать главным образом пару, поднимающемуся от земли. Воздух ночью не остывает столь же сильно, как листья растений. Поскольку листья холодны, они перехватывают пар, идущий от земли на его пути вверх. Леруа отклоняет идею Мушенбрука о том, что такая роса есть выделения растений, замечая, что тонкая пластинка стекла в подобных условиях тоже покрывается росой. Он не соглашается с интерпретацией д-ра Феем его экспериментов с горизонтальными

* Читателю, который пожелает освежить этот отрывок в своей памяти, рекомендую вернуться к стр. 32.

пластинками, утверждая, что пластина вблизи земли собрала бы росу от земли намного раньше, чем верхняя пластина собрала бы ее из воздуха *.

Примерно в то же время в Петербурге над проблемой испарения работал Г. В. Рихманн ([298], стр. 145—161). Посредством различных экспериментов он нашел, что, если вода была холоднее окружающего воздуха, потеря или увеличение ее веса зависели от разницы температур (очевидно, они зависят также и от влажности воздуха); и оказался достаточно проницателен, чтобы предположить, что это может иметь отношение к явлению росы и спору о том, «падает» ли она или «поднимается». Он думал, что если воздух отягощен паром, то может происходить и то, и другое. Очень важно то, что он обнаружил образование ночью температурной инверсии:

«Если возникнет большая разница между температурами более теплого воздуха наверху и нижнего воздуха вблизи поверхности земли и около тел, расположенных непосредственно у почвы, и если их поверхности велики по сравнению с количеством содержащегося в них вещества, они будут сильно притягивать пары и должны стать большими собирателями пара на своих поверхностях, особенно если добавляются пары, поднимающиеся от земли... Следовательно, если утром обнаружено много осевших паров, то либо была большая разность температур между более теплым верхним воздухом и холодным нижним воздухом, либо воздух переполнен парами, либо и то, и другое» ([298], стр. 160).

Что бы ни происходило с приземным воздухом, Рихманн, говоря языком детской игры, обнаружил, где «горячо». Но, поскольку историк обязан обращать свое внимание и на идеи, которые впоследствии оказались бесплодны, а не только на плодотворные гипотезы, то я прерву свое повествование, чтобы отметить два подхода к явлению, не принесших большой пользы.

Первый касается инея ([365], стр. 547—554). Автор этой статьи наблюдал его, когда температура (по-видимому, на некоторой высоте от земли) была выше нуля. Он заметил также сходство между морозными узорами на окнах и кристаллами соли, остающимися на противне после выпаривания. Так он вернулся к старой теории замерзания (которая была отвергнута еще Бойлем), требовавшей существования «холодящих частиц» некоей неидентифицированной соли. «Мне кажется, — говорит он, — что эта очень старая теория замерзания вполне достаточна, чтобы объяснить все явления так, чтобы не было необходимости в электричестве или других новшествах» ([365] стр. 554).

* В библиотеке Иельского университета в фонде Делюка имеется несколько неопубликованных наблюдений последнего за росой, датированных 1749 г., несколько схожих с наблюдениями Леруа. Можно предположить, что появление статьи Леруа отвлекло Делюка от этого предмета.

Поставщики новшеств, однако, не дремали, и об этом свидетельствует статья Франца Карла Ахарда, написанная в Берлине, под зловещим заголовком «Sur l'imperfection de la météorologie» («О несовершенстве метеорологии») ([2], стр. 14).

Он наблюдал, что появлению росы предшествует в предыдущий день сильная «электрическая атмосфера». Он полагает также, что роса более обильно выпадает на «электрики» (непроводники), чем на «неэлектрики» (проводники), и заключает, что электричество, «если и не всегда, то по крайней мере очень часто вызывает росу» ([2], стр. 17).

Но вернемся на главный путь. Делюк знал, что облака препятствуют образованию росы, а также уменьшают ночное охлаждение. Как он считал, причина этого в том,

«что, когда при заходе солнца облаков нет, или они исчезают, тепло нижнего воздуха и то, которое поднимается от земли, рассеивается в верхние области и тогда пары, которые были распределены повсюду в воздухе, *конденсируются и вновь выпадают росой*; но когда облака сплошные и отделяют поэтому нижний воздух от верхнего, они предотвращают это рассеяние тепла и пары остаются взвешенными» ([89], стр. 454).

Выделенное мной курсивом заключение, вероятно, было уже устарелым в 1773 г. А что касается того, как рассеивается тепло, какова роль излучения тел при обычных для метеорологии температурах, то это было выяснено лишь через несколько десятилетий.

Следующее важное исследование было сделано Патриком Вильсоном, астрономом из обсерватории Макферлана, близ Глазго. Оно касалось инея. Вероятно, этим вопросом Патрик Вильсон заинтересовался благодаря работам своего отца, Александра Вильсона, который делал опыты с испарением льда холодной зимой 1767-68 г. ([361], стр. 326). Зима 1779-80 г. также была очень холодной ([362], стр. 451). Патрик Вильсон взял несколько сравнимых термометров и измерял температуры поверхности снега, воздуха над ним на высоте 30 дюймов, температуру вблизи отложения инея и т. п. Однажды термометр, установленный на снегу, показал на 14° F ниже, чем термометр в воздухе. Помня о результатах, полученных его отцом, он не устоял перед соблазном приписать это испарению со снега, но зато придумал прекрасный простой эксперимент для проверки этой гипотезы. Он взял кузнечные меха и дал им остыть, а затем дунул на термометр, лежащий на снегу, но вместо того, чтобы падать дальше, он поднялся приблизительно до температуры воздуха. Эксперимент впоследствии был изменен: Вильсон обмахивал термометр листом плотной бумаги, прикрепленной к концу тонкого прута, но результаты получились аналогичные. В конце концов он взял полностью заиндевевший термометр и

стал его крутить с помощью привязанной к нему бечевки. Ртуть поднялась на 2° F. Стало ясно, что испарением нельзя объяснить это охлаждение.

Нам, привыкшим к идее об излучении ночью, трудно себе представить глубину загадки, поставленной этими наблюдениями. Вильсон не знал, чем это вызвано, и открыто это признал:

«Эти эксперименты говорят как раз скорее в пользу мнения об излишках холода...зависящих от причины, совершенно противоположной испарению. Однако пока преждевременно утверждать что-либо окончательно относительно природы или силы процесса охлаждения, который был обнаружен столь недавно» ([362], стр. 469).

Он делает наудачу предположение, «что очень холодный воздух не склонен расставаться со своим содержимым, за исключением осадения на тела, столь же холодные или еще более холодные, чем он сам». Точно такое же заключение, но с большей уверенностью сделал Карл Людвиг Гронау ([148], стр. 343), берлинский пастор, за которым числится почти невероятная заслуга: как сообщает Гельман, он вел регулярные метеорологические наблюдения с 1756 г. по год своей смерти — семьдесят лет!

Следующей зимой Патрик Вильсон продолжил свои опыты и получил те же результаты. Но теперь он пришел еще к тому выводу, что охлаждение не вызвано какой-либо химической реакцией ([363], стр. 386).

Вильсоны вели наблюдения только при наличии снега или мороза, а в 1788 г. Джеймс Сикс, изобретатель комбинированного максимального и минимального термометра, сообщил, что с его помощью он определил вертикальный градиент температуры до высоты 220 футов, ведя наблюдения на башне Кентерберийского собора ([324], стр. 103). Сикс нашел, что ночью вблизи земли обычно холоднее, а днем теплее и, чем яснее погода, тем больше разности температур. Вопреки Вильсону, не говоря уже о Леруа, он полагал, что:

«Это замечательное уменьшение тепла у поверхности земли в ясную погоду после захода солнца и ночью происходит, я чувствую, частично из-за возможного охлаждения росы или паров при их опускании и частично из-за испарения, которое одновременно происходит со всех влажных или замерзших тел на открытом воздухе, особенно с тех, на которых осела роса или иней...» ([324], стр. 108, примечание).

Сикс высказал эти предположения в примечании, как не имеющие большого значения; однако они вновь подняли острый вопрос о том, является ли роса причиной холода или наоборот. Вероятно, в то время общее мнение склонялось в пользу первого предположения.

Тем временем Патрик Вильсон завершил разрушение гипотезы об охлаждении за счет испарения. Взвешивая большой противень со снегом, он нашел, что вес его возрастал при накоплении инея в ясную погоду, но уменьшался при облачном небе, когда температура поверхности снега была примерно равна температуре воздуха ([364], стр. 146). Он сравнил температуру снега, песка и ртути и обнаружил, что сухой песок может стать даже холоднее снега, в то время как ртуть была немного холоднее воздуха и слегка покрывалась инеем.

Вильсон совершенно произвольно предложил не менее пяти гипотез об источнике холода: две химические, две физические и одну, после знакомства со статьей Ахарда*, электрическую. Он был уверен лишь в том, что образованию инея, независимо от природы поверхности, сопутствует холод, но что некоторые вещества притягивают иней в большей степени. Склонность воздуха выделять иней зависит и от ясного неба.

Никогда еще ни одно явление природы не нуждалось в такой степени в организуемой гипотезе. К этому времени под руками был уже материал для объяснения — благодаря открытию невидимого лучистого тепла. Существование его подозревали уже более века, и оно было установлено с несомненностью приблизительно к 1774 г.** Одним из наиболее находчивых экспериментаторов в этой области был Марк Огюст Пикте, профессор в Женеве, который доказал, что не только невидимое тепло отражается и собирается параболическими зеркалами, но также «может быть излучен и холод»; это можно видеть, помещая колбу, набитую снегом, в фокус одного зеркала и шарик термометра в фокус другого***. Для объяснения этого последнего эксперимента, который выглядел загадочно, Пьер Прево, тоже уроженец Женевы, создал теорию равновесия лучистого тепла, достигаемого посредством обмена, происходящего непрерывно между телами системы ([279], стр. 314). Это означало не то, что холод излучался на термометр, а то, что термометр излучал тепло на холодную колбу.

Этот блестящий вывод был принят Пикте. Одновременно он проделал систематические наблюдения за вертикальным

* См. выше, стр. 159.

** Более полный обзор см. в [366].

*** Эксперимент, по-видимому, был выполнен Джованни Антонио Маджини, умершим в 1617 г.; ибо Кристофер Хейдон ([168], стр. 21), который, по его словам, также делал его, приводит «свидетельство Маджини, который, представляя свое зажигательное стекло Императору» [Рудольфу?], подтверждает это же следующими словами: „Species esse sensu tactus perceptibilis, ut apparet ex lumine candelaе, item ex nive ET glacie infrigidante per suam imaginem remotē admodum“. Я не смог найти этот отрывок, но он, должно быть, датируется ранее 1611 г., поскольку подарок Императору упоминался в работе Маджини того же года ([225], стр. 4). Эксперимент был вновь проведен примерно в 1660 г. Академией Опыта ([305], стр. 114—115), которая не знала, как им воспользоваться далее.

градиентом температуры до высоты 75 футов, но вопреки тому, что он уже знал об излучении тепла, он объяснял ночную инверсию градиента испарением с земли! ([271], стр. 171).

К этому моменту истории проблема стала чрезвычайно запутанной. Отсутствовало даже единое мнение от том, «падает» ли роса или она конденсируется из воздуха. В Соединенных Штатах Ной Вебстер, знаменитый составитель словарей, в 1791 г. проделал остроумные эксперименты*, подтвердившие идею непосредственной конденсации. Джон Дальтон также был убежден в этом ([67], стр. 136—137). Однако, с другой стороны, Люк Говард обдал презрением эту идею в бесцеремонной манере, которая иногда была ему свойственна:

«Что обычное образование росы происходит действительно при опускании воды из атмосферы, а не при выделении** пара на предварительно остывших поверхностях, каждый может легко убедиться, наблюдая, как много набирается росы на веществах, которые совершенно не способны отводить требуемое последним эффектом количество калорий» ([176], стр. 352).

Если даже этот фундаментальный пункт был неясен, едва ли можно было ожидать, что кто-то разберется в весьма различном поведении стекла и полированного металла. Были проведены тщательные эксперименты, например, Б. Прево, однофамильцем первого, на этот раз происходившим из Монтобана на юге Франции ([278], стр. 75). Заимствуем у него следующий пример: металлический диск приклеивался на одну сторону большего по размеру листа стекла. Роса иногда осаждалась на металле так же, как и на стекле, но чаще на первом не осаждалась, и при этом «предохранительное свойство» металла распространялось на значительное расстояние вокруг. Более того, если металл был наверху, а роса осаждалась снизу, могло иметься сухое пространство как раз против металлического диска. Но металл не действует подобно щиту (*abrigé*); так, если позолоченные бумажки приложить к стеклу, некоторые листки с позолотой наружу, а некоторые — внутрь, то только первые «защитят» стекло от росы. Наблюдения Прево, как ему казалось, установили важный момент — «стекло осуществляет свое притяжение влаги... прямо сквозь металлы» ([278], стр. 89).

Истинный ключ к тайне был обнаружен очень скоро после этого в классическом труде Румфорда об излучении тел с различными свойствами поверхности ([334], стр. 77—182). Румфорд обнаружил, что полированные металлы излучают много меньше тепла, чем другие вещества при такой же температуре, и что стекло — очень хороший излучатель. (Мы теперь знаем, что снег также очень сильно излучает). Но, странное дело, Румфорд не

* Были опубликованы только в 1809 г. в [356], часть I, стр. 95—103.

