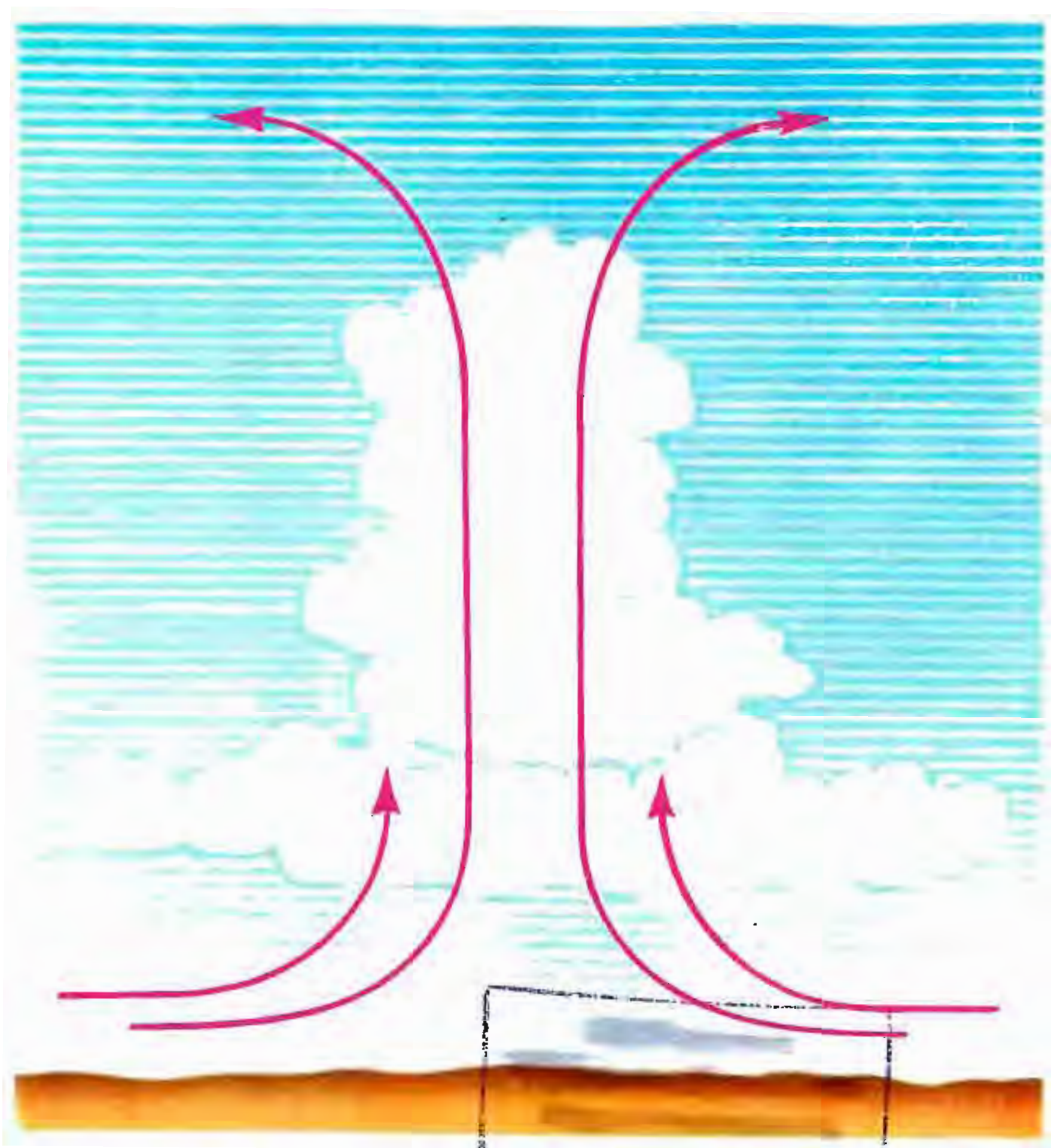


Л. В. Тарасов

# ФИЗИКА В ПРИРОДЕ

Книга для учащихся



МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1988

ББК 22.3  
Т19

Рецензенты:

академик *А. Б. Мигдал*,

учитель физики средней школы

№ 103 Москвы *Л. К. Мещерская*

**Тарасов Л. В.**

Т19 **Физика в природе: Кн. для учащихся.— М.: Просвещение, 1988.— 351 с.: ил.**

ISBN 5-09-001516-3

В книге рассмотрены различные природные явления: образование тумана, облаков, грозных туч, молния, радуга, миражи, полярные сияния, свечение моря, возникновение волн цунами, тайфуны, землетрясения, извержения вулканов и гейзеров, метели, лавины и др. Читателю предлагается взглянуть на каждое явление глазами поэта, натуралиста и, наконец, физика.

Т  $\frac{4306020000-310}{103(03)-88}$  232—87

**ББК 22.3**

ISBN 5-09-001516-3

© Издательство «Просвещение», 1988

## Обращение автора к читателю

Дорогой читатель!

Позволь представить тебе эту книгу. В ней рассматривается физика различных природных явлений. Некоторые из них ты, конечно, наблюдал сам, и не раз. Я имею в виду, например, солнечные закаты, туманы, облака, молнию, радугу, метели и т. д. О других ты знаешь, скорее всего, лишь понаслышке. К ним я отношу миражи, полярные сияния, шаровую молнию, гало, снежные лавины, цунами, серебристые облака, зеленый луч и др. Природа необычайно разнообразна, она поистине неисчерпаема. Посвятив книгу теме «Физика в природе», я, естественно, не претендовал на то, чтобы рассмотреть эту тему исчерпывающе. Поневоле мне пришлось ограничиться лишь некоторыми явлениями природы — теми, которые показались мне наиболее интересными. Их я и попытался описать и проанализировать с точки зрения физики.

Изучение физики природных явлений имеет, прежде всего, огромную познавательную ценность. Природа — эта гигантская физическая лаборатория — наглядно демонстрирует относительность всевозможных «перегородок» в предмете «физика», условность разделения физики на отдельные самостоятельные разделы, единство физической картины мира, взаимосвязь физических явлений. Возьмем хотя бы грозу — здесь мы встречаемся с проявлением одновременно законов механики, гидростатики, термодинамики, молекулярной физики, электростатики, электродинамики, акустики, оптики. Современные школьники знают, хотя бы в общих чертах, как работает двигатель автомобиля, зачем нужен трансформатор, почему взлетает ракета, что такое ускоритель частиц, атомный реактор, лазер. Однако они, как правило, не знают, почему небо голубого цвета, как созревает и как разрушается грозовая туча, почему молния бьет не сверху вниз (как это часто полагают), а как раз наоборот — снизу вверх, отчего бывает двойная радуга, что такое гало, зеленый луч, серебристые облака, цунами.

Хочется особенно подчеркнуть, что достаточно глубокое изучение физики природных явлений стало возможным, в основном, лишь в наше время — благодаря успехам современной физики (а также химии и биологии). Важно также помнить, что изучение физики природных явлений позволяет успешно решать различные технические проблемы. Достаточно вспомнить о таком научно-техническом направлении, как бионика. Человек издавна учился у природы. Многие не понимая в природе, он, естественно, не мог быть слишком хорошим ее учеником.

В наше время человек, вооруженный комплексом современных научных знаний и прекрасными измерительными приборами и устройствами, уже в состоянии заглянуть в самые сокровенные «тайники» природы. Поэтому именно теперь он способен многое взять от природы, способен многому у нее научиться.

Размышляя над данной книгой, я думал не только о чисто познавательной ценности изучения физики природных явлений. Я пришел к выводу, что изучение физики природы очень важно также и в других отношениях. Литература и искусство прекрасно развивают в нас поэтическое, эмоциональное восприятие природы. Постигая одновременно физику явлений природы, мы тем самым объединяем эмоциональное восприятие с рациональным. В результате мы учимся видеть красоту в физике и, более того, учимся вообще более глубоко чувствовать прекрасное. В этом состоит эстетическая ценность изучения физики природы. Отмечу также, что противопоставление физической сущности природных явлений легендам и суевериям несет в себе мощный атеистический заряд. Наконец, не надо забывать, что понимание процессов, происходящих в природе, является залогом бережного отношения к природе, что особенно важно в наше время, когда вооруженный мощной техникой человек в состоянии не только искалечить, но и вообще погубить земную природу.

Книга состоит из глав, каждая из которых есть рассказ о каком-то природном явлении или о группе явлений. Главы открываются небольшими отступлениями в область поэзии, мифологии, легенд, связанных с рассматриваемым явлением. Затем мы начинаем внимательно наблюдать данное явление, превращаясь в натуралистов: подмечаем его особенности, наиболее характерные свойства, выделяем разновидности. Постепенно от наблюдения мы переходим к анализу явления, к обсуждению физических механизмов, лежащих в его основе. При этом совершаем небольшие исторические экскурсы и решаем несложные физические задачи.

В заключение хочу остановиться на названии книги. Возможно, оно покажется противоречивым. Ведь по-гречески «физика» — это «наука о природе». Можно ли поэтому говорить о «физике в природе»? Мне кажется, что ничего страшного тут нет. Произойдя от упомянутого греческого слова, термин «физика» давно приобрел самостоятельный смысл. Недаром же мы обычно изучаем физику в отрыве от природных явлений (что, кстати говоря, не надо приветствовать). Для подтверждения и демонстрации физических законов мы обращаемся обычно отнюдь не к природе, а к специально придуманным опытам, а также к примерам, взятым из техники. В наше время под словосочетанием «физика в природе» понимается рассмотрение природных явлений с позиций современной физики, анализ этих явлений, основанный на применении законов и методов физики.