** Буквально — „*décomposition*“ (разложение). (Прим. ред.)

пожелал принять теорию радиационного равновесия П. Прево и упорствовал в заблуждении, что имеется излучение от холодных тел, которое «генерирует» холод в более теплых телах.

Более значительная потеря тепла одними поверхностями по сравнению с другими была в основном признана всеми, однако идея о невидимой радиации натолкнулась на сильное психологическое сопротивление. Джон Лесли, например, объяснял разницу, предполагая,

«что воздух никогда не вступает в истинное соприкосновение с какой-либо поверхностью, но со стеклом или с бумагой сближается гораздо теснее, чем с полированным металлом, от которого отделяется интервалом по крайней мере в одну пятисотую дюйма» ([217], стр. 20).*

Однако к этому времени синтез уже стал возможным. Его осуществил Уильям Чарльз Уэллс, родившийся в 1757 г. в Чарльстоне (штат Южная Каролина). В революцию он оставил Америку и в конце концов обосновался в Лондоне, где имел медицинскую практику. В 1812 г. он с большим терпением занялся изучением росы, хотя его здоровье не очень-то было пригодно для ночных экспериментов.

В августе 1814 г. он опубликовал свой «Очерк о росе» [357], который знаменитый физик Джон Тиндаль назвал «образцом мудрого исследования и ясного изложения». **

Уэллс знал о многих предыдущих работах, в частности, о работах Патрика Вильсона и Джеймса Сикса. Но, как он говорит в начале книги, убедился, что их объяснения росы и инея неправильны. Сначала он полагал, что роса производит наблюдаемое похолодание, но впоследствии он понял, что похолодание должно происходить прежде, чем начала выпадать роса.

В своих количественных опытах он использовал взвешенные пучки шерсти. Помимо этого он повторял многие эксперименты других исследователей, добавив некоторые собственные решающие опыты. Например, он поставил вертикально на газон

«полый цилиндр из обожженной глины высотой в 2½ фута и диаметром в 1 фут. На траве внутри цилиндра помещалось 10 гранов шерсти***, на которые при таком расположении, если не было даже слабого ветра, должно было бы выпасть столько же дождя, сколько и на шерсть, расположенную под открытым небом. Однако количество влаги, зарегистрированное шерстью, находившейся в цилиндре, было только чуть больше 2 гранов, в то время как количество воды, собранное 10 гранями шерсти под открытым небом, составляло 16 гран» ([357], стр. 15).

* У читателя может сложиться впечатление, что я несправедлив к Лесли; но нельзя отрицать, что все его суждения о вещах, которые мы рассматриваем, на редкость неудачны.

** Перепечатано с примечаниями Л. П. Казеллы и приложением, написанным Р. Стрэнном (в 1866 г., [357]). Я цитирую эту перепечатку.

*** 1 гран=0,065 г.

Из этого и из многих других изящных экспериментов он заключил, что «любое уменьшение обзора неба, видимого с исследуемого объекта, уменьшает количество образующейся на нем росы по сравнению с тем, которое бы образовалось, если бы небо было открыто полностью» ([357], стр. 14). И в то же время он был убежден в том, что не дело говорить про росу, будто она «падает».

Когда термометры располагались в различных местах, то там, где росы выпадало больше всего, их показания всегда были наименьшими. В облачные ночи трава была чуть-чуть холоднее или такая же, как воздух, однако внезапное прояснение быстро понижало ее температуру.

Потребовалось бы слишком много места, чтобы описать все остроумные эксперименты Уэллса, но его выводы изложить нетрудно. Охлаждение земной поверхности и тел, на которых собирается роса, есть результат излучения в пространство. Излучение происходит постоянно, но оно может быть почти целиком перехвачено облаками. В дневное время его перекрывает излучение солнца, падающее на землю. У Уэллса было чрезвычайно ясное представление о том, что теперь называется радиационным балансом атмосферы.

В совокупности с трудами Прево, Румфорда и Лесли, о которых упоминает Уэллс, гипотеза об излучении, конечно, правильно объясняет небольшое количество росы на полированных металлах, более значительное на мелко раздробленных веществах и т. п.

Уэллс посвятил несколько страниц своей книги разбору идеи о том, что роса «поднимается», т. е. образуется из пара, исходящего от земли и растений. Он особенно подробно обсудил открытие дю Фейя, что роса появляется сначала на предметах вблизи земли. Он возражает, что (1) воздух вблизи земли холоднее, что (2) он в меньшей степени подвержен перемешиванию и что (3) он подчас содержит больше влаги, включая и ту, которая поднялась с земли. Он заметил также, что роса, даже обильная роса, может образовываться и там, где земля очень сухая, как в Египте, но он не отрицает, что пар, вышедший из земли, может увеличить количество росы, особенно на траве.

Кроме того, он не соглашается с мнением, будто роса, выпавшая на растения, выделилась из самих растений, аргументируя это тем, что роса столь же хорошо образуется и на сухих растениях, что ее нет в облачные ночи и что на холоде и в темноте растения слабо транспирируют. Он заключает, «что почти вся роса, которая затем образуется на растении, должна происходить из воздуха» ([357], стр. 96).

Уэллс, по-видимому, на самом деле приоткрыл завесу, с чем не были согласны лишь те немногие, которые не верили в ночное излучение. Одним из таких сомневающихся был Георг Виль-

гельм Мунке, один из редакторов второго издания «Физической энциклопедии» («*Physikolischen Wörterbuch*») Ю. С. Т. Гелера. В обширной статье о росе ([248], стр. 686—708), написанной, вероятно, около 1835 г., Мунке обрушивается на теорию Уэллса, а на стр. 699 просто называет ночное излучение «чисто гипотетическим». Для него, как и для многих в то время, трудность состояла в отсутствии вверху материального объекта, к которому земля могла бы излучать. Если бы там имелась масса льда, говорит он, то это было бы ему понятно, но ведь ничего подобного нет. В качестве аргумента против ночного излучения он выдвигает существование «холодных ям» — низких мест, где заморозки бывают чаще, чем на близлежащих возвышенностях (на самом деле туда стекает более холодный и тяжелый воздух). Каким именно образом остывают тела, на которые выпадает роса, Мунке не было ясно; по-видимому, он считал, что тепло может просто исчезнуть (*verschwinden*).

Но чем дальше, тем больше накапливалось фактов. В 1847 г. один из наиболее выдающихся метеорологов XIX в. Джемс Глэшер занял девятью семью страниц в «*Philosophical Transactions*» статьей о ночном излучении, включавшей обширные таблицы ([143], стр. 120—216). Его вклад в проблему росы заключался не только в измерении температуры, но и влажности, в результате чего

«образование росы оказалось зависящим лишь от температуры тел, на которых она оседает, и роса никогда не появлялась на них, пока их температура не опускалась ниже точки росы в этом месте, как было показано наблюдениями с сухим и смоченным [*sic!*] термометрами, помещенными поблизости» ([143], стр. 126).

В том же году итальянский физик Мачедонио Меллони, впервые применивший термостолбики для измерения радиации, проникся интересом к предмету и написал несколько писем Араго в защиту теории Уэллса. Они были опубликованы в «*Comptes Rendus*» Парижской академии [239].

Меллони начинает с утверждения, что яростные нападки на теорию продемонстрировали «слепую враждебность» и побудили его разобраться в положении вещей. Не мудрствуя, он поместил термометры в ящики из блестящего металла, а другие в подобные ящики, покрытые сажой, и продемонстрировал необычайное различие в испускании тепла. Затем после небольшого исторического отступления он описал свой решающий эксперимент. Большой жестяной диск он покрасил лишь с одной стороны, на треть его радиуса от центра, тогда как другая его часть осталась блестящей. Был вырезан блестящий жестяной диск меньших размеров, радиусом на 5 мм меньше окрашенной части большого диска, и оба диска были подвешены на проволоках, меньший над большим на расстоянии 5 мм друг от друга. Роса

в первую очередь образовалась по окрашенному кольцу, выступавшему из-под верхнего меньшего диска, и распространялась в обе стороны от этой полосы, но главным образом наружу, потому что как только роса выпадала на металл, охлажденный за счет теплопроводности окрашенной полосы, этот покрытый росой металл начинал сильно излучать. Значительная область в центре окрашенного диска оставалась сухой, будучи защищенной верхним диском.

«Однако то, что, вероятно, нельзя было бы предсказать а priori, есть точное воспроизведение этих явлений на полированной нижней поверхности большого диска, повернутой к земле. Сначала роса появляется на этой поверхности на участках, соответствующих небольшому кольцу — краю окрашенного круга, в виде внезапно возникающего белесоватого круга на темном фоне полированного металла*, который напоминает изображение в «Дагерротипе». Этот круг становится более ясным и понемногу расширяется. Через некоторое время он достигает внешнего края, но никогда не достигает центральной части, которая продолжает оставаться сухой, сохраняя свой металлический блеск» ([239], стр. 536).

Этот простой и красивый эксперимент полностью опроверг идею, что полированный металл «отталкивает» росу, поскольку он показал, что роса оседала на одном участке поверхности металла и не оседала по соседству на том же диске. Он отверг также идею, что роса образуется в виде капелек, которые либо «падают», либо «поднимаются». Вкупе с опытами, в которых были использованы термометры, было доказано, как полагал Меллони, что роса является «простым» следствием ночного излучения.

Физики и метеорологи, по крайней мере в Великобритании, приняли теорию росы Уэллса как символ веры, более всего благодаря ясному элегантному стилю, которым была написана его книга. Поэтому от Джона Айткена потребовалось немало мужества, когда он утверждал, что Уэллс ошибался, грубо недооценивая вклад пара, пришедшего от земли, и отрицая, что некоторое количество росы на растениях образуется благодаря транспирации ([8], стр. 9—64).

Статья Айткена была весьма убедительна. В результате экспериментов: первого, который помог ему найти, что при образовании росы температура почвы непосредственно под поверхностью выше, чем температура воздуха непосредственно над ней; второго, в котором он помещал вверх дном металлические подносы над короткой травой и над почвой, и третьего, в котором он взвешивал неглубокие лотки с дерном и землей до и после образования росы, — в результате всех этих экспериментов он убедился, что почва за счет испарения теряет влагу даже

* Несомненно, отражающего черную почву.

во время выпадения росы, причем теряет больше, чем приобретает в виде росы. Он полагал — и при этом считал себя правым, — что большая часть влаги, появляющейся в виде росы, действительно поступает из земли.

Кроме того, проведя серию наблюдений и экспериментов, Айткен показал, что «роса» на листьях многих растений может образовываться до того, как они охладятся до точки росы, и что это действительно вода транспирации. Он заметил, что ночью некоторые растения в саду были много более влажными, чем другие, и что влага на них появлялась главным образом в виде капель на краях листьев. Различные части одного и того же растения обнаружили значительные отличия, в зависимости от того, насколько активно они росли.

Айткен потратил много усилий, доказывая, что он не отрицает возможности аккумуляции росы из атмосферы. Так, например, роса на крыше сарая не может иметь другой источник. Он лишь напоминал, что существует более чем один источник росы.

Несколькими годами позже, не ссылаясь на Айткена, Р. Рассел пришел к очень похожим выводам из наблюдений и опытов в общем такого же рода ([303], стр. 210—213). Учтя эти поправки к теории Уэллса, мы вполне можем оставить эту тему. Я, конечно, не исчерпал и доли всей относящейся к этому вопросу литературы, но лишь попытался описать основные превратности, которые претерпела теория росы.

ГЛАВА X

ТЕОРИИ ГРАДА

Антоний: Не сердце — камень!
Клеопатра: Если это правда,
Пусть станет в наказание оно
Отравленною градовою тучей.
Пусть первой градинкой убьет меня,
Второй — Цезариона.

Шекспир «Антоний и
Клеопатра». Акт III, сцена 13

Из всех гидрометеоров град является наиболее эффективным и наиболее трудным для истолкования. Поэтому не удивительно, что попытки объяснить его были очень многочисленны, а многие из них были также весьма искусственны, и задача историка — по крайней мере в такой книге, как эта, — прежде всего заключалась в отборе наиболее важных среди них*. Одним из критериев, который я буду принимать за основу, будет новизна, и я обойду молчанием всякий возврат к идеям, уже дискредитированным или отброшенным. Но даже и при этих условиях необходимо будет соблюдать краткость, и я надеюсь, что цитаты часто будут при этом предпочтительнее, чем подробный разбор.

Во избежание недоразумений нужно с самого начала дать надлежащее определение термина «град». Существует четыре рода града.

1. Собственно град (hail) — ледяные шарики или «камышки» (hailstones). Они могут состоять из чистого льда или из перемежающихся слоев прозрачного и мутного льда и иметь диаметр от 3 до 30 мм и даже более того. 2. Снежная крупа (soft hail), называемая также Graupel (нем.), grésil (фр.) или snow

* Следует отметить, что 90 лет тому назад Венеру [348] потребовалось 90 больших страниц в четвертую долю листа для того, чтобы удовлетворительно изложить этот вопрос.

pellets. Это белые, непрозрачные крупинки, менее 6 мм диаметром, состоящие из ледяного кристалла в центре, покрытого замерзшими облачными каплями. Они относительно легки и мягки. 3. Ледяная крупа (small hail) — обычно ядро снежной крупы, обросшее тонким слоем льда. 4. Ледяной дождь (ice pellets). (В Северной Америке он носит название sleet.) Это прозрачные сферические льдинки размера дождевой капли, внутри которых может содержаться жидкая вода.