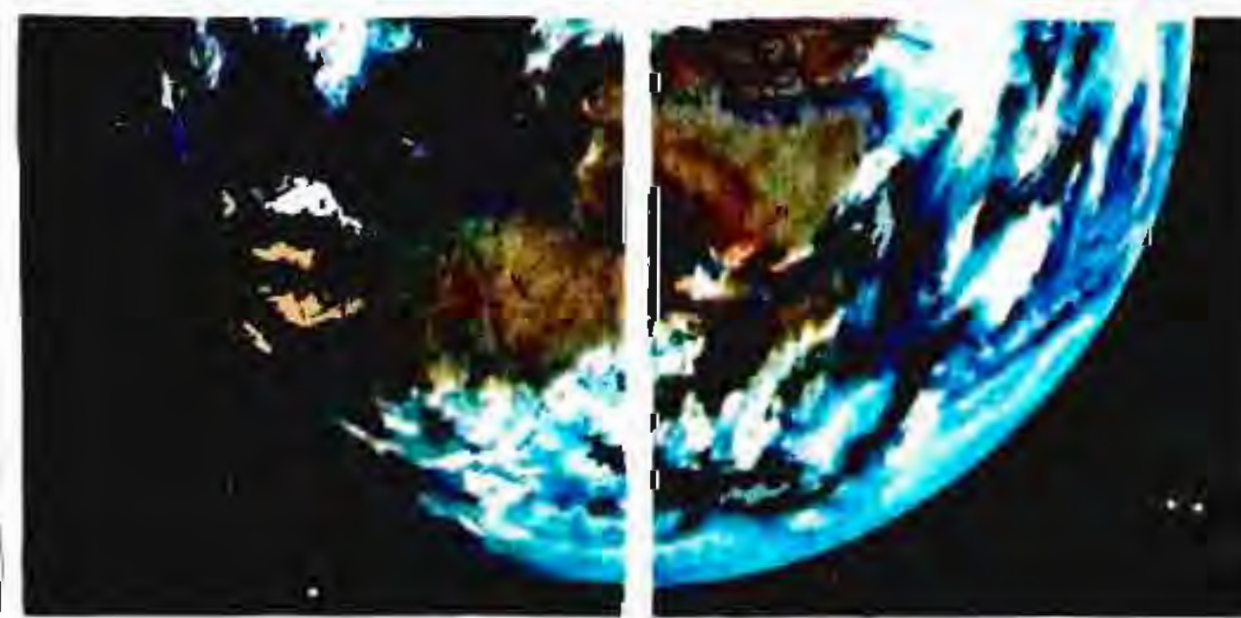
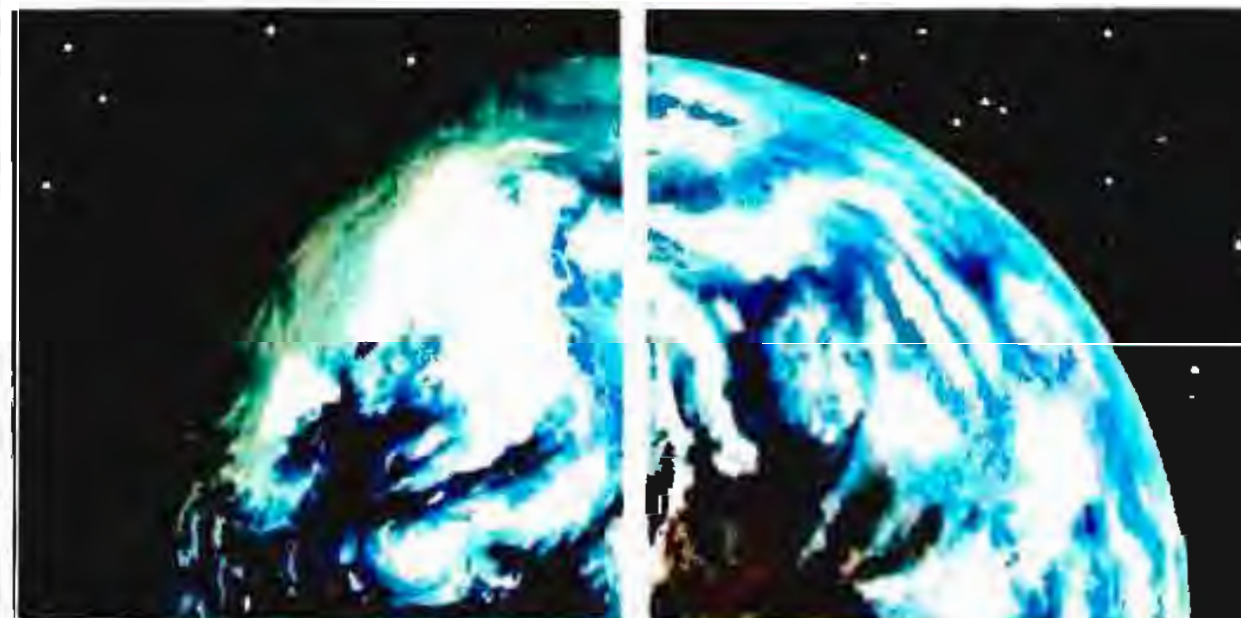
Итак, дорогой читатель, позволь теперь оставить тебя наедине с книгой и пожелать приятно и полезно провести время.



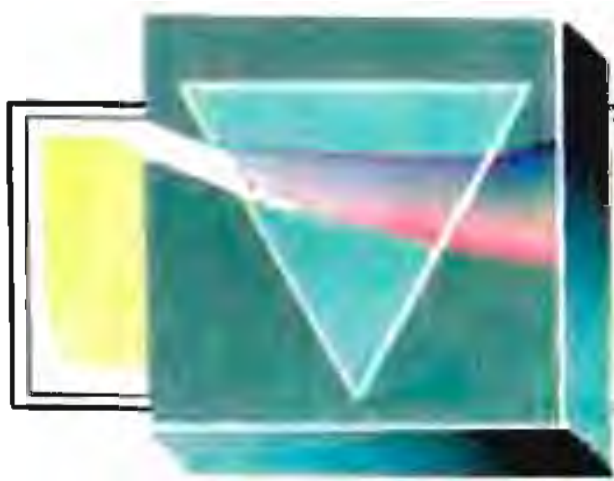


**ИМПРОВИЗАЦИЯ:  
ПРИРОДА  
И ЧЕЛОВЕК**

Мир состоит из звезд и из людей.  
*Э. Верхарн*







## ТЕМА ПЕРВАЯ

Во все века жила, затаена,  
надежда — вскрыть все таинства природы.

В. Я. БРЮСОВ

Изучение природы человеком, постижение ее законов, раскрытие тайн — все это всегда волновало не только ученых, но и поэтов. Сколько поэтических откровений посвящено ей! Сколько поставлено вопросов! — Что дает человеку изучение природы? Не разрушает ли он при этом ее красоту? Можно ли постичь все законы природы? Как надо подходить к ней, чтобы раскрыть ее тайны?

Вот весьма любопытный сонет, написанный в XIX в. В. Г. Бенедиктовым. Поэт выступает как противник какого бы то ни было изучения природы.

Повсюду прелести, везде живые краски.  
Для всех природы длань исполнена даров.  
Зачем же, к красоте бесчувственно-суров,  
Ты ищешь тайн ее и жаждешь их огласки?

Любуйся дивною, пей девственные ласки,  
Но целомудренно храни ее покров!  
Смирись пред ней! Не рви таинственных узлов  
И не срывай с нее застенчивой повязки.

Куда ни оглянись — везде иероглиф.  
На краски радуги луч света раздробив,  
Нам — что такое свет? — не высказала призма.  
Есть сердце у тебя: пади, благоговей  
И бойся исказить догадкою своей  
Сокрытое во тьме святого мистицизма!

Перед нами довольно распространенная в те времена точка зрения, будто, изучая природу, человек тем самым нарушает ее гармонию. Английские поэты XVIII в., например, обвиняли Исаака Ньютона в том, что, объяснив физику радуги, он посягнул на ее красоту.

Необходимо подчеркнуть: научное объяснение явлений природы вовсе не разрушает ее красоту и не мешает эмоциональному восприятию, а, напротив, усиливает его, делает богаче и многограннее, позволяя более ярко увидеть, выражаясь словами Ф. И. Тютчева,

...Невозмутимый строй во всем,  
Созвучье полное в природе.

Но вернемся к сонету Бенедиктова. Конечно, современному человеку чужд призыв смиренно «пасть» перед природой и не «исказить догадкой своей сокровище во тьме святого мистицизма». Не разделит он и иронии поэта по поводу призмы. Физики сегодня хорошо представляют природу света и отдают должное той роли, которую сыграли оптические эксперименты с призмами. Но дело не только в этом. Наиболее серьезное возражение вызывает, пожалуй, утверждение: «Для всех природы длань исполнена даров».

Да, мы пользуемся понятием «дары природы», однако понимаем его условность. Никогда природа не баловала человека. Она бывает суровой или мягкой, угрожающей или ласкающей, бушующей или умиротворяющей. Но никогда — ни раньше, ни теперь — человек не ждал и не ждет от нее милостей. Проливные дожди и засухи, стужа и изнуряющий зной, метели, бури, ураганы, смерчи, наводнения, обвалы, землетрясения — перечень подобных «даров природы» можно продолжить. Чтобы жить и развиваться, люди издавна учились защищаться от грозных природных сил. Они видели, что с природой шутить нельзя: разгулявшаяся стихия в одночасье может лишиться всего — урожая, жилища, самой жизни. О «неприятной силе» говорит современник Бенедиктова Е. А. Баратынский:

Завыла буря, хлябь морская  
Клокочет и ревет, и черные валы  
Идут, до неба восставая,  
Бьют, гневно пенятся, в прибрежные скалы.  
Чья неприятная сила,  
Чья своевольная рука  
Сгустила в тучи облака  
И на краю небес ненастье зародила?

В давние времена человеку было не до восхищения природой. Она внушала ему не столько благоговение, сколько опасение, страх, подчас ужас. Недаром человек обожествлял природу, населял ее в своем воображении добрыми и злыми божествами, искал защиты у добрых богов, старался умиловить злых. Именно из этих далеких веков и проникла в сонет Бенедиктова «тьма святого мистицизма».