Эти разнообразные гидрометеоры имеют различное происхождение и неодинаково распределены во времени и в пространстве. Например, три последние разновидности обычно наблюдаются зимой, в то время как собственно град редко выпадает зимой — загадочный факт, создавший большие затруднения для ранних теорий. Далее, град редко наблюдается на больших высотах в горах, а снежная крупа — обычное для гор явление. В дальнейшем изложении слово «град» (hail) будет употребляться для обозначения явления, связанного с летним сезоном и обычно с грозами.

Здесь нужно обратить внимание на две наиболее трудные проблемы, с которыми имели дело создатели теорий града: во-первых, откуда берется сильный холод, заставляющий капли замерзать, и, во-вторых, каким образом растущие градины могут оставаться в воздухе столь долго, чтобы на них намерзало так много воды. Трудность первой задачи значительно возросла после открытия скрытой теплоты таяния во второй половине 18-го столетия, после чего проблема была сформулирована по-другому: каким образом растущие градины избавляются от теплоты таяния скапливающейся на них воды?

Внимательный читатель, прочитавший главу VIII, вероятно, уже догадался, что ответ на первый вопрос дает падение температуры, создаваемое конвективным процессом совместно с большой высотой, на которую распространяются системы конвективных облаков. Он мог даже предположить, что существуют вертикальные токи, скорость которых достаточна для удержания градин вверх, пока они дорастут до тех больших размеров, которые иногда наблюдаются. Можно облегчить читателю понимание исторической эволюции, если ему сразу сказать, что это так и есть и что теперь совершенно ясно, что градины теряют тепло в основном путем теплопроводности и при испарении с их поверхности и что количественно этих потерь достаточно*.

Предположения древних авторов по этому вопросу уже излагались в главе I, так что теперь мы можем начать с Декарта, который знал, что внутри градин часто содержится снег, и

* Я колебался — указать ли читателю на эти современные взгляды, пока не сообразил, что было бы жаль, если бы эта глава была ясна лишь изучавшим физику облаков.

считал, что крупные градины образуются в результате соединения под действием ветра многочисленных снежных хлопьев, которые затем частично тают и снова замерзают. Крупные градины возникают только летом, потому что зимние облака слишком низки и снежинкам, падающим из них, не хватает времени на это таяние и замерзание [101].

Едва ли это могло удовлетворить Декарта. Нечто более определенное было предложено Гассенди, утверждавшим, что верхние слои воздуха холодны не потому, что они далеки от источника тепла, отражающегося от земли, а из-за «азотистых корпускул», или «зерен» холода, которые там очень многочисленны. Зимой их меньше, и они порождают лишь снег, но летом их больше, так что может образовываться град [135]. Идея об «азотистых солях», или «селитре», как об источниках холода стала еще более популярной после появления работ Джона Мэйо [235], и в 1697 г. мы встречаем преподобного Джона Валлиса, направляющего издателю «Philosophical Transactions» «Письмо относительно образования града, грома и молнии и об их эффектах» [354]. В то время весьма широко была распространена идея, что вспышка молнии и взрыв пороха — родственные явления, если не одно и то же. Так, Джон Валлис рассуждает, что если присутствие в воздухе селитры приводит к возникновению молнии, то она же, вероятно, образует охлаждающую смесь со снегом, которая и замораживает градины.

«И это в особенности потому, что (не только в этих удивительно больших, но и в градинах обычных размеров) в середине, по-видимому, находится нечто более похожее на снег, чем на лед» ([354], стр. 657).

Мушенбрук развил эту химию дальше: отметив обычную связь града с молнией, он считал, что последняя состоит из «маслянистой и сернистой материи», а также из «селитряного спирта»*, который, встречаясь с частицами, образующими лед, возбуждает ужасный холод ([249], стр. 803)... Эти «частицы, образующие лед», существенно важны, иначе мы получим лишь сильный дождь. Общее убеждение, идущее, вероятно, от не записанных нигде наблюдений переохлаждения, состояло в том, что для замерзания воды недостаточно только потери тепла, но она замерзает

«потому, что смешивается с очень тонкими корпускулами, приходящими из атмосферы, что приводит к своего рода ферментации воды, отнимает у нее содержащееся в ней тепло (le feu) и заставляет ее частицы прилипать друг к другу» ([249], стр. 443).

Со временем, в 18-м столетии, это обращение к азотистым частичкам становилось все менее общепринятым.

* Так называли тогда азотную кислоту. (Прим. ред.)

Поэтому нужно было найти другие источники холода. Наблюдения, сделанные в разных местах, показали, что облака, из которых выпадает град, достигают огромных высот. Во всяком случае Эдвард Барлоу в 1715 г. заключил, что град — это летнее явление потому, что в этом сезоне

«в изобилии имеется тепло, заставляющее пары подниматься до достаточных высот. Это редко бывает зимой или в морозную погоду из-за недостатка влаги для их сцементирования или недостатка тепла для их поднятия» [28].

До своего обращения к химическим спекуляциям Делюк писал, что образование града доказывает большое вертикальное распространение пара. По его мнению, снежное ядро в центре градины свидетельствует об образовании снежных хлопьев на такой высоте, что при своем падении они заставляют замерзать встречающиеся на пути их падения пары [88]. Аналогичные взгляды выражали Франклин [132] и Монжэ [245], но у последнего собирались скорее не пары, а капли. В 19-м столетии большинство авторов молчаливо допускало, что хотя бы часть этого процесса протекает на большой высоте.

Предположение, вероятно, опередившее свое время, высказал М. Заалфельд, посвятивший в 1763 г. восемнадцать страниц [304] доводам в пользу того, что «все белые облака — замерзшие». Он предполагал, что они и доставляют ядра для градин.

Знаменитый опыт с воздушным змеем, демонстрирующий электрическую природу молнии, был продлан Франклином в июне 1752 г. Это привело, конечно, к ряду попыток объяснить град, беря на помощь электрические явления. Это было неизбежно, потому что град очень часто, практически всегда сопровождается молнией. Способный химик Гюйтон де Морво попался в эту логическую ловушку [154]. Отвергая все идеи о «солях», образующих охлаждающую смесь, — почему же мы не находим их в градинах? — Гюйтон вынужден был связывать с электричеством большой холод, который иначе, как он полагал, необъясним. Принимая открытие Нолле, что вода испаряется быстрее, когда она наэлектризована [254]*, он рассуждает, что это должно бы несколько усилить холод, и фантазирует, что пар может стать лучшим проводником тепла, если его наэлектризовать. Свои идеи он подтверждал несколькими весьма плохо проконтролированными экспериментами.

Гюйтона сразу же подверг критике в открытом письме Жан Андре Монжэ [246]. Автор письма допускает, что электричество усиливает испарение, но замечает, что наэлектризованные капли должны взаимно отталкиваться, а не сливаться

* См. выше, стр. 42. Позднее это представление было, конечно, отвергнуто.

в большие градины. Монжэ имел свою собственную сложную теорию, совершенно, однако, не подтвержденную наблюдениями.

Ко времени написания «Мыслей о метеорологии» Делюк уже совершенно отказался от своих прежних теорий града. По-видимому, к 1786 г. у него имелись две теории града, не вполне исключавшие друг друга. Первая заключалась в том, что требуемый холод имеет химическое происхождение ([90], стр. 642), и мы уже видели в главе VI, какое большое значение он придавал химическим аналогиям в метеорологии. Вторая, электрическая, теория была основана на гипотезе, что тепло образуется при разложении «электрической жидкости» ([90], стр. 525), так что предположительно образование электрической жидкости должно сопровождаться поглощением тепла. Делюк, по-видимому, мало пользовался этими теориями, но Венер [348] указывает, что Лампадиус и Гайдман поддерживали его. Его химической теории мощную поддержку оказал литературный талант Лихтенберга [220].

«Никто, — писал Лихтенберг, — не сомневается, что грозы и бури с градом и подобные явления — это химические процессы в великом воздушном океане, в которых разложение и рекомбинация непрерывно сменяют друг друга» ([220], стр. 89).

Факт, что холодный град может образовываться в жаркую летнюю погоду, не более удивителен, чем тот, что «пламя может гореть в холодный день, давая тепло в 1000 градусов. Пламя дает тепло в результате ... разложения; холод должен возникать при рекомбинации» ([220], стр. 104).*

Наиболее известная электрическая теория града была предложена другим великим физиком, который был также элегантным и плодовитым писателем, — Александром Вольта [346]. В его теории электричество использовалось не в качестве первопричины холода, а для объяснения того, почему градинки остаются взвешенными столь долго, что успевают вырасти. Холод, думал Вольта, должен возникать в результате очень быстрого испарения с вершин облаков, которому способствуют мощный солнечный свет, разреженный сухой воздух, легкость испарения пузырьков, из которых, как он думал, сделаны облака **, и предполагаемый эффект электричества, помогающего испарению ***. Но каким образом градины удерживаются в воздухе в течение достаточного времени? «Мы не можем представить себе какую-либо другую силу или мощность, кроме электричества, остается лишь посмотреть — насколько оно может быть адекватно». Вольта предполагает, что градины подпрыгивают вверх и вниз

* До «химической революции» считалось, что воздух и горючее взаимно разлагают друг друга.

** См. выше, глава III.

*** Эта идея была разбита ван Марумом в 1799 г. [342].

над вершиной облака под воздействием электрического отталкивания, причем их заряд возобновляется, когда они, став несколько тяжелее, снова попадают в облако. В конце концов их вес становится слишком большим для имеющегося заряда электричества и они проваливаются сквозь облако и выпадают вниз. Еще более подходящим было предположение о двух облаках — одно над другим, заряженных противоположными зарядами, поскольку в этом случае заряженные градины будут прыгать между ними, как шарики бузины между двумя пластинками в хорошо известном лабораторном эксперименте.

Вольта подкрепляет эту теорию ссылкой на многообразие форм градин и на тот факт, что в их центре содержится небольшая снежная масса. Он отвечает на различные возражения, например, почему противоположно заряженные слои облака не притягиваются друг к другу? Они сходятся, но только медленно. И почему не бывает бурь с градом зимой? Потому, что облака менее плотные, а потому менее сильно наэлектризованы, солнце излучает меньше и длинные ночи позволяют электрическому равновесию восстанавливаться.

Эта статья была написана столь блестяще и с таким изобилием подробностей, что не удивительно, что она завоевала широкое признание, особенно если учесть известность ее автора. Великий Араго, по-видимому, был убежден в истинности теории Вольта даже в 1828 г. [17], после того как она подверглась значительной критике, особенно в германских странах. Первым критиком, вероятно, был И. И. Прехтль из Вены, который не желал верить, что испарение воды может создавать такой холод, особенно на солнечном свете*. Прехтль также отказывался рассматривать облака как металлические пластинки, от которых могут отскакивать предметы, и указал, что к предполагаемому отталкиванию верхнего облака должно было бы добавляться действие силы тяжести и все вместе должно было бы приводить к огромной нисходящей скорости.

Что действительно было необходимо, так это некоторые расчеты. Этот недостаток был частично восполнен около 1830 г. Г. В. Мунке**, который нашел, что при любых разумных размерах возможные силы отталкивания должны были быть совершенно недостаточны.

Не вся критика приходила из мест, лежащих к северу от Альп. В 1817 г. Анджело Беллани [32] задал вопрос: если градинки или ядро градинки отталкивается от вершины облака, то что препятствует удалению самих облачных капелек? С помощью изящного простого эксперимента он также опроверг представление о том, что яркий солнечный свет в верхних слоях

* Я не видел статьи Прехтля и потому цитирую ее по Венеру [348].

** См. статью «Град» („Hagel“) в [140].

воздуха может порождать необходимый холод. Два термометра были обернуты тканью и увлажнены; один был помещен на солнце, второй затенен. Тот, который был на солнце, высох быстрее, но не опустился ниже, чем затененный термометр во время его высыхания.

Теория града Вольта — это еще один пример неудач даже наиболее выдающихся физиков того времени, пускавшихся в плавание по «воздушному океану». Я предоставляю метеорологам решать, доказывает ли это, что метеорология — более трудная наука, чем физика. Во всяком случае к 20-м годам XIX в. сложилось общее убеждение, что сочетание града и молнии означает лишь, что оба эти явления возникают при одинаковых условиях погоды. Таково было ясно выраженное в 1814 г. мнение фон Буха [53], а в 1830 г. это же решительно утверждал Денисон Ольмстед из Йеля [259]. Начиная с этого времени теории града были механическими и основывались более или менее твердо на представлениях о восходящих потоках воздуха.

Для анализа их мы можем вернуться к 1780 г. и к Марселину Дюкарля-Бонифасу, известному под именем Дю Карля, который изложил теорию града в своей «*Histoire naturelle du monde*» [109]. Столб воздуха, нагретый более сильно, чем окружающая его атмосфера, поднимается вверх достаточно быстро, чтобы унести с собой содержащиеся в нем продукты конденсации и поднять их до высоты, где они замерзают при большом холоде и превращаются в

«небольшие снежные шарики, которые будут расти, а отношение их поверхности к объему будет уменьшаться до тех пор, пока... они не начнут падать обратно вниз, поначалу очень медленно...» ([109], стр. 94).

Действительно, «они могут оставаться взвешенными несколько часов», несмотря на их тяжесть, под действием восходящих потоков. Когда они начинают падать,

«на своем пути они встречают водные молекулы, коагулированные благодаря выделениям (*sécrétion*) и холоду* и поднимающиеся им навстречу. Они объединяются, растекаются и замерзают; результатом являются шарики льда, округляющиеся как при их образовании, так и вследствие трения друг о друга».

Если вертикальная скорость достаточно велика, то дождевые капли могут смерзаться непосредственно, и Дю Карля думал, что этим объясняется конфигурация некоторых градин, ко-

* Par la *sécrétion* et le froid; термин *sécrétion* может быть связан с идеями Нолле (см. выше, стр. 150) о том, что «пары», обнаруживаемые под кололом воздушного насоса, в действительности являются посторонними примесями в воздухе.

торые он описывал как параболоид, склеенный с небольшой сферой.

По этой теории, образование града обусловлено разностью температур различных участков поверхности земли, и поэтому Дю Карла было легко объяснить, почему град возникает предпочтительно летом, после полудня, и над пересеченной местностью. Это была, конечно, неполная теория, в которой не рассматривался вопрос, каким образом можно обойти скрытую теплоту таяния. Важность этого, видимо, не была понята Дю Карла, если только он вообще знал, что существует такая вещь, как скрытая теплота.

Во всяком случае его книга была, по-видимому, мало известна за пределами Женевы, и фундаментальное представление о восходящих потоках воздуха было создано затем заново.

Важным ключом к проблеме были особенности географического распределения града. В 1795 г. М. А. Д'Онофрио из Неаполя в работе, не представляющей в остальном большой ценности [104], писал о склоне холма в Неаполитанском королевстве, где никогда не выпадал град, пока он был покрыт лесом, и где стали часто наблюдаться бури с градом после того, как он был распахан.

Д'Онофрио думал, что это связано с действием деревьев как громоотводов, но в 1814 г. у Леопольда Буха возникла более правильная идея [53], а именно, что обнаженный склон холма, обращенный на юго-восток, нагревался сильнее прежде, когда он был покрыт лесом, и это усиливало восходящие потоки.

Связь между градобитиями и топографией, конечно, была известна. Бух приводит такие альпийские поговорки, как «там, где есть кретины, никогда не бывает града» и «где часто встречается зоб — редко выпадает град». Конечно, абсурдно было бы устанавливать прямую причинную связь, но корреляция может существовать и через особенности топографии и местной воды.

Бух имел свою, весьма интересную теорию града. Изучая формы и структуру градин, он заключил (как и Дю Карла), что снежные хлопья собирают водяные капли, замерзающие на них. Таким образом, необходимо, чтобы температура верхних слоев воздуха была ниже нуля, а температура нижних слоев — выше этой точки. В этом причина отсутствия града зимой. Снежная крупа — первая стадия града; но зимой он не может образовываться путем собирания дождевых капель. Бух считает, что испарения с падающих капель достаточно для их замораживания, и приходит к выводу, что самые крупные градины возникают при наибольших разностях температур между нижними и верхними слоями воздуха. Воспользовавшись некоторыми наблюдениями в различных горных странах, говорившими о том, что дождь выпадал на склонах, а град — в долинах, он заключает,

что градины вырастают до больших размеров на протяжении последних 1200 футов на пути к земле.

Бух признает, что обязан Дю Карла многими из этих идей. Действительно — наиболее заметное различие между их теориями заключается в том, что Бух, который знал о скрытой теплоте, нашел способ отвода тепла от растущей градины, в то время как Дю Карла, который об этом не знал, не ощущал в том необходимости. На Буха, по-видимому, большое впечатление произвела возможность роста градин, длительное время удерживающихся наверху, и в этом смысле он либо неправильно истолковал Дю Карла, либо полагал, что усовершенствует его теорию. Несомненно, что этот последний имел в виду лишь возможность взвешивания в течение нескольких часов ледяных ядер.

Интересно указание Буха о том, что часто бури с градом и грозы охлаждают всю атмосферу на несколько дней, «как если бы они приносили вниз на землю температуры с очень больших высот, независимо от холода, возникающего в нижних слоях в результате испарения» ([53], стр. 86). Как мы теперь знаем, объяснение этому факту нужно искать в образовании подобных бурь на холодном фронте, особенно когда вторжение вытесняет долго находившуюся тут теплую воздушную массу. Фактически Бух просто принял следствие за причину.

Он сослужил еще одну службу метеорологии, использовав измерение градиента температуры вблизи поверхности земли как доказательство подъема нагретого воздуха. В Женеве термометр, защищенный от солнца, показывал 40° на высоте трех дюймов над травой и лишь 24° — на высоте трех футов.

Теория Мунке* в известной степени сходна с тем, что мы только что рассматривали, но он больше подчеркивал роль, которую играет в образовании вертикальных токов испарение с почвы в сочетании с легкостью водяного пара. Вместе с вертикальными токами этот пар достигает больших высот, где температура окружающей атмосферы намного ниже точки замерзания. Хотя поднявшийся воздух может постепенно охлаждаться, он остается теплее окружающей его среды, но временами образуются видимая дымка и тонкие облака. Мунке не думал, что воздух должен охлаждаться при подъеме, потому что, введенный в заблуждение тем, что мы теперь называем холодным фронтом, он был уверен, что обратное явление — нагревание опускающегося воздуха — не происходит.

Следующая стадия процесса — начало мощной конденсации на больших высотах, в результате чего, по Мунке, объем воздуха наверху уменьшается в соответствии с количеством сконденсировавшегося пара, так что более холодный воздух с еще

* См. статью «Град» („Hagel“) в [140].

бóльших высот устремляется в образовавшееся таким образом пустое пространство. В нем некоторые переохлажденные капельки, возникшие в результате конденсации, быстро замерзают, и ледяные кристаллики собирают на себе капельки и образуют снежную крупу, которая начинает действовать в качестве ядер для образования градинок.

Эта дальнейшая конденсация приводит к образованию дальнейшего частичного вакуума, и верхние слои воздуха опускаются, а нижние поднимаются. Это может привести к тому, что падающая снежная крупа будет снова подниматься вверх. Воздух, конечно, устремляется внутрь одинаково со всех сторон, что принимается как объяснение быстро меняющихся ветров вблизи бури с градом. В конце концов градины становятся достаточно большими для того, чтобы упасть, чему помогает холодный нисходящий ветер. При этом считается, что испарение позволяет избавиться от скрытой теплоты таяния.

Теория Мунке, бывшая дальше от истины, чем теории Дю Карла и Буха, по-видимому, привлекла значительное внимание в Германии, но не приобрела особо широкую известность за ее пределами, возможно, потому, что большой физический словарь Гелера вне Германии читали очень мало.

Приблизительно в то же время Ольмстед опубликовал то, что мы могли бы теперь назвать фронтальной теорией града [259]. По его теории, бури с градом вызываются «замерзанием водных паров, содержащихся в теплой и влажной воздушной массе, при ее внезапном перемешивании с чрезвычайно холодным ветром в более высоких областях атмосферы». Градины, конечно, должны расти путем захвата при своем падении сквозь теплый влажный воздух. Беспристрастная критика этой теории принадлежит Венеру [348], который говорит, что таким путем могут возникать некоторые градовые бури, но не очень часто. Однако интересно, что опровергающим теорию Ольмстеда тогда считали то обстоятельство, что градовые бури часто обрушиваются на длинную полосу земли, вытянутую приближенно с юго-запада на северо-восток.

Читатели, помнящие обсуждение работы Эспи в главе VIII, не будут удивлены, узнав, что переоценка мощности поднимающегося воздуха привела его к простой теории града. Он действительно предполагал, что восходящие токи могут быть настолько сильными, что они

«уносят вверх крупные дождевые капли ... намного выше области постоянного замерзания, и там они замораживаются, а затем уносятся к краю столба восходящего тока и выпадают в виде града» [117].

Это кажется удивительным, но, насколько я смог выяснить, никто не возражал непосредственно на утверждение Мунке о том, что конденсация пара создает частичный вакуум. Вполне

возможно, что именно об идее Мунке думал Эспи, когда отрицал эту возможность*. Но когда в 1862 г. Карл Фридрих Мор опубликовал теорию, основанную на той же идее, А. Крёниг немедленно набросился на нее и показал на количественных примерах, что в атмосферных условиях конденсация водяного пара вместо образования частичного вакуума будет увеличивать объем (или давление) в силу высвобождения скрытой теплоты конденсации [198]. Годом позднее Теодор Рейе показал это аналитически [294].

Тем не менее на протяжении десятилетий оставалась группа настойчивых метеорологов, которые, несмотря на все математические доказательства противоположного, упорствовали в представлении, что холодный воздух может приходить вниз с больших высот и оставаться при этом холодным. Наиболее знаменитым из них был Фай, впоследствии генеральный инспектор высшего образования во Франции, писавший по этому вопросу до самой своей смерти. Среди других были К. Шмид [312] и Даниель Колладон [61], которые считали, что холодный воздух механически увлекается вниз сильным дождем.

После середины 19-го столетия в теориях града появилась новая важная черта — эффект переохлаждения облачных частиц. Как мы видели в главе III **, Соссюр [308] наблюдал несколько ранее 1783 г., что эти частицы могут сохраняться жидкими при температурах значительно ниже нормальной точки замерзания воды. Это было забыто и возродилось вновь в XIX в., вместе с открытием, что дождевые капли могут также переохлаждаться, образуя в этих случаях при встрече с предметами на земле гололед [348]. Оставалось сделать всего шаг, чтобы понять, что снежная крупа, падающая через переохлажденное облако, может собрать на себе порядочное количество льда. В то же время это несколько ослабило остроту проблемы — как избавиться в сравнительно короткое имеющееся время от скрытой теплоты таяния. Первым, кто сделал этот шаг, был, по-видимому, Фогель ***, не разработавший, однако, полной теории града. Это попытался сделать Карл Нёллинер из Гамбурга [255], учитывавший переохлаждение, но введший свою собственную странную идею о роли низкого атмосферного давления в образовании переохлажденных дождевых капель на больших высотах, представлявшейся ему более существенной, чем роль ледяных кристаллов как ядер.

Приблизительно в то же время П. А. Майл опубликовал более удачную теорию, которая, к сожалению, не привлекла вни-

* См. выше, стр. 137.

** См. выше, стр. 50.

*** По Венеру. Я не смог обнаружить оригинал статьи.

мания*. Идея его заключалась в том, что образовавшаяся в атмосфере на большой высоте снежная крупа, падая вниз, проходит через область переохлажденных капель. Но в 1853 г. он пошел значительно дальше:

«...и если, помимо ядер, которые в больших градинах часто подобны крупе (grésilleux), имеется несколько снежных слоев, разделенных уплотненными слоями, это, по-видимому, указывает на некоторые колебания и борьбу с переменным успехом между силой тяжести и встречным импульсом восходящего течения».**

Представляется, что Майл намного опередил свое время, как в 1834, так и в 1853 гг.

Важность роли снежной крупы как ядер отмечалась де ла Ривом [87], Дюфуром [112, 113], Рену [292], Колладом [61]. Тем временем эффектное доказательство существования переохлажденных облаков дал смелый полет на воздушном шаре, сделанный в 1850 г. Барралем, пролетевшим сквозь слой облаков толщиной в 12 000 футов [348]. В области между 11 250 и 18 990 футов при температурах от $-0,5$ до $-10,5^{\circ}\text{C}$ он обнаружил, что облако состоит из капель, в то время как выше имелись ледяные кристаллы.

Скрытая теплота таяния льда составляет около 80 калорий на грамм, и, следовательно, если облачные капли переохлаждаются меньше чем на 80°C , то не вся вода будет немедленно замерзать. Поскольку в атмосфере происходит переохлаждение всего лишь на несколько градусов, то действительно большая часть воды не будет замерзать на растущей градине. Таким образом, переохлаждение не избавляет от необходимости иметь процесс, отводящий избыточное тепло.

Знаменитый инженер Осборн Рейнольдс, не видя иного пути, который мог бы привести к этому, считал, что все большие градины образуются слиянием, когда меньшие по размерам градины прилипают к несколько более крупным в результате таяния под давлением и смерзания. Он видел доказательство этого в том, что многие из них имеют форму конуса с закругленным основанием [296]. В подтверждение этому он пытался с некоторым успехом создавать модели градин распылением алебаstra на деревянную палочку в атмосфере пара. Формы, полученные им, были не очень далеки от формы некоторых крупных градин. Он не подозревал, что еще в 1834 г. Майл предлагал способ, которым могли быть созданы такие формы.

«Когда снежные хлопья пропитываются жидкостью, что превращает их в градины, то жидкость увлажняет и уплотняет лишь их переднюю или нижнюю часть. В результате эта их часть

* Основное содержание этой теории изложено в рукописи (на которую была ссылка выше, на стр. 141), датированной февралем 1834 г. [228].

** В рукописи 1834 г. он говорит лишь, что восходящее течение «должно мощным образом содействовать развитию градин».

приобретает больший удельный вес, чем верхняя часть, которая остается пористой и, как можно было бы сказать, оказывается нагруженной (*lestée*). Однако такое положение не может быть очень устойчивым, так как оно может измениться при встрече с другими снежными хлопьями или градинами».*

К концу столетия, как на это указывал В. Траберт [340], проблема града распалась на два вопроса: найти объяснение форме и структуре градин и найти механизм отвода скрытой теплоты таяния. Было уже совершенно ясно, что град формировался в сильных восходящих потоках, намного выше уровня, на котором достигается температура замерзания. В то время, однако, было мало реальных свидетельств тому, что вертикальные скорости могут быть настолько большими, чтобы поддерживать во взвешенном состоянии весьма крупные градины. Необходимые для этого скорости на различных высотах были рассчитаны в 1901 г. Паулем Шрайбером из Хемница [321], очевидно, в результате чтения статьи Траберта.