В наше время человек уже не испытывает прежнего страха перед многими природными явлениями и не ищет у богов защиты. Освободившись от слепого страха перед силами природы, современный человек действительно может любоваться и наслаждаться ее красотами. И надо подчеркнуть, что это стало возможным благодаря тому, что че-

ловек проник в сущность природных явлений, постиг их физический механизм. Лишь освобождение от страха дает возможность в полной мере понимать законы природы и воспринимать ее внутреннюю гармонию. Любопытно, что эту мысль высказал еще в I в. до н. э. Лукреций в своей знаменитой поэме «О природе вещей»:

...Оттого только страх всех смертных объемлет, что много  
Видят явлений они на земле и на небе нередко,  
Коих причины никак усмотреть и понять не умеют,  
И полагают, что все это божьим веленьем творится.

Таким образом, никак не можем мы присоединиться к упреку, высказанному Бенедиктовым. Не бесчувственной суровостью к красоте, а еще более глубоким проникновением в нее оборачивается в действительности изучение законов природы, огласка «тайн ее». Вместе с Н. С. Гумилевым современный человек мог бы заявить:

Я не печалюсь, что с природы  
Покров, ее скрывавший, снят,  
Что древний лес, седые воды  
Не кроют фавнов и наяд.

Конечно, можно найти в таинствах и мистике некоторое очарование. Однако оно неизбежно сочетается со страхом и смирением. Проникновение во внутреннюю гармонию природных явлений возможно лишь при понимании их сущности.

Но дело не только в постижении природных красот. Изучение природы имеет еще одну важную для человека сторону. Человек, понявший причины явлений, не только освобождается от страха перед силами природы, но, более того, становится их властелином. Он может использовать и использует эти силы для своего блага, для роста своего могущества. Вспомним прекрасные слова нашего великого соотечественника М. В. Ломоносова: «Испытание природы трудно, однако приятно, полезно, свято. Чем больше таинства ее разум постигает, тем вящее увеселение чувствует сердце. Чем далее рачение наше в оной простирается, тем обильнее собирает плоды для потребностей житейских».

\* \* \*

С незапамятных времен и по сей день живет в человеке неистребимая потребность «вскрыть таинства природы». Процесс познания никогда не прекращался и не прекратится. Чем глубже проникает человеческий ум в тайны природы, тем больше он встречает загадок, тем больше возникает новых вопросов. Неудивительно поэтому, что время от времени его посещают сомнения. В отчаянии восклицает Фауст:

Не смейтесь надо мной деленьем шкал,  
Естествоиспытателя приборы!



Я, как ключи к замку, вас подбираю,  
Но у природы крепкие затворы.  
То, что она желает скрыть в тени  
Таинственного своего покрова,  
Не выманить винтами шестерни,  
Ни силами орудья никакого.

«Крепкие затворы» природы заставляют человека подчас усомниться в самой возможности познать все ее законы.

В моей душе тревожное волнение:  
Напрасно вопрошал природу взором я;  
Она молчит в глубоком усыплении —  
И грустно стало мне, что ни одно творение  
Не в силах знать о тайнах бытия.

Эти исполненные глубокой печали строки принадлежат перу И. С. Тургенева. Печаль эта великолепна; она резко контрастирует с бесстрастным призывом вообще не искать тайн природы и не «жаждать их огласки». Ей созвучна отрешенность, затаившаяся в прекрасных стихах Ф. И. Тютчева:

Природа — сфинкс. И тем она верней  
Своим искусом губит человека,  
Что, может статься, никакой от века  
Загадки нет и не было у ней.

Кто-то сказал, что изучение природы напоминает чтение сложной книги, притом не с начала, а где-то с середины. Прочитав из середины этой книги несколько страниц, человек старается отыскать в них внутреннюю логику, понять, о чем же шла речь раньше, и таким образом разгадать очередные «тайны природы». При этом, конечно, неизбежны ошибки, неточные «прочтения» отдельных мест, которые будут уточняться впоследствии — при чтении последующих страниц «книги природы». Здесь уместно напомнить прекрасную аллегорию Ш. Бодлера:

Природа — некий храм, где от живых колонн  
Обрывки смутных фраз исходят временами.  
Как в чаще символов, мы бродим в этом храме,  
И взглядом родственным глядит на смертных он.

Человек размышляющий — это всегда человек сомневающийся. Не сомневается лишь тот, кто ничего не хочет знать, ни о чем не задумывается. Существует старинная притча о мудреце и юноше. Юноша спросил мудреца: «Ты знаешь много больше меня; почему же, отвечая на вопросы, ты сомневаешься гораздо чаще, чем я?» И тогда мудрец нарисовал палкой на песке два круга: малый внутри большого. «Посмотри, — сказал он юноше, — внутри малого круга заключено все, что знаешь ты, а внутри большого все, что знаю я. Разве не ясно, что

чем больше круг, тем длиннее ограничивающая его окружность, а значит, и больше соприкосновение с областью непознанного?»

Не только поэты, но и физики сомневались временами в познаваемости природы. Однако подобные кризисы неизбежно преодолевались, завершаясь всякий раз новым качественным скачком в процессе научного познания.

\* \* \*

Как должно изучать природу? Пожалуй, наиболее остро поставил этот вопрос Иоганн Вольфганг Гёте, выступивший с резкой критикой научного метода великого Ньютона. Наверное, не все читатели знают, что выдающийся немецкий поэт был также и видным естествоиспытателем. Он интересовался, в частности, теорией возникновения цвета и даже написал книгу «Учение о цвете». Правда, в то время теория цвета уже существовала: ее создал Ньютон, выполнивший блестящий комплекс основательно продуманных оптических экспериментов. Гёте не был согласен с выводами Ньютона, касающимися разложения солнечного света на цвета радуги. Не попытавшись повторить его опыты и не вникнув в их суть, Гёте с ходу отверг ньютоновскую теорию цвета. Он писал: «Утверждения Ньютона — чудовищное предположение. Не может быть, чтобы самый прозрачный, самый чистый цвет — белый — оказался смесью цветных лучей». Как воспринимать эти нападки Гёте на Ньютона? Может быть, считать их всего лишь капризом гения?

Ответ на эти вопросы отнюдь не прост. Дело в том, что Гёте и Ньютон были разными людьми по складу мышления; они по-разному относились к тому, как надо исследовать природу. Ньютон — человек с необычайно развитым аналитическим умом истинного ученого, стремящийся каждый шаг вперед перепроверить и подкрепить опытом и расчетами. Это дотошный исследователь, требовавший от себя и от других «не смешивать домыслы с достоверностями». Приступая к оптическим исследованиям, он ставил задачу «не объяснять свойства света гипотезами, но изложить и доказать их рассуждениями и опытами».

В отличие от Ньютона, Гёте не был сторонником аналитического подхода, предполагающего разбиение предмета исследования на отдельные части. Он воспринимал мир как целое; эксперименту и вычислениям поэт предпочитал озарение и фантазию. «Как будто существует лишь то, что поддается математическому доказательству», — скептически заметил он как-то. «К природе надо подходить почтительно и неторопливо, чтобы чего-нибудь от нее добиться», — писал Гёте. Вспомним в связи с этим:

То, что она желает скрыть в тени  
Таинственного своего покрова,  
Не выманить винтами шестерни,  
Ни силами орудья никакого.

«Природа немеет на пытке», — любил говорить Гёте. Он утверждал, что исследованный Ньютоном свет — это уже не тот свет, с каким мы встречаемся в естественной обстановке, а свет, «замученный разного рода орудиями пытки — щелями, призмами, линзами». Не без сарказма Гёте призывал:

Друзья, избегайте темной комнаты,  
Где вам искажают свет  
И самым жалким образом  
Склоняются перед искаженными образами.

Конечно, Гёте был неправ, нападая на учение Ньютона. В противостоянии двух выдающихся личностей мы на стороне Ньютона. И тем не менее сегодня нельзя отмахнуться от замечаний Гёте, нельзя отнестись к ним как к какой-то причуде. Потому что независимо от намерений самого Гёте мы усматриваем в его точке зрения нечто очень важное и нужное. «В трактате Гёте о цвете, — говорил академик В. И. Вернадский, — современный мыслящий человек может найти для себя неожиданное и важное, о чем не думал Гёте». Физика XX в., а точнее, та ее ветвь, которую называют квантовой механикой, доказала, что, выполняя те или иные измерения с микрообъектами (электронами, атомами, молекулами), мы неизбежно и притом непредсказуемо искажаем то, что измеряем. Оказывается, таким образом, что, исследуя природу на уровне микроявлений, экспериментатор действительно искажает ее.

Гениальное предвосхищение грядущих проблем физики и есть то рациональное зерно в позиции Гёте, мимо которого мы не можем сегодня пройти. Конечно, критика Гёте была направлена, что называется, не по адресу. Она ни в малейшей степени не может принизить огромную роль Ньютона в развитии физики, в научном познании природы. Однако затронутые в этой критике вопросы, касающиеся взаимоотношений измерительного прибора и измеряемого объекта, необычайно интересны, к тому же сегодня весьма актуальны. И пожалуй, наиболее хорошо эти вопросы Гёте поставил не в «Учении о цвете», а в своем бессмертном «Фаусте»:

Во всем подслушать жизнь стремясь,  
Спешат явленья обездушить,  
Забыв, что если в них нарушить  
Одушевляющую связь,  
То больше нечего и слушать.

Именно против этого чрезмерно дотошного «подслушивания во всем» и выступает сегодня квантовая физика. Она утверждает, что принципиально нельзя безгранично детализировать явления во времени или объекты в пространстве — рано или поздно такое раздробление приводит к разрушению самого явления или самого объекта. Иначе говоря, нельзя беспредельно применять метод анализа из-за опасности нарушить «одушевляющую связь», после чего уже «нечего и слушать».