Некоторое удивление может вызвать то обстоятельство, что даже до довольно недавнего времени игнорировались наиболее очевидные способы отвода скрытой теплоты таяния — простая теплопроводность, т. е., иначе говоря, передача тепла от растущей градины молекулам воздуха, встречаемым ею выше уровня замерзания. Искусные и детальные исследования [239] показали, что теплопроводность и испарение, действующие совместно в активных восходящих потоках в большом конвективном облаке, достаточны как по их природе, так и по качеству для образования самых крупных градин. Большая часть этих сведений была получена за последние два десятка лет.

* Неопубликованная рукопись 1834 г. (см. выше, стр. 141).

ЛИТЕРАТУРА

1. Abbe, C. Popular Science Monthly. Apr. 1889, p. 840.
2. Achard, F. C. Sur l'imperfection de la météorologie. Mém. Acad., Berlin, 1780, p. 14.
3. Aeneid. Вергилий Марон, Энеида. (Рус. пер. В. Брюсова и С. Соловьева, М.—Л., 1935).
4. Airy, G. B. Trans. Cambridge Phil. Soc. 6, 1838, p. 379.
5. Airy, G. B. Proc. British Meteorol. Soc., Vol. 1, 1863, p. 365.
6. Aitken, J. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 30, 1881, p. 337.
7. Aitken, J. Nature, Vol. 23, 1881, p. 374.
8. Aitken, J. On dew. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 33, 1885-86, p. 9.
9. Aitken, J. Transact. Roy. Soc. Edinb., Vol. 35, 1888, p. 1.
10. Aitken, J. Proc. Roy. Soc. Edinb., Vol. 17, 1889-90, p. 193.
11. Aitken, J. Proc. Roy. Soc. Edinb., Vol. 18, 1890-91, p. 39.
12. Aitken, J. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 37, 1892-93, p. 416.
13. Albert the Great. De meteoris libri, IV.
14. Amontons, G. Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 1702, p. 155.
15. Annonce des prix décernés par l'Académie des Sciences pour l'année 1834, Paris, 1834.
16. Anonyme. Ann. de Chim., Vol. 48, 1803, p. 138, 273; Vol. 49, 1804, p. 84, 113, 225.
17. Arago, D. F. Annuaire du Bureau des Longitudes, 1828, p. 188.
18. Arago, D. F., Pouillet, C. G. M., Babinet, J. Compt. Rend., Vol. 12, 1841, p. 454.
19. Aristotle. Meteorologica I, Trans. H.D.P. Lee, London, 1952 (Loeb Classical Library).
20. Aristotle. On the Heavens. Engl. Transl. in Loeb classical library.
21. Aristotle. Physics. Аристотель. Физика. (Рус. пер. В. П. Карпова, М., 1936).
22. Assmann, R. Meteorol. Zeits. 2, 1885, p. 41.
23. Babinet, J. Compt. Rend., Vol. 28, 1849, p. 301.
24. Bache, A. D. Brit. Ass. Adv. Sci. Newcastle, 1838, Trans. Sect., p. 25.
25. Bacon, F. The natural and experimental history of winds etc. London, 1653.
26. Bacon, F. Historia ventorum. London, 1622.
27. Barbaret, D. Mém. Acad. Dijon I, 1769, p. 1.
28. Barlow, E. Meteorological Essays (etc.). London, 1715, p. 44.
29. Barrington, D. Phil. Trans., Vol. 61, 1771, p. 294.
30. Beccaria, G. B. Ellettricismo atmosferica, 2-o ed. Bologna, 1758.
31. Béguelin, N. Nouv. Mém. Acad., Berlin, 1774, S. 128.
32. Bellani, A. Giornale di Fisica, Pavia, Vol. 10, 1817, p. 348.
33. Benzenberg, J. F. Über die Dalton'sche Theorie. Düsseldorf, 1830.
34. Benzenberg, J. F. Annal. d. Phys., Bd. 42, 1812, S. 155.
35. Bernoulli, D. Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii. Strasbourg, 1738.

36. Berzelius, J. J. *Traité de chimie*. Trad. par J. A. L. Jordan, 8 vol. Paris, 1833, Vol. I, p. 430.
37. Bezold, W. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.*, 1888, S. 485, 1189.
38. Bigelow, F. H. *U. S. Monthly Wea. Rev.*, Vol. 34, 1906, p. 9.
39. Biot, J. B. *Additions à la Connaissance des Temps pour 1839*, p. 29.
40. Birch, Th. *The History of the Royal Society*, 4 vols, London, 1756-57.
41. Bloxham, J. C. *Proc. British Meteor. Soc.*, Vol. 1, 1863, p. 362.
42. Bloxham, J. C. *Proc. Brit. Meteor. Soc.*, Vol. 2, 1864, p. 41.
43. Boase. *Annals of philosophy*, New series, Vol. 4, 1822, p. 18.
44. Böckmann. *Annal. d. Phys.*, Bd. 10, 1802, S. 369; Bd. 11, S. 66.
45. Borelli, G. A. *De motionibus a gravitate pendentibus*, Regio Julio, 1670.
46. Boyer, C. B. *The rainbow from myth to mathematics*. New York — London, 1959.
47. Boyle, R. *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air and its effects (etc)*. Oxford, 1660, p. 217.
48. Brandes, H. W. *Beiträge zur Witterungskunde*. Leipzig, 1820.
49. Bravais, A. *Journal de l'école royale polytechnique*, 18, cahier 30, 1845, p. 97.
50. Brehaut, E. *An encyclopaedist of the Dark Age*, Isidore of Seville. New York, 1912.
51. Brown, R. *Phil. Mag. N. S.*, Vol. 4, 1828, p. 161.
52. Brush, S. G. *Annals of Science*, Vol. 13, 1957, p. 188.
53. Buch, Ch. L. *Abh. Akad. Berlin*, 1814-15, S. 74.
54. Budde, E. A. *Ann. der Phys.*, Bd. 150, 1873, S. 578.
55. Changeux, P. N. *Obs. sur la Phys.*, Vol. 4, 1774.
56. Chauvin, E. *Miscellanea Berolinensia*, Vol. 1, 1710.
57. Clausius, R. J. E. *Ann. der Phys.*, Bd. 76, 1849, S. 161.
58. Clausius, R. J. E. *Annal der Phys.*, Bd. 100, 1857, S. 353.
59. Clément, Désormes. *Ann. de Chimie*, Vol. 42, 1802, p. 121.
60. Cohen, I. B. *Franklin and Newton. Memoirs of American Philosophical Society*, 1956, Vol. 43, Chap. 7.
61. Colladon, D. *Arch. Sci. phys. et nat.* Genève, 3rd ser., Vol. 2, 1879, p. 5.
62. Cotte, L. *Traité de météorologie*. Paris, 1774, p. 39.
63. Coulier, P. J. *Note sur une nouvelle propriété de l'air*. *Journ. de Pharmacie et de Chimie*, Vol. 22, 1875, p. 165, 254.
- 63a. Crombie, A. C. *Medieval and early modern science*. 2nd ed., 2 vols. New York, 1959.
64. Gruegerus, J. *Dissertatio academica de barometris*, Jena, 1701.
65. Cullen, W. *Edinb. Phil. Soc., Essays Phys. and Lit.*, Vol. 2, 1755, p. 159.
66. Cyrano de Bergerac, S. *Histoire comique des Etats et de l'empire de la Lune*. (Сирано де-Бержерак. Иной свет, или государства и Империи Луны. М.—Л., «Академия», 1931).
67. Dalton, J. *Meteorological observations and essays*. London, 1793, 2nd ed. Manchester—London, 1834.
68. Dalton, J. *Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of steam or vapour from water...* *Mem. Manch. Lit. and Phil. Soc.*, Vol. 5, 1802, p. 535.
69. Dalton, J. *Nicholson's Journ.*, Vol. 3, 1802, p. 267.
70. Dalton, J. *Nicholson's Journ.*, 1803, p. 119.
71. Dalton, J. *Mem. Manch. Lit. and Phil. Soc.*, Vol. 1, 1805, p. 259.
72. Dalton, J. *A new system of chemical philosophy*. Parts I—II. London, 1808, p. 168.
73. Dalton, J. *Phil. Trans.*, Vol. 116, Part. II, 1826, p. 174.
74. Dalton, J. *Phil. Trans.*, Vol. 127, 1837, p. 347.
75. Dalton, J. *A new system of chemistry*, 1842, Part I, p. 191.
76. Dampier, W. *A Voyage around the World*. London, 1697.
77. Daniell, J. F. *Meteorological essays and observations*. London, 1823.
78. Dante Alighieri. *La divina commedia. Purgatorio*. V.

79. Darwin, E. Phil. Trans., Vol. 50, 1757, p. 240.
80. Darwin, E. Phil. Trans., Vol. 78, 1788, p. 47.
81. Darwin, E. The botanic garden: a poem in two parts. London, 1789—1791.
82. D'Aviso, U. Lettera al dottor G. B. Capponi, Bologna, 1666, p. 79. Цитир. по: I. Galli, Mem. Acad. Nuovi Lincei 27, 1909, p. 233.
83. Davy, H. Elements of chemical philosophy. London, 1812.
84. Debuss, A. G. Isis, Vol. 55, 1964.
85. Defant, A. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Abt. 2A, Bd. 114, 1905.
86. Del Papa, G. Della natura dell'umido, e del secco, lettera all'illustrissimo Sig. Francesco Reddi. Florence, 1681, p. 141.
87. De la Rive, A. A. Traité de l'électricité. Paris, 1854—1858, Vol. III, p. 178.
88. Deluc, J. A. Recherches sur les modifications de l'atmosphère (2 vols, 4^e, Genève, 1772. 2nd ed., 4 vols., 8^e, Paris, 1784).
89. Deluc, J. A. Phil. Trans., Vol. 63, 1773, p. 454.
90. Deluc, J. A. Idées sur la météorologie, 2 vols. London, 1786, Paris, 1787.
91. Deluc, J. A. Monthly Review, Vol. 81, 1789, p. 695.
92. Deluc, J. A. Obs. sur la physique, Vol. 36, 1790, p. 276, 363.
93. Deluc, J. A. Obs. sur la physique, Vol. 39, 1791, p. 117.
94. Deluc, J. A. Ann. de Chimie, Vol. 8, 1791.
95. Deluc, J. A. On Evaporation. Phil. Trans., Vol. 82, 1792, p. 400.
96. Deluc, J. A. Introduction à la physique terrestre par les fluides expansibles. Paris, 1803.
97. Deluc, J. A. Annal. de Chim., Vol. 49, 1804, p. 306, Vol. 54, 1805, p. 156, 229.
98. Deluc, J. A. Annal. de Chimie, Vol. 54, 1805, p. 285.
99. Derham, W. Physico-Theology, or a Demonstration of the Being and Attributes of God from His Works of Creation (etc). London, 1713.
100. Desaguliers, J. Th. Phil. Trans., Vol. 30, 1717, p. 570; Vol. 36, 1729, p. 16.
101. Descartes. Discours de la méthode pour bien conduire la raison etc. Leyde, 1637. (Декарт Рене. Рассуждение о методе. Метеоры. Гл. II, стр. 197—198. АН СССР, 1953).
102. Dijksterhuis, E. J. The mechanization of the world picture. Oxford, 1961.
103. Dobson. Phil. Trans., Vol. 67, 1777, p. 256.
104. D'Onofrio, M. A. Meteorologische Abhandlung vom Hagel. Dresden, 1795.
105. Dove, H. W. De barometri mutationibus. Berlin, 1826.
106. Dove, H. W. Annal. der Phys., Bd. 89, 1828, S. 305.
107. Dove, H. W. Über den Zusammenhang der Hydrometeore mit den Veränderungen der Temperatur. Annal. d. Phys., 89, 1828, p. 305.
108. Dove, H. W. Das Gesetz der Stürme. 4-te Aufl. Berlin, 1873. (Г. Дове, Закон штормов, СПб, 1869.)
109. Ducarla-Bonifas, M. Histoire naturelle du monde. Septième Cahier: Les météores locaux, 1780.
110. Ducarla-Bonifas, M. (Du Carla). Obs. sur la Phys., Vol. 18, 1781, p. 446.
111. Du Fay, C. F. Cisternay... Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 1736, p. 352.
112. Dufour, L. Arch. Sci. Phys. et Nat., Genève, N. S., Vol. 10, 1861, p. 346.
113. Dufour, L. Arch. Sci. Phys. et Nat., Genève, N. S., Vol. 11, 1861, p. 29.
114. Eason, A. Mem. Manchester Lit. and Phil. Soc., Vol. 1, 1782.
115. Eels, H. Phil. Trans. Vol., 49, 1755, p. 124.
116. Egen, P. N. C. Annal. der Phys., Bd. 27, 1833, S. 9.
117. Espy, J. P. Theory of rain, hail, snow and the water spout, deduced from the latent calorific of vapour. Trans. Geolog. Soc. Pennsylv., I, 1835, p. 342.
118. Espy, J. P. Journ. Frankl. Inst., Vol. 17, 1836, p. 240, 309.

119. Espy, J. P. Journ. Frankl. Inst., Vol. 18, 1836, p. 100.
120. Espy, J. P. Rep. of Sections of Brit. Ass. Adv. Sci., 1840, p. 30.
121. Espy, J. P. Philosophy of Storms. Boston, 1841.
122. Espy, J. P. Second and third reports on meteorology to the Secretary of the Navy U. S. Congress, 31st Congress, 1st Session (Senate), Ex. Doc. No. 39, Washington, 1850, p. 33.
123. Erxleben, J. C. P. Anfangsgründe der Naturlehre. Göttingen, 1794.
124. Farrington, B. Greek science. Penguin books, Vol. 1, 1944; Vol. 11, 1949.
125. Ferrel, W. Recent advances in meteorology. Washington, 1886, App. 71.
126. Ficker, H. Bemerkungen über Goethes „Versuch einer Witterungslehre“. Sitz.—Ber. Preuss. Akad. Wiss., phys.-math. kl. 7, 1932, S. 47.
127. Firenze. Bibl. Naz. di —, ms. Gal. 276. fol. 10—11, 276. fol. 12, 282. fol. 2—3, 283. fol. 35—36.
128. Fontenelle, B. Hist. Acad. Roy. Sci. Paris, 1711, p. 3.
129. Forbes, J. D. Brit. Ass. Adv. Sci. Glasgow, 1840, p. 112.
130. Franklin, B. Experiments and observations on Electricity, made in Philadelphia (etc). London, 1751, p. 36.
131. Franklin, B. Phil. Trans., Vol. 55, 1765, p. 182.
132. Franklin, B. Mem. Manchester Lit. Phil. Soc., Ser. 2, Vol. 2, 1789, p. 373.
133. Garden, C. Phil. Trans., Vol. 15, 1685, p. 991.
134. Garsten, Ch. L. Tentamina systematis novi ad mutationis barometri etc. Frankfurt, 1733.
135. Gassendi, P. Opera omnia in sex tomos divisa. Leyden, 1658, Vol. 1, p. 216; Vol. 11, p. 70.
136. Gauss, K. F. Göttingische gelehrte Anzeigen, Dec. 1850, S. 1945.
137. Gay-Lussac, L. J. Annal de Chim. et Phys., Vol. 43, 1802, p. 137.
138. Gay-Lussac, L. J. Journ. de Phys., Vol. 59, 1804, p. 454.
139. Gazzeri, G. Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento, 1841, p. XXVI.
140. Gehler, J. S. T. Physikalisches Wörterbuch, Vol. II, p. 655.
141. Gilbert, L. W. Annal. der Phys., Bd. 15, 1803, S. 25.
142. Gilbert, O. Die meteorologischen Theorien des griechischen Altertums. Leipzig, 1907.
143. Glaisher, J. Phil. Trans., Vol. 137, 1847, p. 120.
144. Goethe, J. W. Die Schriften zur Naturwissenschaft. Erste Abteilung: Texte, Band 8, bearb. v. Dorothea Kuhn, Weimar, 1962, p. 322.
145. Graham, Th. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 12, 1834, p. 222.
146. Gray, W., Jr. Phillips, J. Brit. Ass. Adv. Sci. Report for 1833. Trans. Sec., p. 401, 1834; Trans. Sect. p. 560, 1835, Report, p. 171.
147. Greenaway, F. The biographical approach to John Dalton. Mem. and proc. Manch. Lit. and Phil. Soc., Vol. 100, 1958—1959.
148. Gronau, K. L. Schrift. naturf. Freunde, Berlin, Vol. 7, 1787, p. 343.
149. Groneman, H. J. J. Nature, Vol. 23, 1881, p. 337.
150. Guericke, O. Ottonis de Guericke Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de vacuo spatio primum à R. P. Gaspare Schotto... nunc vero ab ipso Autore perfectius edia, variisque aliis experimentis aucta (etc). Amsterdam, 1672, p. 89.
151. Guerlac, H. Actes 7^e Congrès Int. Hist. Sci., 1953, p. 332.
152. Guerlac, H. Isis, Vol. 45, 1954, p. 243.
153. Günther, S. Gerl. Beitr. Geoph., Bd. 5, 1903, S. 178.
154. Guyton de Morveau, L. B. Obs. sur la Phys., Vol. 9, 1777, p. 60.
155. Halley, E. Phil. Trans., Vol. 16, 1686, p. 104, 153.
156. Halley, E. Phil. Trans., Vol. 17, 1693, p. 469.
157. Hamberger, G. E. Dissertation sur la cause de l'élévation des vapeurs. Bordeaux, 1743.
158. Hamilton, H. Phil. Trans., Vol. 55, 1765, p. 146.
159. Hann, J. Zeitsch. Österr. Gesellsch. Meteor., Bd. 8, 1874, S. 111.

160. Hann, J. Zeitsch. Österr. Gesellsch. Meteor., Bd. 9, 1874, S. 193, 321, 337.
161. Hartsoecker, N. Principes de physique. Paris, 1696.
162. Hauksbee, F. Physico-mechanical experiments on various subjects (etc). London, 1709, p. 89.
163. Heberden, W. Phil. Trans., Vol. 59, 1769, p. 359.
164. Hellmann, G. Repertorium der deutschen Meteorologie. Leipzig, 1883.
165. Hellmann, G. Neudrucke von Schriften und Karten über Meteorologie und Erdmagnetismus, Vol. I—XV. Berlin, 1904.
166. Hellmann, G. Denkmäler mittelalterliches Meteorologie. Neudrucke von Schriften und Karten über Meteorologie, Vol. XV. Berlin, 1904.
167. Hertz, H. Meteorol. Zeitsch., Bd. 1, 1884, S. 421.
168. Heydon, Ch. An astrological discourse. etc. London, 1650.
169. Hildebrandsson, H. Teisserenc de Bort. L. Les bases de la météorologie dynamique. Paris, 1898—1907, Vol. 1, p. 157.
170. Histoire de l'Académie Royale des Sciences depuis son établissement en 1666 jusqu'à 1699. 11 vols., Paris, 1733; Vol. 2, p. 21, p. 66; p. 87.
171. Hoffmann, F. Observationes barometrico-meteorologicae et epidemicae Halenses Anni MDCC, praemissae sunt curiosae physicae meditationes circa ventorum caussas (etc). Halle, 1701.
172. Hoffmann, J. Münchener Geogr. Studien., Bd. 22, 1907, S. 1.
173. Hollmann, S. Ch. Phil. Trans., Vol. 46, 1749, p. 101.
174. Home, H., Lord Kames. Edinb. Phil. Soc., Essays and Obs., Vol. 3, 1771, p. 80.
175. Hooke, R. Micrographia, 1665.
176. Howard, L. Phil. Mag., Vol. 16, 1803, p. 97, 344.
177. Howard, L. Phil. Magaz., Vol. 17, 1803, p. 5.
178. Howard, L. Nicholson's Journ. 30, 1811, p. 57.
179. Howard, L. The Climate of London, 2nd ed., 3 vol., London, 1833, Vol. 1, p. 124.
180. Hube, M. Über die Ausdünstung und ihre Wirkung in der Atmosphäre. Leipzig, 1790.
181. Hutton, J. The Theory of Rain. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 1, 1788, p. 41.
182. Hutton, J. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 2, Part II, 1790, p. 39.
183. Huygens, Ch. Horologium oscillatorium. Paris, 1673.
184. Iyyubh of Edessa. Book of treasures or Encyclopaedia of philosophical and natural sciences, as taught at Bagdad about AD.817. Trans. by A. Mingana, Cambridge, 1935.
185. Jevons, W. S. Phil. Magaz., Vol. 22, 1861, p. 421.
186. Jonston, J. Thaumatrographia naturalis. IId ed. Amsterdam, 1633.
187. Joule, J. P. Mem. Manch. Lit. Phil. Soc., Vol. 9, 1851, p. 107.
188. King-Hele, D. Erasmus Darwin. London, 1963.
189. Kirwan, R. Trans. Irish. Acad., Vol. 2, 1788, p. 43.
190. Kirwan, R. Of the variations of the atmosphere. Dublin, 1801.
191. Kirwan, R. Phil. Magaz. 14, 1802, p. 258.
192. Kirwan, R. Phil. Magaz., Vol. 14, 1802, p. 143.
193. Kober, J. Ann der Phys., Bd. 144, 1871, p. 395.
194. König, W. Meteorol. Zeits., Bd. 5, 1888, S. 109.
195. Krafft, G. W. Cogitationes in experimenta et sententias de vaporum et halituum generatione ac elevatione. Tübingen, 1745.
196. Kratzenstein, Ch. G. Théorie de l'élevation des vapeurs et des exhalaisons démontrée mathématiquement, qui a remporté le prix au jugement de l'Académie Royale des Belles-Lettres, Sciences et Arts. Bordeaux, 1743.
197. Krönig, A. Annal. der Phys., Bd. 99, 1856, S. 315.
198. Krönig, A. C. Ann. Der Phys., Bd. 123, 1864, S. 641.
199. Kuhn, T. S. Isis, Bd. 44, 1958, S. 132.
200. Kurtyka, J. C. Precipitation measurement study. Urbana, 1953.
201. La Hire, Ph. Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 1705, p. 1.

202. Lambert, J. H. Abh. Akad. München. II Teil., Bd. 3, 1765, S. 75.
203. Lambert, J. H. Pyrometrie oder vom Maasse des Feuers und der Wärme. Berlin, 1779, S. 229.
204. Lamont, J., von, Abhandl. K. Bayer Akad. Wiss., math.-phys. Kl., Bd. 8, Pt. I, 1860, p. 181.
205. Lamont, J. v. Annal. d. Phys. Bd. 118, 1863, S. 168.
206. Lamont, J. von. Zeits. für Math. und Physik, Bd. 9, 1864, S. 439.
207. Laplace, P. S. Annal. de Chimie, Vol. 3, 1816, p. 238.
208. Lavoisier, A. L. De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables et de la formation des fluides élastiques aeriformes. Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 1777, p. 420.
209. Le Grand, A. Antonii le grand Historia naturale, variis experimentis et ratiociniis elucidata (etc). 2nd ed., London, 1680, p. 273.
210. Leibnitz, G. W. Miscellanea Berolinensia, Bd. 1, 1710, S. 123.
211. Leibnitz, G. W. Ephem. Acad. Nat. Cur., Cent. III & IV, appendix. Nürnberg, 1715.
212. Leibnitz, G. W. Opera omnia... nunc primum collecta, in classes distributa studio L. Dutens (etc), 6 vol., Geneva, 1768, Vol. 11, Part 2, p. 80.
213. Lémery, Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 1700, p. 101.
214. Lenard, P. Über Regen. Meteor. Zeitsch. Bd. 21, 1904, S. 249.
215. Lenglet. Compt. Rend., Vol. 48, 1859, p. 1048.
216. Le Roy, Ch. Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 1751, p. 481.
217. Leslie, J. A short account of experiments and instruments depending on the relations of air to heat and moisture. Edinburgh, 1813.
218. Leslie, J. Supplement to the 4th, 5th and 6th Editions of the Encyclopaedia Britannica. Edinburgh, 1824, Vol. 5.
219. Lichtenberg, G. Ch. Verteidigung des Hygrometers und des Deluc'schen Theorie vom Regen. Göttingen, 1800.
220. Lichtenberg, G. Ch. Vermischte Schriften. Göttingen, 1804, Vol. 3, S. 85.
221. Loomis, E. Trans. Amer. Philos. Soc., Vol. 7, 1841, p. 125.
222. Loomis, E. Trans. Amer. Phil. Soc., Vol. 9, 1846, p. 161.
223. Loomis, E. Amer. Journ. Sci., Vol. 8, 1874, p. 1.
224. Mache, H. Meteor. Zeitsch., Bd. 17, 1900, S. 554.
225. Magini, G. A. Breve instruttione sopra l'apparenze et mirabili effetti dello specchio concavo sferico. Bologna, 1611.
226. Magnus, G. Annal. d. Phys., Bd. 106, 1859, S. 21.
227. Maignan, E. Cours philosophicus concinnatus ex notissimis cuique principiis (etc), 4 vol. Toulouse, 1653, p. 1898.
228. Maille, P. H. Nouvelle théorie des hydrométéores (etc). Paris, 1853.
229. Mairan, J. J. d'Ortous de. Dissertation sur les variations du barometre, qui a remporté le Prix à l'Académie Royale des Belles Lettres, Sciences Arts de Bordeaux. Bordeaux, 1715, p. 22.
230. Mairan, J. J. D'Ortous de. Sur l'évaporation des liquides. Hist. Acad. Roy. Sci. Paris, 1742, p. 18.
231. Mann, Th. A. Mém. Acad. Roy. Sci. Bruxelles, Vol. 1, 1777.
232. Mariotte, E. Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides. Paris 1718, p. 18.
233. Mason, B. J. The physics of clouds. Oxford, 1957, Chap. 6. (Мейсон Б. Физика облаков, Гидрометеиздат, Л., 1960.)
234. Mayer, J. T., Jr. Etwas über den Regen und Herrn de Luc's Einwürlfe gegen die französischen Chemie. Green's Journ. d. Phys., Bd. 5, 1792, S. 371.
235. Magow, J. Tractatus quinque medico-physici (etc). Oxford, 1674.
236. McDonald, J. E. Early developments in the theory of the saturated adiabatic process. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 44, 1963, p. 203.
237. McDonald, J. E. James Espy and the beginnings of cloud thermodynamics. Bullet. Am. Met. Soc., Vol. 44, 1963, p. 634.