Поразительно, насколько точно поэты предвосхищают порой важнейшие проблемы научного исследования. В связи с этим нельзя не вспомнить удивительное стихотворение А. С. Пушкина, где каждая строка — глубокая мысль, под которой с удовольствием подпишется любой современный физик:

О сколько нам открытий чудных  
Готовят просвещенья дух  
И опыт, сын ошибок трудных,  
И гений, парадоксов друг,  
И случай, бог изобретатель.

В самом деле, именно «просвещенья дух» есть та благодатная почва, на которой зреют научные открытия. Упоминание об опыте как о «сыне ошибок трудных» современный физик связывает с тем, что метод научного познания есть метод последовательных приближений, когда постепенно, шаг за шагом, приближаемся к истине, пробуя, ошибаясь, уточняя. Подчеркивание роли парадоксов полностью согласуется с убеждением ученых, что качественные скачки в развитии физики являются следствием преодоления возникающих парадоксальных ситуаций. Такие ситуации возникают время от времени в результате новых открытий и требуют для своего объяснения радикально новых идей, которые способен выдвинуть лишь гений. И наконец, в пушкинском стихотворении, в его последней строке, мы обнаруживаем поразительное указание на созидательную роль случая. Современная наука подтвердила правильность точки зрения, согласно которой случай может быть не только отрицательным, но и положительным фактором. Достаточно указать на возникновение и бурное развитие квантовой физики, кибернетики, теории массового обслуживания, теории игр, теории случайного поиска и других современных научных направлений, в основе которых лежат идеи и методы теории вероятности.

Выходит, что поэт в коротеньком стихотворении сумел предвосхитить целый ряд выводов, к которым впоследствии пришла наука. Высказанные в поэтической форме идеи воскресли более чем через сто лет в строгой научной форме. Ну как тут не вспомнить строки, написанные в XIX в. А. Н. Майковым:

Мысль поэтическая — нет! —  
В душе мелькнув, не угасает!  
Ждет вдохновенья много лет  
И — вспыхнув вдруг — как бы в ответ  
Призыву свыше — воскресает...

Впрочем, не надо думать, что поэтические откровения всегда бьют в цель. Поэтическому языку присуща своя логика, она отличается от логики науки. Далеко не всегда поэтические образы можно связать с научными понятиями. Так, лишь поэтической аллегорией, не имеющей отношения к научным представлениям, являются образы электрона и атома в стихотворении В. Я. Брюсова:



Быть может, эти электроны —  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знанья, войны, троны  
И память сорока веков!  
Еще, быть может, каждый атом —  
Вселенная, где сто планет.  
Там все, что здесь, в объеме сжатом,  
Но также то, чего здесь нет.

Это стихотворение написано в 1922 г. В те годы находила сторонников весьма экстравагантная идея, согласно которой структура Вселенной уподоблялась вставляющимся друг в друга матрешкам. Солнечная система рассматривалась как некий гигантский «сверхатом», а атомы представлялись миниатюрными «солнечными системами». Современная физика решительно отвергла такие представления.

\* \* \*

Несмотря на различие поэтического восприятия природы и ее научного описания, между ними есть глубокая внутренняя связь. Ее существование Нильс Бор объяснял тем, что художник всегда полагается на «общечеловеческий фундамент», на котором строят гипотезы также и ученые. Искусство и наука обогащают друг друга. «Причина, почему искусство может нас обогатить,— писал Н. Бор,— заключается в его способности напоминать нам о гармониях, недостижимых для систематического анализа». Об этом же говорил А. Эйнштейн, указывая, что в научном мышлении всегда должен присутствовать «элемент поэзии». С другой стороны, научное знание в существенной степени обогащает поэтическое восприятие природы. Об этом очень хорошо сказал К. Г. Паустовский: «В любой области человеческого знания заключается бездна поэзии. Многим поэтам давно бы надо это понять. Насколько более действенной и величественной стала бы любимая поэтами тема звездного неба, если бы они хорошо знали астрономию! Одно дело — ночь над лесами с безликим и потому невыразительным небом, и совсем другое дело — та же ночь, когда поэт знает законы движения звездной сферы и когда в черной воде осенних озер отражается не просто звездное небо, а блистательный и печальный Орион. Примеров того, как самое незначительное знание открывает для нас новые области поэзии, можно привести много».

Научное познание природы и ее поэтическое восприятие идут рука об руку, взаимно обогащая друг друга. Знание физики природных явлений позволяет еще сильнее ощутить их внутреннюю гармонию и красоту; в свою очередь, ощущение этой красоты есть дополнительный и притом мощный стимул к дальнейшему исследованию. И это совершенно естественно, потому что человеческий дух не ведает резкой границы между рациональным и эмоциональным.



## ТЕМА ВТОРАЯ

**Ты открой мне, природа, объятья,  
чтоб я слился с красою твоей.**

И. А. БУНИН

Постигая законы природы и используя их в своей практической деятельности, человек становится все более могущественным. Канули в вечность времена мистического страха перед природой. Современный человек все в большей мере приобретает власть над силами природы, все шире использует эти силы, богатства природы для ускорения научно-технического прогресса. Но прогресс имеет и свою теневую сторону. Возрастает ущерб, наносимый человеком природе: загрязняется атмосфера, на поверхности морей и океанов появляется губительная для морской флоры и фауны пленка нефти, все меньше остается лесов. Более того, могущественный человек сегодня в состоянии уничтожить на Земле все живое. Поэтому в наше время, как никогда раньше, особую важность приобретает нравственная сторона отношения человека к природе.

Любовь человека к природе органически связана с чувством сопричастности ей, с пониманием того, что человек сам есть часть природы-матери. Очень хорошо говорит об этом венгерский поэт XVIII в. М. Чоконаи:

Природа милая, тебе одной я внемлю,  
Ты подарила мне и небеса и землю,  
И их помощником я буду век за веком  
Лишь оттого, что я родился человеком.

Молодой Гёте написал в 1780 г. своеобразный гимн природе. В нем он любуется ее единством и восторженно отдается в ее власть. «Природа! — пишет Гёте. — Окруженные и охваченные ею, мы не можем ни выйти из нее, ни глубже в нее проникнуть. Непрошенная, неожиданная, захватывает она нас в вихрь своей пляски и несетя с нами, пока, утомленные, мы не выпадаем из рук ее... Она вечно творит и вечно разрушает. Из простейшего вещества творит она противоположнейшие произведения, без малейшего усилия, с величайшим совершенством, и на все кладет какое-то нежное покрывало. У каждого ее создания

особенная сущность, у каждого явления отдельное понятие, а все едино».

Многие поэты подчеркивали родство природы и человека. Об этом родстве пишет, например, А. К. Толстой:

Вы, моря шумного пучины,  
Ты, неба вечного простор,  
И ты, светил блестящий хор,  
И вы, родной земли вершины,  
Поля и пестрые цветы,  
И с гор струящиеся воды —  
Отдельно взятые черты  
Всецельно дышащей природы!  
Какая вас связала нить,  
Одна другой светлей и краше?  
Каким законом объяснить  
Родство таинственное наше?

В стихотворении упоминаются «родной земли вершины». Это не случайно — ведь любовь к природе мы воспринимаем, прежде всего, как любовь к родной природе. «Любовь к родине невозможна без любви к ее природе», — писал К. Г. Паустовский. Помните, у А. С. Пушкина:

Татьяна, русская душою,  
Сама не зная почему,  
С ее холодною красою  
Любила русскую зиму.

Чувство любви к природе многогранно: любовь к Родине, восхищение красотой и, наконец, осознание того, что силы природы могут служить на благо людей. В стихотворении Н. А. Заболоцкого приводится интересная аллегория, где уставшая от «дикой свободы» стихия видит свой внутренний смысл в служении человеку:

...Когда огромный мир противоречий  
Насытится бесплодной игрой,—  
Как бы прообраз боли человеческой  
Из бездны вод встает передо мной.  
И в этот час печальная природа  
Лежит вокруг, вздыхая тяжело,  
И не мила ей дикая свобода,  
Где от добра неотделимо зло.  
И снится ей блестящий вал турбины,  
И мерный звук разумного труда,  
И пенье труб, и зарево плотины,  
И налитые током провода.

Некогда Гёте призывал подходить к природе «почтительно и неторопливо», чтобы проникнуть в ее тайны. Сегодня «почтительности»

уже недостаточно. Обладающий огромным могуществом, современный человек обязан быть особенно внимателен к природе, обязан беречь ее. Об этом страстно, с болью в сердце пишет Л. Н. Мартынов:

Слышу я Природы голос,  
Порывающийся крикнуть,  
Как и с кем она боролась,  
Чтоб из хаоса возникнуть,  
Может быть, и не во имя  
Обязательно нас с вами,  
Но чтоб стали мы живыми,  
Мыслящими существами.  
И твердит Природы голос:  
В вашей власти, в вашей власти,  
Чтобы все не расколосось  
На бессмысленные части!

Этот исполненный высокого гражданского чувства и гуманизма призыв современного поэта до удивления точно перекликается с призывом, с которым словно бы обращается к нам из своего времени П. И. Чайковский: «Могущество страны не только в одном материальном богатстве, но и в духе народа. Чем шире, свободнее эта душа, тем большего величия и силы достигает государство. А что воспитывает широту духа, как не эта удивительная природа! Ее надо беречь, как мы бережем самую жизнь человека. Потомки никогда не простят нам опустошения земли, надругательства над тем, что по праву принадлежит не только нам, но и им».

Нам, живущим во второй половине XX столетия, очень понятна эта тревога. Сегодня как никогда актуален призыв беречь нашу Землю точно так же, «как мы бережем самую жизнь человека». «Нельзя допустить,— говорил страстный борец за мир Ф. Жолио-Кюри,— чтобы люди направляли на свое собственное уничтожение те силы природы, которые они сумели открыть и покорить».



# Глава

# 1

## закат солнца

В дали зеркальной, огненно-лучистой,  
Закрывшись тучей  
И окаймив дугой ее огнистой,  
Пунцово-жгучей,  
Огромный шар, склонясь, горит над нивой  
Багрянцем роз.

*Андрей Белый*



Солнце... Уже в древнейшие времена люди понимали, что без солнечных лучей жизнь на Земле была бы невозможна. Они называли солнце «началом жизни», обожествляли его, поклонялись ему. «Ты сияешь прекрасно на склоне неба, диск живой, начало жизни,— так обращались к солнцу древние египтяне тридцать пять веков тому назад.— Ты взошел на восточном склоне неба и всю землю наполнил своей красотой. Ты прекрасен, велик, светозарен! Ты высоко над всей землей! Лучи твои объемлют все страны, до пределов того, что создано тобою». (На рисунке 1.1 виден древнеегипетский рельеф, изображающий поклонение фараона Эхнатона солнцу.) Вполне понятно, что закат солнца вызывал печаль и страх у поклонявшихся ему египтян. «Ты заходишь на западном склоне неба — и земля во мраке, наподобие застигнутого смертью». Солнечный закат и умирание — эта параллель часто проводилась и в последующие века; к ней не раз обращались поэты. Вспомним у В. Я. Брюсова:

Еще раз умер, утром вновь воскрес;  
Бред ночи отошел, забыт, отброшен...

Перемещение солнца по небосводу — от восхода до заката — порождало в давние времена мысль о боге солнца, который едет по небу на некоей колеснице. Такое представление было, например, у древних хеттов:

Объезжаешь ты на колеснице  
Света стороны четыре...

В знаменитой «Одиссее» Гомера встречается бог солнца Гелиос, который днем объезжает небо.

Проходили века — и буквальное представление о «солнечной

колеснице» постепенно превращалось в поэтическую аллегория. В XIV в. Франческо Петрарка писал:

Вот колесницу в море золотую  
Купает солнце. Сумрак надо мной.  
Со звездами, и небом, и луной  
Тревожную и злую ночь я чую.

В дальнейшем эта аллегория встречается все реже. Обращаясь к закату солнца, поэты концентрируют внимание на чисто эмоциональной стороне. Солнечный закат вызывает у них тревогу, может восприниматься даже как некая угроза. Так, Я. Райнис пишет:

Багровый светится закат,  
И тучи низкие лежат,  
Как крепостные бастионы,  
Грозя светило взять в полон;  
А выше бледен небосклон,  
И угасают лес, поля и склоны.

Но чаще солнечный закат навевает тихую грусть, печаль, граничащую с умиротворением. Об этом хорошо пишет И. А. Бунин:

Солнце уходит в далекие страны,  
В сумрак ночной, за леса и моря.  
В темных лесах засинели туманы,  
В море горит золотая заря.  
День угасает. Дневные заботы  
С тихой зарей забывает земля,  
Пахарь усталый вернулся с работы,  
В теплой росе засыпают поля.

Приведем также замечательные строки, принадлежащие перу И. С. Тургенева:

Садится солнце. Воздух дивно тих,  
И вздрагивает ветер, словно сонный.  
Окошки темных домиков на миг  
Зарделись и погасли. Отягченный  
Росой внезапной, стынет луг. Затих  
Весь необъятный мир. И благовонный,  
Прозрачный пар понесся в вышину...  
И небо ждет холодную луну.

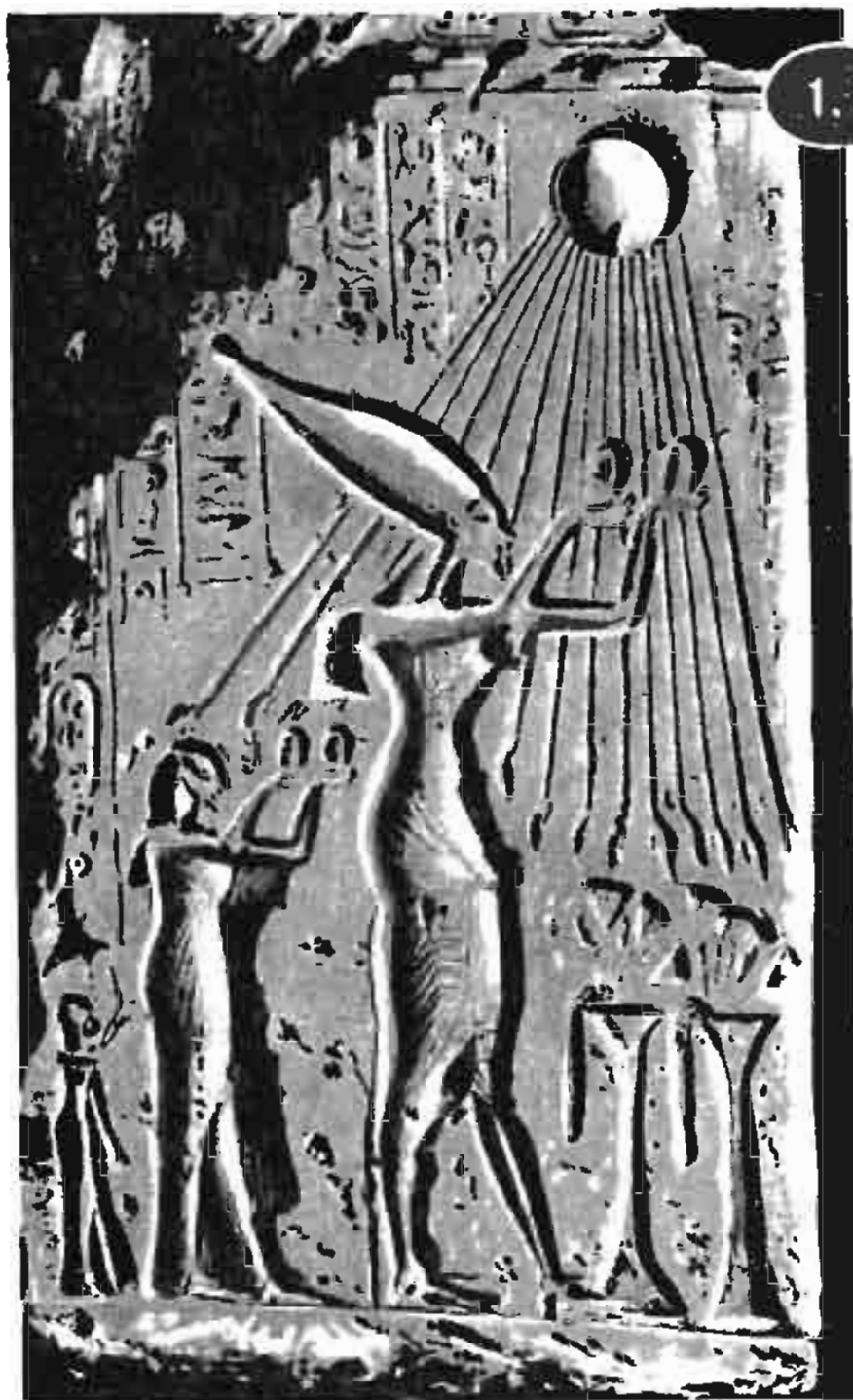
**Удивительное в солнечных закатах.** Наблюдаемая картина заката солнца зависит всякий раз от состояния атмосферы и в существенной мере определяется типом и формой облаков, подсвечиваемых лучами заходящего солнца. Поэтому один закат так не похож на другой. И всегда солнечные закаты необычайно красивы.

Что удивительного может подметить в закате солнца внимательный наблюдатель? Будем полагать, что закат наблюдается при ясном, безоблачном небе, линия горизонта прямая — солнце садится в море.

Прежде всего бросается в глаза *красноватый* цвет заходящего солнца и такой же цвет неба вблизи него. Часто этот цвет оказывается нежно-красным, почти розовым, но иногда солнечный диск выглядит ярко-красным и даже багровым. Согласно народным приметам, если заря на закате или восходе солнца золотистая, светло-розовая, то будет ясная погода. Красное заходящее солнце предвещает ветреную погоду.

Посмотрев на заходящее за линию горизонта солнце сквозь темноватое или слегка закопченное стекло, нетрудно заметить, что цвет солнечного диска имеет разные оттенки в разных точках. У самой линии горизонта он краснее, а в верхней части диска переходит постепенно в цвет более светлых тонов. Иногда изменение цвета по поверхности солнечного диска можно видеть и без всяких стекол.

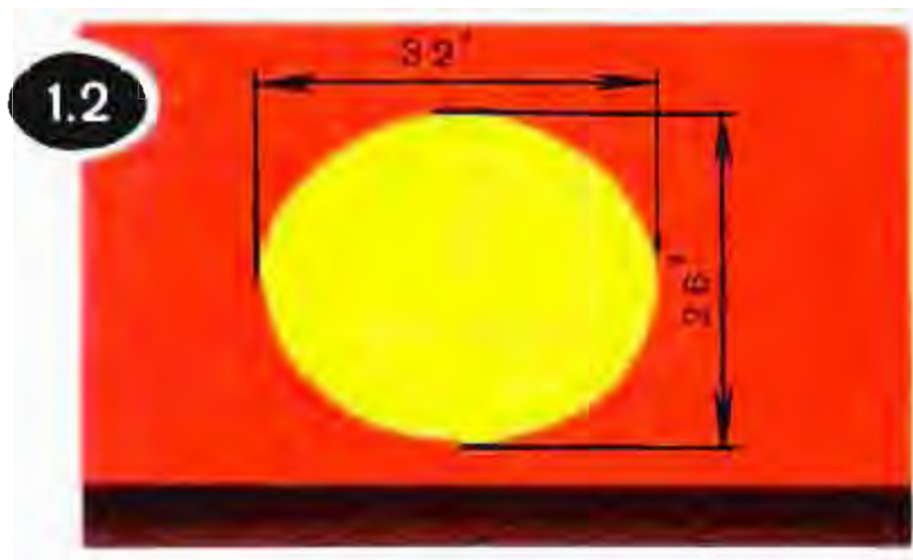
Внимательный наблюдатель обратит внимание на некоторую *сплюснутость* заходящего солнца по вертикали (рис. 1.2). В момент, когда нижний край солнца касается линии горизонта, поперечник



солнечного диска в вертикальном направлении виден земному наблюдателю под углом  $26'$ , горизонтальный же поперечник виден под углом  $32'$ .