238. Meier, G. *Deus ex pluvia*. Diss. Hamburg, 1697.
239. Melloni, M. *Compt. Rendus*, Vol. 24, 1847, p. 531, 641; Vol. 25, 1847, p. 499.
240. Middleton, W. E. Knowles. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Vol. 68, 1942, p. 247.
241. Middleton, W. E. Knowles. *The history of the barometer*. Baltimore, 1964.
242. Migne J. P. *Patrologia Latina*.
243. Mizauld, A. *Le Mirouer de l'air autrement dict meteorologie, ou bien petit commentaire des choses de l'air*. Paris, 1548.
244. Molyneux, W. A. Discourse on this Problem, why Bodies dissolved in Menstrua specifically lighter than themselves, swim therein. *Phil. Trans.*, Vol. 16, 1686, p. 88.
245. Monge, G. *Ann. de chimie*, Vol. 5, 1790, p. 1.
246. Mongez, J. A. *Obs. sur la Phys.*, Vol. 12, 1778, p. 202.
247. Müller, J. H. J. *Lehrbuch der Kosmischen Physik*. Braunschweig, 1856, p. 407.
248. Muncke, G. W. Tau. *Gehler's phys. Wörterbuch*, Neue Aufl. Bd. IX, P. 1, Leipzig, 1838, S. 686.
249. Musschenbroek, P. von. *Beginnelsen der natuurrkunde*. Leiden, 1736;
250. Newman J. R. *The world of mathematics*. New York, Simon and Schuster, 1956, Vol. 11, p. 774.
251. Newton, J. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Editio tertio, 1725. (Ис. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Изд. Ник. Мор. академии, СПб., 1915. Издано в собр. трудов акад. А. Н. Крылова, т. VII, 1936.)
252. Newton, J. *Opticks, or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. 4th ed., London, 1730. Reprinted in 1952 by Dover Publications Inc., New York. (И. Ньютон. Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. Изд. 2-е, М., 1954.)
253. Nollet. *Mém. Acad. Roy. Sci. Paris*, 1740, p. 243.
254. Nollet, J. A. *Recherches sur les causes particulières des phénomènes électriques*. Paris, 1764, p. 324.
255. Nöllner, K. *Die Natur*, Bd. 2, 1853, S. 313, 321, 365.
256. Obermeyer, A. *Zeits. österr. Gesellsch. Meteorol.*, Bd. 12, 1877, S. 97.
257. Oldenburg, H. *Phil. Trans.*, Vol. 1, 1666, p. 153.
258. Oliver, A. *Trans. Amer. Philos. Soc.*, Vol. 2, 1786, p. 101.
259. Olmsted, D. *Amer. J. Sci.*, Vol. 18, 1830, p. 1.
260. Pardies. *Mém. de Trevoux*, Mar.—April, 1701, p. 155.
261. Partington, J. R. *The composition of water*. London, 1928.
262. Partington, J. R. *A short history of chemistry*. IIIrd ed. London, 1957.
263. Parrot, G. F. *Ann. der Phys.*, Bd. 10, 1802, S. 166.
264. Parrot, G. F. *Annal. der Phys.*, Bd. 13, 1803, S. 174, 244.
265. Parrot, G. F. *Annal. der Phys.*, Bd. 17, 1804, S. 82.
266. Péclel, J. C. E. *Traité de physique*, Vol. I—II. Paris, 1843.
267. Percival, Th. *Memoirs*. M. D. London, 1807, Appendix, p. ccliv.
268. Pernter, J. M., Exner, F. M. *Meteorologische Optik*. 2-te Aufl. Wien—Leipzig, 1922.
269. Peslin, H. *Sur les mouvements généraux de l'atmosphère*. *Bull. Hebd. Assoc. Sci. de France*, Vol. 3, 1868, p. 299.
270. Phillips, R. *Phil. Mag. Ser. 4*, Vol. 5, 1853, p. 28.
271. Pictet, M. A. *Essais de physique*. Genève, 1790
272. Pignotti, L. *Congettura meteorologica*. Firenze, 1780, p. 75.
273. Placentini, G. *De barometro dissertationes duae*. Padua, 1711.
274. Plinius (sen.) *Natural History*. Transl. by H. Rackham and W. H. S. Jones. London, 10 vol., 1938—1963.
275. Pogendorff, J. C. *Annal. d. Phys.*, Bd. 33, 1834, S. 222.
276. Poisson, S. D. *Annal. de Chim.*, Vol. 23, 1823, p. 337.

277. Pouillet, C. G. M. *Eléments de physique expérimentale et de météorologie*. Paris, 1827, 6-me ed., Paris, 1853, Vol. 2, p. 718.
278. Prevost, B. *Annal. de Chimie*, Vol. 44, 1803, p. 75.
279. Prevost, P. *Obs. sur la physique*, Vol. 38, 1791, p. 314.
280. Priestley, J. *Experiments and observations relating to various branches of natural philosophy*. 3 vol. London—Birmingham, 1779—1786.
281. Priestley, J. *Phil. Trans.*, Vol. 73, 1783, p. 398.
282. Raillard, F. *Compt. Rend.*, Vol. 44, 1857, p. 1142.
283. Ramazzini, B. *Ephemerides barometricae Mutinenses anni MDC.XCIV, una cum disquisitione causae ascensus et descensus mercurii in Torricelliana fistula (etc)*. Modena, 1695, p. XXVIII.
284. Ramazzini, B. *Ephemerides barometricae Mutinae olim editae a Bernhardo Ramazzini ... nunc Patavii recusae cum tota controversia ... cum D. [omino] C. Gunthero Schelhamero, ... Accedit nova epistola ejusdem Ramazzini, cum solutione problematis inter ipsos agitati ex invento G. C. Leibnitii*. Padua, 1710.
285. Ramazzini, B. *Ephem. Acad. Nat. Cur. Cent. I & 11*, appendix p. 92, 106. Frankfurt und Leipzig, 1712.
286. Redfield, Amer. *Journ. Sci.*, Vol. 20, 1831, p. 17.
287. Redfield, W. *Journ. Frankl. Inst.*, Vol. 19nd, 1837, p. 112.
288. Regnaut, H. V. *Comptes Rendus*, Vol. 20, 1845, p. 1120, 1220.
289. Regnaut, H. V. *Comptes Rendus*, Vol. 39, 1854, p. 301, 345, 397.
290. Reid, An attempt to develop the law of storms. London, 1838.
291. Renou, E. J. *Comptes Rendus*, Vol. 62, 1866, p. 825. *Annuaire Soc. Mët. de France*, Vol. 4, 1866, p. 89.
292. Renou, E. J. *Comptes Rendus*, Vol. 81, 1875, p. 506.
293. Reye, Th. *Zeitsch. f. Math. und Phys.*, Bd. 9, 1864, S. 250.
294. Reye, Th. *Ann. der Phys.*, Bd. 125, 1865, S. 618.
295. Reye, Th. *Die Wirbelstürme; Tornados und Wettersäulen in des Erdatmosphäre*. Hannover, 1872.
296. Reynolds, O. *Proc. Manch. Lit. and Phil. Soc.*, Vol. 16, 1877, p. 23.
297. Richmann, G. W. *Nov. Comm. Petrop.* I, 1750, p. 284.
298. Richmann, G. W. *Novi Comment. Acad. Petropol.*, Vol. 2, 1751, p. 145.
299. Ritter, Ch. *Ann. Soc. Météorol. de France*, Vol. 33, 1885, p. 262.
300. Roit, L. T. C. Thomas Newcomen. *The prehistory of the steam engine*. Dawlish and London, 1963.
301. Rowning, J. *A compendious system of natural philosophy*. 2 vols in 4 parts. Cambridge, 1735—1742, Part II, p. 132.
302. Rumford, B. *On the propagation of heat in fluids*. Part I, London, 1797.
303. Russell, R. *Nature*, Vol. 47, 1892, p. 210.
304. Saalfeld, M. *Alle weisse Wolken sind gefroren. Acad. electoralis moguntina scientiarum utilium qua Erfurti est, Übersetzungen und deutsche Abh.* 2, 1763, S. 100.
305. *Saggi di naturali esperienze della Accademia del Cimento*. III-zo ed. Firenze, 1841.
306. Samburski, S. *The physical world of the Greeks*. London, 1963.
307. Sarton, G. *Introduction to the history of science*, Vol. I. Washington, 1927.
- 307a. Saussure, H. B. *Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*. Neuchâtel, 1779—1796, 4 vols.
308. Saussure, H. B. *Essais sur l'hygrométrie*. Neuchâtel, 1783.
309. Saussure, H. B. *Défense de l'hygromètre à cheveu, pour servir de suite aux essais sur l'hygrométrie*. Genève, 1788.
310. Schelhammer, G. Ch. *De motu mercurii in tubo Torricilliano epistola. Accedit altera ejusdem argumenti Bernhardi Ramazzini... Itemque tertia, sive ejusdem Schelhameri ad objectiones Ramazzinianas*. Kiel, 1699.
311. Schmauss, A. und Wigand, A. *Die Atmosphäre als Kolloid*. Hamburg, 1929. (Шмаусс А. и Виганд А. Атмосфера, как коллоид. М., 1933.)
312. Schmid, C. *Zeits. öster. Ges. Meteorol.*, Bd. 13, 1878, S. 436.

313. Schmid, E. E. Lehrbuch der Meteorologie. Leipzig, 1860.
314. Schmidt, G. G. Gren's neue J. der Phys., Bd. 4, 1797, S. 251.
315. Schmidt, W. Meteor. Zeitsch., Bd. 25, 1908, S. 498.
316. Schneider-Carius, K. Goethe und die Meteorologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der U. S. Zone, Nr. 12, Bad Kissingen, 1950.
317. Schneider-Carius, K. Wetterkunde, Wetterforschung, Geschichte ihrer Probleme. Freiburg, 1955.
318. Schofield, R. E. Annals of Science, Vol. 10, 1954, p. 294.
319. Schofield, R. E. The Lunar Society of Birmingham. Oxford, 1963.
320. Schott, C. Technica curiosa, sive mirabilia artis (etc) Nürnberg, 1664, p. 24.
321. Schreiber, P. Meteorol. Zeits., Bd. 18, 1901, S. 58.
322. Senebier, J. Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire pour modifier les êtres des trois règnes de la nature. 3 vols, Genève, 1782.
323. Seneca. Natural Questiones. Physical Science in the time of Nero. Transl. by J. Clarke. London, 1910.
324. Six, J. Phil. Trans., Vol. 78, 1788, p. 103.
325. Soldner, J. Annal. der Physik, Bd. 17, 1804, S. 44.
326. Stahl W. H. Roman Science. Madison, 1962.
327. Stark, J. Bayerische Akad., München, neue philos. Abh., Bd. 4, 1785.
328. Stevelly, J. Rep. of Sections of Brit. Ass. Adv. Sci., 1834, p. 564.
329. Stokes, G. G. Trans. Cambridge Phil. Soc., Vol. 9, 1856, No. X, p. 51.
330. Strachey, R. Proc. Roy. Soc. London, Vol. 11, 1861, p. 182.
331. Taylor, E. G. R. Late Tudor and early Stuart geography. 1583—1650. London, 1934.
332. Taylor, G. I. Q. J. Roy. Meteorol. Soc., Vol. 43, 1917, p. 241.
333. Tesson, L. U. Compt. Rendus, Vol. 48, 1859, p. 905.
334. Thompson, B. (Rumford). Phil. Trans., Vol. 94, 1804, p. 77.
335. Thompson, Th. A system of chemistry. 4 vol. Edinburgh, 1802, Vol. III, p. 269.
336. Thomson, W. (Kelvin). Proc. Manchester Lit. and Phil. Soc. Vol. 2, 1862, p. 170.
337. Thomson, W. (Kelvin). Trans. Manchester Lit. and Phil. Soc., Vol. 2, 1865, p. 125.
338. Thomson, W. On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid. Proc. Roy. Soc. Edinb., Vol. 7, 1870, p. 63.
339. Toaldo, G. Della vera influenza degli astri sulle stagioni et mutazioni di tempo. Padova, 1770.
340. Trabert, W. Meteorol. Zeits., Bd. 16, 1899, S. 433.
341. Tralles, J. G. Annal. der Phys., Bd. 27, 1807, S. 400.
342. Van Marum, M. Ann. der Phys., Bd. I, 1799, S. 112.
343. Van Mons, J. B. Nicholson's Journal, Vol. 24, 1809.
344. Van Mons, J. B. Giornale di fisica, Pavia, Vol. 2, 1809.
345. Varenus, B. Geographia generalis. Amsterdam, 1650. (Бернарда Варения Всеобщая География, пересмотренная Исаком Невтоном. СПб., Академия наук, 1790.)
346. Volta, A. Memoria sopra la grandine. Giornale de Fisica, Pavia, Vol. 1, 1808, pp. 31, 129, 179.
347. Volta, A. Gren's neue J. der Phys., Bd. 3, 1796, S. 479.
348. Wähner, C. Historisch-kritisch Uebersicht über die Hageltheorien (etc). Rotterdam, 1876.
349. Waller, A. Phil. Mag., Vol. 28, 1846, p. 94.
350. Waller, A. Phil. Trans., Vol. 137, 1847, p. 23.
351. Wallerius, N. Acta Litteraria, Upsala, Vol. 4, 1738, p. 339.
352. Wallis, J. Phil. Trans., Vol. 1, 1666, p. 166.
353. Wallis, J. Phil. Trans., Vol. 15, 1658, p. 1002.
354. Wallis, J. Phil. Trans., Vol. 19, 1967, p. 653.
355. Wasielewski, W. Goethes meteorologische Studien. Leipzig, 1910.