Отдельного разговора заслуживает наблюдаемый иногда при закате солнца *зеленый луч*. Яркий зеленый свет вспыхивает на несколько секунд, когда почти весь солнечный диск уже скрылся за горизонтом. Это впечатляющее зрелище можно наблюдать в такие вечера, когда солнце вплоть до самого заката ярко светит и почти не изменяет своего цвета, оставаясь желтым или, в крайнем случае, желтовато-оранжевым. Советский астроном Г. А. Тихов много лет изучал удивительное





явление зеленого луча. «Если солнце при закате красного цвета и на него легко смотреть, то можно с уверенностью утверждать — зеленого луча не будет,— пишет Г. А. Тихов.— Напротив, если солнце не очень изменило свой бело-желтый цвет и садится ярким, то можно предполагать, что зеленый луч появится. Важно, чтобы горизонт имел отчетливую линию, без всяких неровностей: ближнего леса, строений и т. п. Этим условиям легче всего достичь на море, вот почему зеленый луч хорошо известен людям моря».

Приведем характерное описание зеленого луча, данное одним из очевидцев: «Я смотрел на заходящее солнце. Вдруг, в тот момент, когда уже почти весь диск опустился в океан, оставшаяся его часть вместо желто-красной стала зеленой, испустила во все стороны зеленые, как трава, лучи и исчезла». В романе Жюль Верна «Зеленый луч» описываются приключения путешественников, занятых поисками зеленого луча. «...Если посчастливится видеть это явление,— читаем мы в романе,— то обратите внимание на то, что последний луч солнца оказывается не красным, а зеленым. Да, да, он будет иметь чудесный зеленый цвет, такой зеленый, какой не

сможет создать ни один художник на своей палитре. Подобный зеленый цвет нельзя найти в растительном мире, несмотря на все множество и разнообразие его цветов и оттенков, его не встретить и в самых ярких морях. Если есть зеленый цвет в раю, то он не может быть иным, ибо это настоящий цвет надежды!» Жители некоторых островов называют зеленый луч «живым светом».

Отметим еще одно удивительное явление, которое можно наблюдать при закате. Иногда солнце кажется заходящим не за четко просматриваемую линию горизонта, а за некоторую невидимую линию, находящуюся над горизонтом (рис. 1.3,а). Интересно, что это явление наблюдается в отсутствие какой-либо облачности на горизонте. Если быстро подняться на вершину холма (на верхний этаж здания, на верхнюю палубу большого теплохода), то можно наблюдать еще более странную картину: теперь солнце заходит за линию горизонта, но при этом солнечный диск оказывается как бы перерезанным горизонтальной «слепой полосой». Солнце постепенно опускается все ниже, а положение «слепой полосы» по отношению к линии горизонта сохраняется неизменным (рис. 1.3,б).

**Красный цвет заходящего солнца и голубой цвет дневного неба.** Почему небо имеет голубой цвет? Почему заходящее солнце становится красным? Оказывается, в обоих случаях причина одна — *рассеяние солнечного света в земной атмосфере.*

Это было понято не сразу. Для объяснения голубизны небосвода выдвигались в свое время различ-



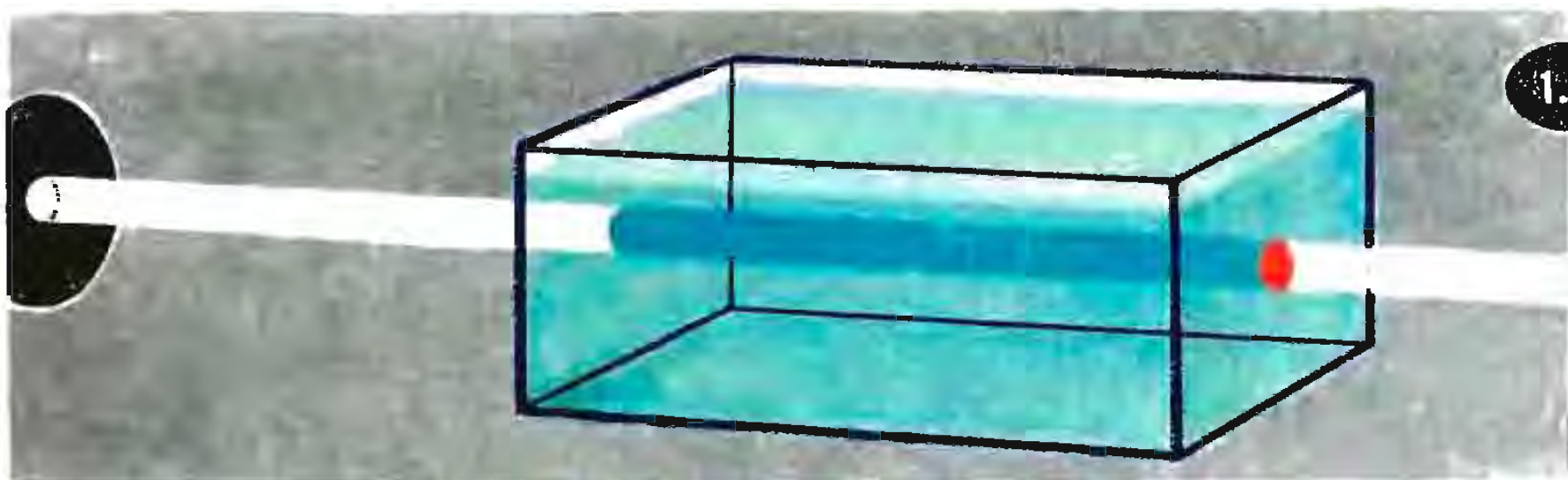
ные гипотезы. Пытались объяснить голубой цвет неба как результат смешивания в определенных пропорциях «света и тьмы». Предполагали, что частицы воздуха окрашены в голубой цвет. Допускали, что голубое свечение неба есть свечение люминесценции частиц воздуха, возникающее при облучении этих частиц солнечным светом. Сегодня все эти объяснения рассматриваются как несостоятельные.

Их несостоятельность была доказана уже более ста лет тому назад, в 1869 г., когда Дж. Тиндаль выполнил свой знаменитый опыт. Этот опыт совсем нетрудно воспроизвести в школьном кабинете физики. Возьмем аквариум прямоугольной формы, наполним его водой и направим на стенку аквариума слабо расходящийся узкий пучок света от диапроектора. Чтобы пучок был достаточно узким, вставим в диапроектор на место слайда кусочек плотной черной бумаги с круглым отверстием в центре диаметром 2...3 мм. Опыт должен проводиться в за-

темненном помещении. Для усиления рассеяния светового пучка при его прохождении через аквариум добавим в воду немного молока и тщательно размешаем жидкость. Содержащиеся в молоке частички жира не растворяются в воде; они находятся во взвешенном состоянии и способствуют рассеянию света. Можно наблюдать голубоватый оттенок у рассеянного света. Свет же, прошедший сквозь аквариум, приобретает красноватый оттенок. Итак, если смотреть на световой пучок в аквариуме сбоку, он представляется голубоватым, а с выходного торца — красноватым (рис. 1.4). Это можно объяснить, если предположить, что *синий свет рассеивается сильнее, чем красный*; при прохождении белого светового пучка через рассеивающую среду из него рассеивается в основном «синий компонент», поэтому в выходящем из среды пучке начинает преобладать «красный компонент».

В 1871 г. Дж. Стретт (Рэлей) именно так и объяснил результаты





опытов Тиндаля. Он построил теорию рассеяния световых волн на частицах, размеры которых много меньше длины световой волны. Установленный Рэлеем закон утверждает: *интенсивность рассеянного света пропорциональна четвертой степени частоты света или, иначе говоря, обратно пропорциональна четвертой степени длины световой волны.*

Если применить закон Рэля к рассеянию солнечного света в земной атмосфере, то нетрудно объяснить и голубой цвет дневного неба, и красный цвет солнца при восходе и закате. Поскольку интенсивнее рассеиваются световые волны с более высокими частотами, то, следовательно, спектр рассеянного света будет сдвинут в сторону более высоких частот, а спектр света, остающегося в пучке (после того как испытавший рассеяние свет покинул пучок), будет сдвинут, естественно, в обратную сторону — к более низким частотам. В первом случае белый цвет становится голубым, а во втором — красноватым. Глядя на дневное небо, наблюдатель воспринимает свет, *рассеянный в атмосфере*; согласно закону Рэля, спектр этого света сдвинут в сторону более высоких частот, отсюда голубой цвет неба. Глядя на солнце, наблюдатель воспринимает

свет, прошедший через атмосферу без *рассеяния*; спектр этого света сдвинут к низким частотам. Чем ближе солнце к линии горизонта, тем более длинный путь проходят в атмосфере световые лучи, прежде чем попадут к наблюдателю, тем в большей мере сдвигается их спектр. В результате заходящее (восходящее) солнце мы видим в красных тонах. Вполне понятно также, почему нижняя часть заходящего солнечного диска выглядит более красной, нежели его верхняя часть.

Итак, основную роль играет зависимость интенсивности рассеяния света от его частоты. Но какова природа тех центров, на которых рассеиваются световые волны, проходя через атмосферу? Первоначально думали, что роль таких центров играют мельчайшие пылинки и капельки воды, находящиеся в воздухе. Однако такое предположение не объясняло чудесного голубого цвета неба в высокогорных районах, где воздух очень чистый и сухой.

В 1899 г. Рэлей выдвинул гипотезу, по которой центрами, рассеивающими свет, являются сами молекулы воздуха.

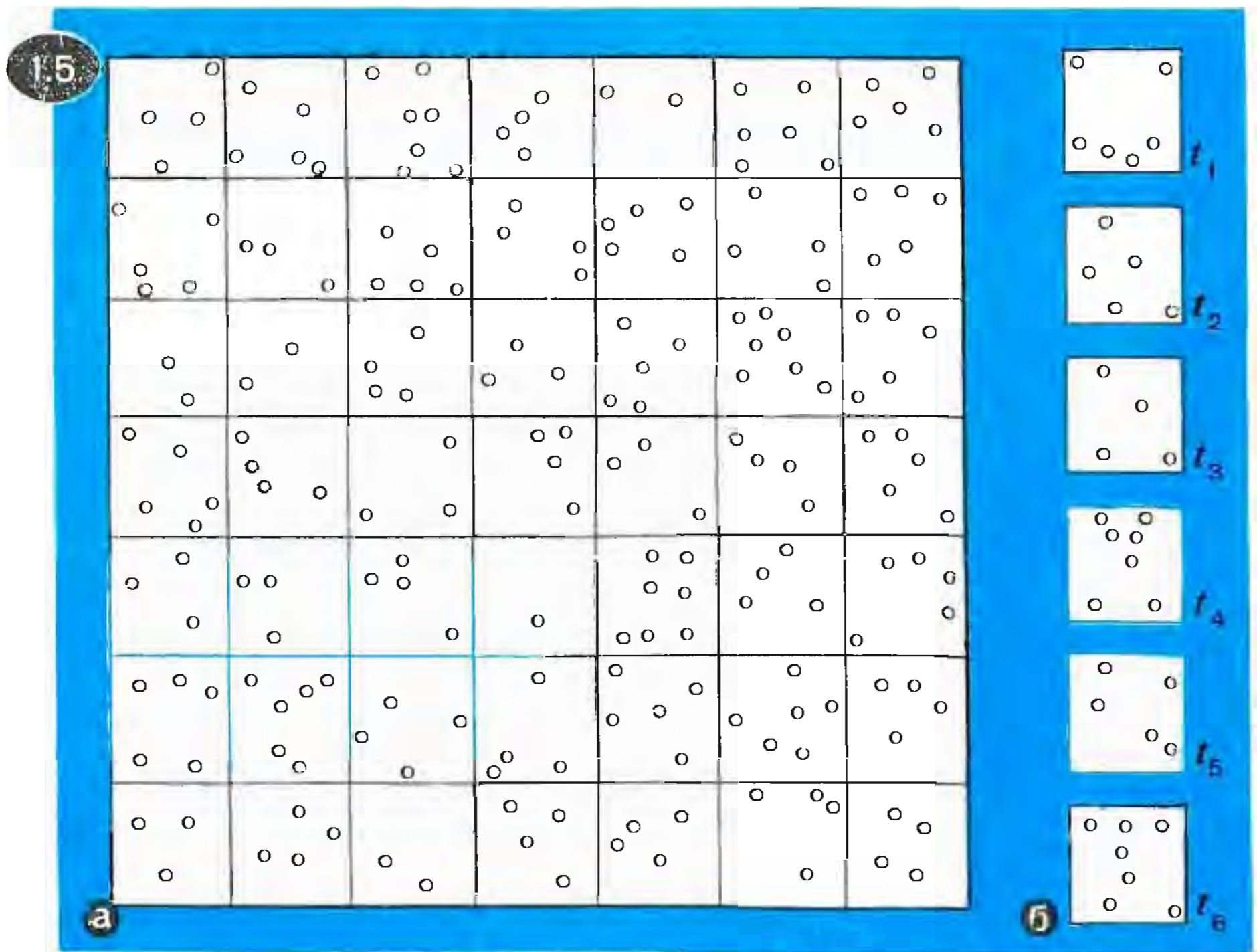
Позднее, уже в первой половине XX столетия, благодаря работам М. Смолуховского, А. Эйнштейна и Л. И. Мандельштама,



было установлено, что в действительности важно рассеяние света не на самих молекулах воздуха, а на несколько необычных объектах, возникающих вследствие хаотического теплового движения молекул,— на *флуктуациях плотности воздуха*, т. е. случайно возникающих микроскопических сгущениях и разрежениях воздуха.

Остановимся на этом подробнее. Мысленно разобьем воздушное пространство на одинаковые ячейки. Они должны быть достаточно мелкими, т. е. линейные размеры ячейки должны быть много меньше длины волны света (хотя и существенно больше диаметра молекулы). Выберем произвольно момент времени и мысленно

сфотографируем картину распределения молекул воздуха в пространстве. Она показана на рисунке 1.5,а. Мы видим, что некоторые ячейки оказываются почти пустыми, а некоторые, напротив, будут относительно плотно заселены молекулами. Это есть следствие хаотического теплового движения молекул воздуха. В результате плотность атмосферного воздуха будет случайным образом изменяться (флуктуировать) от одной ячейки к другой. Ясно, что в иной момент времени уже иные ячейки окажутся более (менее) плотно заселенными, но по-прежнему плотность воздуха будет случайно изменяться от одной точки пространства к другой.



Можно пояснить понятие флуктуаций плотности воздуха и другим образом. Сосредоточим внимание не на каком-либо определенном моменте времени, а на некоторой произвольно выбранной ячейке пространства. С течением времени число молекул в данной ячейке будет флуктуировать примерно так, как это показано на рисунке 1.5,б, где рассмотрены несколько разных моментов времени. Иначе говоря, будет случайно изменяться плотность воздуха в данной точке пространства с течением времени.

Таким образом, картина флуктуаций плотности воздуха определяется случайными изменениями числа молекул как от одной ячейки пространства к другой, так и в любой ячейке от одного момента времени к другому. Вот эти локальные неоднородности плотности воздуха и являются теми рассеивающими центрами, которые обуславливают голубой цвет неба и красный цвет заходящего солнца. Конечно, наличие в воздухе мелкой пыли и водяных капелек, приводя к дополнительному рассеянию света, в какой-то степени влияет на цвет неба и заката. Однако первопричина заключается в рассеянии света на флуктуациях плотности воздуха. Существенно, что характер этих флуктуаций в значительной мере зависит от состояния атмосферы: температуры различных слоев воздуха, характера и силы ветра. Именно поэтому в ясную тихую погоду закат золотистый, а в ветреную — багровый.

**Рефракция света в атмосфере.** Для объяснения многих интересных явлений, наблюдаемых при закате

солнца, необходимо учитывать *рефракцию света в атмосфере*. Под этим термином понимают искривление световых лучей при прохождении в атмосфере, вызванное *оптической неоднородностью* атмосферного воздуха. Здесь речь идет не о тех локальных неоднородностях, которые связаны с флуктуациями плотности воздуха, а об изменениях плотности воздуха (значит, и показателя преломления) с высотой или при нагревании и охлаждении.

Напомним, что *показатель преломления среды*

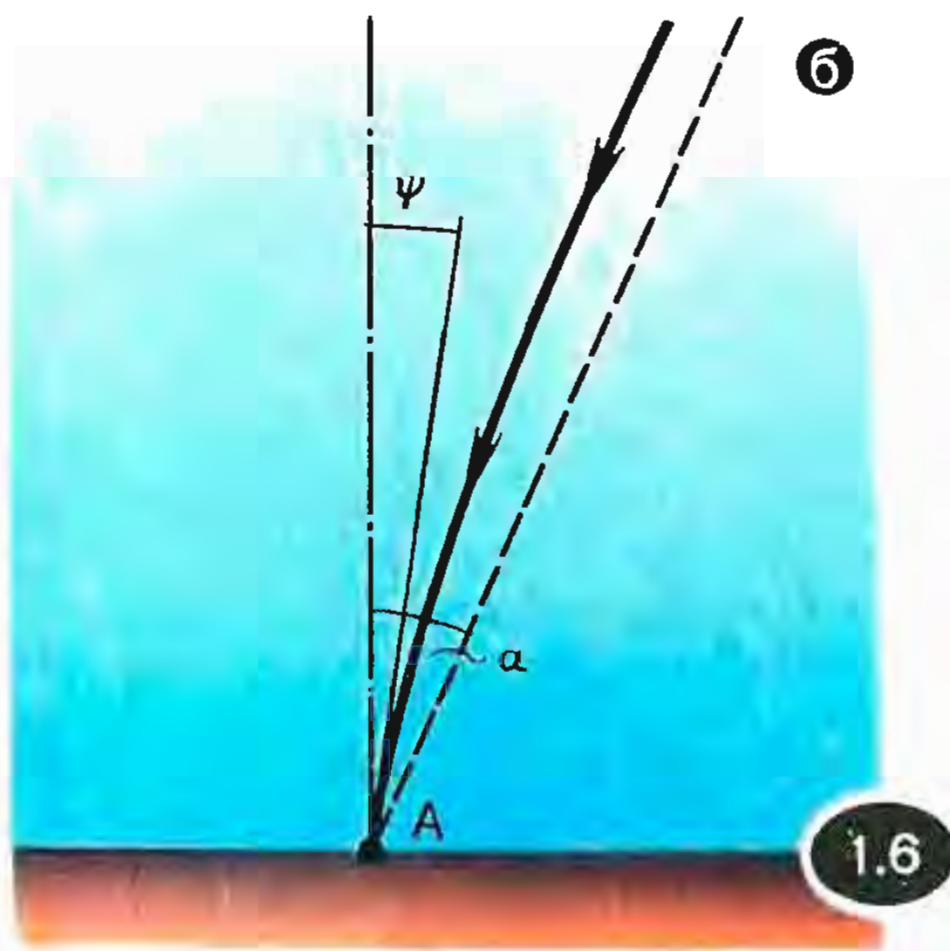
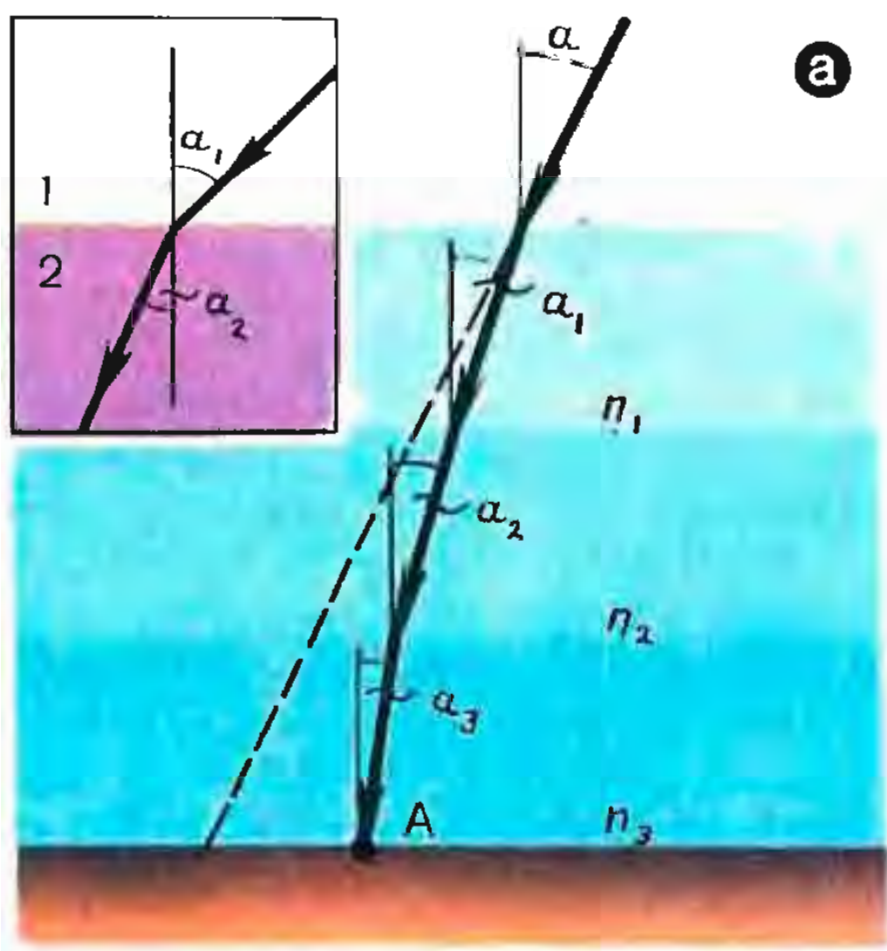
$$n=c/v,$$