356. Webster, N. Mem. Amer. Acad. Arts. and Sci. Part I, 1809, p. 95.
357. Wells, W. C. An essay on dew and several appearances connected with it. London, 1814. Reprinted with annotations of L. P. Casella, London, 1866.
358. Whittaker, E. A history of the theories of aether and electricity. London, 1951.
359. Wiesner, J. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien. Abt. I. Bd. 104, 1895, S. 1397.
360. Wigand, A. Meteor. Zeitsch., Bd. 30, 1913, S. 10.
361. Wilson, A. Phil. Trans., Vol. 61, 1771, p. 326.
362. Wilson, P. Phil. Trans., Vol. 70, 1780, p. 451.
363. Wilson, P. Phil. Trans., Vol. 71, 1781, p. 386.
364. Wilson, P. Trans. Roy. Soc. Edinb., Vol. 1, 1788, p. 146.
365. Wolff, Phil. Trans., Vol. 52, Part. 2, 1762, p. 547.
366. Wolf, A. A History of science, technology and philosophy in the 18th Century, 2nd ed., 2 vol. New York, 1961, Vol. 1.
367. Wolff, Ch. Allerhand nützliche Versuche, dadurch zu genauer Erkenntniss der Natur und Kunst der Weg gebahnet wird (etc). 2te ed. Halle. 1745—1747, Vol. 2.
368. Wolff, Ch. Aerometriae elementa, in quibus aliquot aeris vires ac proprietates juxta methodum geometrarum demonstrantur. 2te ed., Leipzig, 1709, S. 303.
369. Wolff, K. F. Phil. Trans., Vol. 52, Part 2, 1762, p. 347.
370. Wrede, K. F. Annal. der Phys., Bd. 12, 1802, S. 319.
371. Wright, T. Popular treatises on science written during the Middle Ages in Anglo-Saxon, Anglo-Norman and English. London, 1841.
372. Young, Th. A course of lectures on natural philosophy (etc), 2 vols. London, 1807, Vol. 1, p. 711.
373. Zyllius, J. D. O. Grén's Journ. d. Phys., Bd. 6, 1792, S. 195, Bd. 8, 1794, S. 51.
374. Zyllius, J. D. O. Prüfung der neuen Theorie des Herrn de Lüc vom Regen und Seiner daraus abgeleitete Einwürfe gegen die Auflösungstheorie. Berlin, 1795.
375. Zyllius, J. D. O. Annal. d. Phys., Bd. 5, 1800, S. 257; Bd. 8, 1801, S. 342.

УКАЗАТЕЛЬ

1. В «Указателе» не помещены фамилии тех авторов, которые упомянуты в библиографическом списке. Исключение сделано для нескольких античных авторов, творения которых известны лишь по ссылкам в позднейших работах.

2. Мнение того или другого автора по определенному предмету следует искать на странице, указанной при названии этого предмета либо с помощью библиографической ссылки на его труды, сопровождаемой также (курсивом) указанием на страницу данной книги.

3. «Указатель» оригинала в русском издании несколько расширен.

Адвекция, 75—79

Академия достопримечательностей природы (*Academia curiosorum naturae*), 69

Александрия, 15

Альпы, их погода, 103, 129

Анаксагор, 14

Анаксимандр, 14

Анаксимен, 10

Антиперистаз, 13

Антициклоны, 145—146

Арабская наука, 18

Астрометеорология, 21

Атмосферы высота, 75—76

Атмосферы различных газов, их независимость, 118—119, 123

Атомисты, 14

Аэрологическая диаграмма, 141, 144—145

Аэростатные наблюдения, 94, 123

Барометра колебания 59—82, прежние их теории, 61—69, их происхождение 67, связь с падением капель 69—73, ветер и колебания барометра, 72—74

Басра (Ирак), 18

Безье (Франция), 31

Берлинская Академия наук, 46, 72, 114, 132

Бермудские острова, 136

Библия, 8—9

Бирмингэм (Англия), 95, 103

Богословие и наука, 20

Бордо, Академия наук, 30, 48

Братство непорочности, 18—19

Британская Ассоциация содействия науке (В. А. А.), 138, 147

Броуновское движение, 128

Брюссель (Бельгия), 80

Бури: изучение, 135—146, динамическая теория, 144—145

Вакуум, испарение в него, 34—35

Вена, 173, Центральный Институт метеорологии и геодинамики, 127

Венсенн (Франция), 90

Вестминстерское Аббатство, 88

Ветра влияние на барометр, 67, 72—74
 Водяной пар, см. пар, испарение
 Воздуха аристотелево определение, 11, вязкость, 51—52, адвекция, 75—78, упругость, 80, состав, 122, опускание, 178
 Восходящий поток, 107
 Второзаконие, 8
 Вызывание дождя (rainmaking), 140
 Вязкость воздуха, 51—52
 Галле (Германия), 80
 Ганновер (Германия), 70
 Геттинген (Германия), 114
 Геттингенское учение обозрение, 125
 Гигрометр, 76
 Гидрологический цикл, 89
 Гипсометрия барометрическая, 37, 58, 125
 Глазго, обсерватория Макферлана, 159
 Гомер, 9, 10, 74
 Готторп (Германия), 69
 Градиент температуры, 160—161
 Град, определение, 168—169, Крупа, 168, теория града, 168—180, град и воздушные азотные соли, 170—171, град и молния, 170, 174, химические теории града, 172, электрические теории града, 172, электрические теории града, 172—174
 Градины, рост, 177—179
 Греки древние, 9—15, отличие их взглядов от древних иудеев, 9, метеорология, 9—14
 Греческая наука, 18—19
 Девапорация, 95
 Дижон, Академия, 31
 Диффузия газов, 118, 123
 Дождевые капли, скорость падения, 21, 148—149, предполагаемая невесомость, 69—72, рост, 87—89, 146—149, размер, 146—148, переохлаждение, 179
 Дождей классификация, 133—135
 Дождь, электрические теории, 36, 100—102, теории XVII—XVIII вв., 83—98, создаваемый сжатием, 84—86, создаваемый расширением, 84—86, «солевые» испарения и дождь, 86—87, тающий снег, 98, теория Хэттона, 95—98, Теория Делюка, 97—116, теории XIX в., 129—153
 Дублин (Ирландия), 33, 85
 Женева (Швейцария), 37, 91, 111, 161, 175—176
 Звук скорость, 123
 Иена (Германия), 46, 73
 Излучение, 135, 159, ночное излучение, 163—164, сомнения в его существовании, 164
 Иней, 158—159
 Ионийская школа философов, 10
 Испарение, 24—25, теория растворения, 29, 31—36, 106, 122, 130, испарение в вакуум, 34—35, электрическая теория, 36, «химическое» растворение, 116, кинетическая теория, 128
 Испарения, «солевые», 86—87
 Иудеи, древние, 8—9
 Йельский университет, 174
 Йорк (Англия), 147
 Капельки, 51—52, падение, 55—58, скорость, 56, слияние, 84—85, давление пара над ними, 148, рост, 152—153, переохлаждение, 178—180
 Кентерберийский собор, 160
 Кинетическая теория газов, 30, 79, 121, 123, 124, 128
 Коагуляция, 85
 Конвективное равновесие, 131—132, 141, 142—144

Конвекционные ячейки, 92
 Конвекция, 30, 57, 91, 92, 107, 131
 Конденсации ядра, 149—153
 Королевское общество (Лондон), 26, 37, 64—66, 68—69, 100, 123
 Крупа, 168
 Ледяные кристаллы в облаках, 89
 Лондон, 66, 163
 Луна—предполагаемая причина росы, 154
 Лунное Бирмингэмское общество, 41, 103, 112
 Лунные горы (Африка), 91
 Лучистое тепло, 161—162
 Малая Азия, 8
 Марли (Франция), 90
 Мексика, 21
 Местности влияние, 89—91
 Модена (Италия), 68
 Монпелье (Франция), 32, 157
 Монтобан (Франция), 162
 Морось, 8, 12
 Мюнхен, обсерватория, 126
 Неаполь, 175
 Невесомость капель, 69—72
 Ниагара, 29
 Облака, структура, 43—58, взвешенность, 43—68
 Облаков формы, 55—56, 130
 Огаста (Иллинойс, США), 139
 Оксфорд (Англия), 61, 67
 Орографические осадки, 89—90
 Осадки, изменение с высотой, 88—89, влияние местности, 89—90, влияние ветра на измерение, 146—147
 Оффенбах (Германия), 51
 Охлаждение при подъеме, 107
 Охлаждение при разрежении, 93—94
 Падение капель, 21, скорость, 148—149
 Падуя (Италия), 70
 Палестина, 9
 Пар, 23—42, пары и испарения, 11, поднятие пара, 26—30, пар, состоящий из воды и жара, 37—42, пар, независимый от воздуха, 39—40, 118—119, пар в XIX в., 117—128, распределение в атмосфере, 126—127, максимальное давление, 127—128, давление над каплями, 148. См. также испарение.
 Париж, Академия наук, 31, 38, 55, 72, 138, 141—142, 155, Отчеты Академии, 165, Политехническая школа, 53, обсерватория, 75, 90
 Парциальное давление, 121
 Пензанс (Англия), 147
 Перенасыщение, 152
 Персидский залив, 19
 Пиза (Италия), 25, 35, 62, 63, 64, 81
 Подтекание, 139
 Пузырьки, 45—51, 52—55, 86, 92, 108
 Радуга, 53
 Разрежение, вызванное им охлаждение, 93—94
 Реки, их происхождение, 14
 Рим, 15
 Римская наука, 18
 Роса, древние иудеи о росе, 8, теории росы, 154—167
 Росток (Германия), 114
 Росы точка, 33
 Салем (Массачусетс, США), 92

Сеть синоптическая, ее необходимость, 129
Скрытое тепло, 95
Снег, 13, тает, образуя дождь, 89
Снежная крупа, 168, крупа как ядро градины, 179
Стихии четыре, 11
Стойки, 14
Страсбург, 30, 144
Счетчик пыли, 152
Счетчик ядер, 153
Тарб (Франция), 143
Температуры вертикальный градиент, 160—161
Тепло и холод, идеи о них в древности, 10
Термодинамика атмосферы, 142—144
Точка росы, 33
Упругость пара насыщающего, 127
Фалес Милетский, 10
Филадельфия (США), 147
Филопон, 18
Флоренция, Академия Опыта, 32, 61—62, 161
Французская химия, 113
Хемниц (Германия), 180
Химия и метеорология, 83—84, 99, 102—116, 172, пневматическая химия, 109, французская, 113
Христианская эра, 15—17
Церковь ранняя, 16
Циклоны, 136—146
Штормы вращательные, 135—136, 138, 144
Эбердин (Шотландия), 66
Эдинбург (Шотландия), 66, 147, Королевское Эдинбургское общество, 151—152
Элейская школа философов, 11
Электричество и метеорология, 84, 99—102
Энергия штормов, 139, 143, 146
Энциклопедия Британская, 74, 116
Ядра конденсации, 149—153

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора	3
<i>Глава I. От древних времен до изобретения барометра</i>	<i>7</i>
1. Введение	7
2. Древние иудеи	8
3. Древние греки и римляне	9
4. Последующие пятнадцать столетий	15
<i>Глава II. Представления о водяном паре в семнадцатом и восемнадцатом столетиях</i>	<i>23</i>
1. Пар—не воздух	23
2. Поднятие пара	26
3. Растворенная вода	30
4. Вода и «жар»	37
<i>Глава III. Структура облаков и их взвешенность</i>	<i>43</i>
1. Крошечные частицы	43
2. Мелкие пузырьки	45
3. На сцене появляется вязкость	51
4. Снова пузырьки	52
5. Медленное опускание	55
<i>Глава IV. Колебания барометра</i>	<i>59</i>
1. Головоломка	59
2. Первые пятьдесят лет	61
3. Невесомость дождевых капель	69
4. Воздействие ветра на барометр	72
5. Адвекция воздуха	75
6. Различные объяснения	79
<i>Глава V. Теории дождя и снега в семнадцатом и восемнадцатом столетиях</i>	<i>83</i>
1. Введение	83
2. Элементарные понятия о расширении и сжатии	84
3. «Солевые» испарения	86
4. Рост дождевых капель	87
5. Влияние местности	89
6. Конвекция	91
7. Охлаждение при разрежении	93
8. Теория дождя по Хэттону	95

<i>Глава VI. Электрическая и химическая метеорология</i>	99
1. Введение	99
2. Электрические теории	100
3. Химическая метеорология	102
<i>Глава VII. Водяной пар в девятнадцатом веке</i>	117
<i>Глава VIII. Теории дождя в девятнадцатом веке</i>	129
1. Введение	129
2. Первая четверть века	130
3. Классификация дождей	133
4. Бури большие и малые	135
5. Рост дождевых капель	146
6. Ядра конденсации	149
<i>Глава IX. Теории росы и инея</i>	154
<i>Глава X. Теории града</i>	168
<i>Литература</i>	181
<i>Указатель</i>	191

У. Э. К. МИДДЛТОН
ИСТОРИЯ
ТЕОРИИ ДОЖДЯ
И
ДРУГИХ ФОРМ ОСАДКОВ

Отв. редактор А. Х. Хргиан
Редактор Л. А. Зельманова
Художник Ю. С. Детинкин
Худож. редактор В. А. Евтихийев
Техн. редактор Л. А. Липатова
Корректор Г. С. Макарова

Сдано в набор 28/X 1968 г. Подписано
к печати 4/II 1969 г. Бумага тип. № 1 60×90¹/₁₆
Бум. л. 6,125. Печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. 12,90.
Тираж 8200 экз. Индекс МЛ-117.
Гидрометеорологическое издательство
Ленинград В-53, 2-я линия, д. № 23.
Заказ № 774. Цена 65 коп.

Ленинградская типография № 8
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Ленинград, Прачечный пер., д. № 6