где  $c$  — скорость света в вакууме, а  $v$  — скорость света в данной среде; скорость  $v$  всегда меньше скорости  $c$  и зависит, в частности, от плотности среды. Чем плотнее воздух, тем меньше  $v$  и, значит, тем больше показатель преломления воздуха. Плотность воздуха понижается при переходе от нижних слоев атмосферы к верхним. Уменьшается она также с нагреванием и зависит от ветра.

Различают *астрономическую* и *земную рефракцию*. В первом случае рассматривается искривление световых лучей, приходящих к земному наблюдателю от небесных тел (Солнца, Луны, звезд, искусственных спутников), а во втором — от земных объектов. В обоих случаях вследствие искривления лучей наблюдатель видит объект не в том направлении, какое соответствует действительности; объект может представляться искаженным. Возможно наблюдение объекта даже тогда, когда тот фактически находится за линией горизонта.

Представим на минуту, что атмосфера состоит из оптически однородных горизонтальных слоев;





показатель преломления скачком меняется от слоя к слою, постепенно возрастая при переходе от верхних слоев к нижним. Такая ситуация показана на рисунке 1.6,а, где атмосфера условно представлена в виде трех слоев с показателями преломления  $n_1, n_2, n_3$ , причем  $n_1 < n_2 < n_3$ ; за верхней границей атмосферы показатель преломления равен единице. Предварительно напомним, что при переходе луча из среды 1 с показателем преломления  $n_1$  в среду 2 с показателем преломления  $n_2$  выполняется соотношение:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

(см. ход луча в верхнем левом углу рисунка). Это есть известный закон преломления света на границе двух сред. Применяя этот закон к нашей слоистой атмосфере, приходим к выводу, что траектория светового луча, приходящего к земному наблюдателю от некоторого заатмосферного объекта, должна иметь вид ломаной линии (рис. 1.6,а), причем

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_1} = n_1; \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_3} = \frac{n_3}{n_2}.$$

В действительности плотность атмосферы, а следовательно, и ее показатель преломления изменяются с высотой не скачками, а непрерывно. Поэтому световой луч представляет собой не ломаную, а кривую линию (рис. 1.6,б). Предположим, что изображенный на данном рисунке луч приходит к наблюдателю от какого-то небесного объекта. Если бы не было рефракции света в атмосфере, то этот объект был бы виден наблюдателю под углом  $\alpha$  (угол  $\alpha$  рассматривается по отношению к вертикали; его называют зенитным расстоянием объекта). Из-за рефракции наблюдатель видит объект не под углом  $\alpha$ , а под углом  $\psi$ . Так как  $\psi < \alpha$ , то объект представляется наблюдателю выше над горизонтом, чем это есть на самом деле; рефракция как бы *приподнимает* объект над горизонтом. Разность

$$\Omega = \alpha - \psi$$

называют *углом рефракции*.

**Небольшой исторический экскурс.** Во II в. н. э. Птолемей справедливо указывал, что рефракция должна отсутствовать для лучей, идущих от объекта, находящегося в зените, и должна постепенно увеличиваться по мере того, как объект приближается к линии горизонта. Рефракцией света в атмосфере интересовался видный арабский ученый XI в. Ибн Аль-Хайтан, известный на Западе под именем Альхазена. Он отмечал, что вследствие рефракции света длительность дневной части суток немного возрастает.

В начале XVII в. Иоганн Кеплер в труде «Дополнение к Вителлию» изложил свою теорию рефракции света, упрощенно предполагая, что атмосфера представляет собой однородный слой воздуха, имеющий на всех высотах одинаковую плотность. Не следует удивляться такому предположению, ведь во времена Кеплера воздух считался невесомым. Пройдет несколько десятилетий, прежде чем Торричелли докажет, что давление воздуха убывает с высотой.

Исключительно большой вклад в развитие теории астрономической рефракции света внес Исаак Ньютон. К сожалению, он не включил эти исследования ни в «Лекции по оптике», ни в «Оптику». Сегодня мы можем познакомиться с ними лишь благодаря счастливой случайности. Дело в том, что более чем через сто лет после смерти великого ученого, в 1832 г. на чердаке одного из домов Лондона были обнаружены 27 писем Ньютона к Флемстиду. Флемстид занимался астрономическими наблюдениями на обсерватории в Гринвиче; он имел звание королевского астронома, дарованное

ему королем Карлом II. Переписка между Ньютоном и Флемстидом началась в 1680 г. по поводу наблюдавшейся в том году большой кометы. Эта переписка усилилась в начале 90-х годов, когда Ньютон разрабатывал теорию движения Луны и использовал результаты астрономических наблюдений.

И. Ньютон изложил в письмах к Флемстиду некоторые теоремы, касающиеся теории рефракции света в атмосфере. Полагая вначале, что плотность воздуха убывает с высотой по линейному закону, он рассчитал свою первую таблицу рефракции. Обнаружив расхождение между результатами расчета и данными наблюдений Флемстида, Ньютон начал затем работать над новой таблицей. При этом он отказался от предположения о линейном убывании плотности воздуха с высотой и стал полагать, что плотность уменьшается пропорционально уменьшению давления. Ученый писал в связи с этим, что «плотность воздуха в земной атмосфере пропорциональна весу всего накрывающего воздуха».

Таким образом, Ньютон фактически пришел к правильному выводу о том, что плотность атмосферного воздуха уменьшается с высотой по экспоненциальному закону. В результате ему удалось рассчитать весьма точную таблицу рефракции, содержащую углы рефракции для разных значений зенитного расстояния.

Переписку Ньютона с Флемстидом издало в 1835 г. английское Адмиралтейство. Но в продажу эта книга не поступила; ее разослали отдельным научным учреждениям и известным астрономам. В 30-х годах нашего столе-

тия эту книгу приобрел у лондонского букиниста известный советский ученый в области кораблестроения А. Н. Крылов. Академик Крылов хорошо знал труды Ньютона; он сделал превосходный перевод на русский язык Ньютоновых «Математических начал натуральной философии». Используя письма Ньютона к Флемстиду и применяя только те математические средства, которыми располагал в свое время Ньютон, Крылов воскресил доказательства и выводы великого ученого и изложил их в работе «Теория рефракции Ньютона», вышедшей в свет в 1935 г. В заключительной части этой работы А. Н. Крылов писал: «Во все эти подробности я вошел, чтобы показать, насколько полна и обща та теория астрономической рефракции, которую Ньютон создал в конце 1694 и начале 1695 г., но которую он, к сожалению, не опубликовал. Если развить Ньютонову теорию теми элементарными методами анализа, которыми Ньютон обладал, и сравнить ее с современными теориями, то сразу можно будет заметить, сколь простое и естественное получается изложение и как мало к нему, по существу, за 240 лет прибавлено».

**Сплюснутость заходящего солнечного диска.** Когда солнце стоит высоко над горизонтом, его диск имеет форму круга; земной наблюдатель видит этот круг под углом  $32'$ . Заходящий солнечный диск, как мы уже отмечали, сплюснут по вертикали; его вертикальный поперечник виден под углом  $26'$ , что на  $6'$  меньше угловых размеров горизонтального поперечника. В этом «повинна» ре-

фракция световых лучей в атмосфере.

Согласно современным данным, максимальный угол рефракции (угол рефракции при  $\psi=90^\circ$ ) составляет  $35'$ . Когда мы, любясь на морском берегу солнечным закатом, видим, как нижний край светила коснулся линии горизонта, мы обычно не сознаем, что в действительности этот край находится на  $35'$  ниже линии горизонта. А значит, и весь солнечный диск уже за горизонтом.

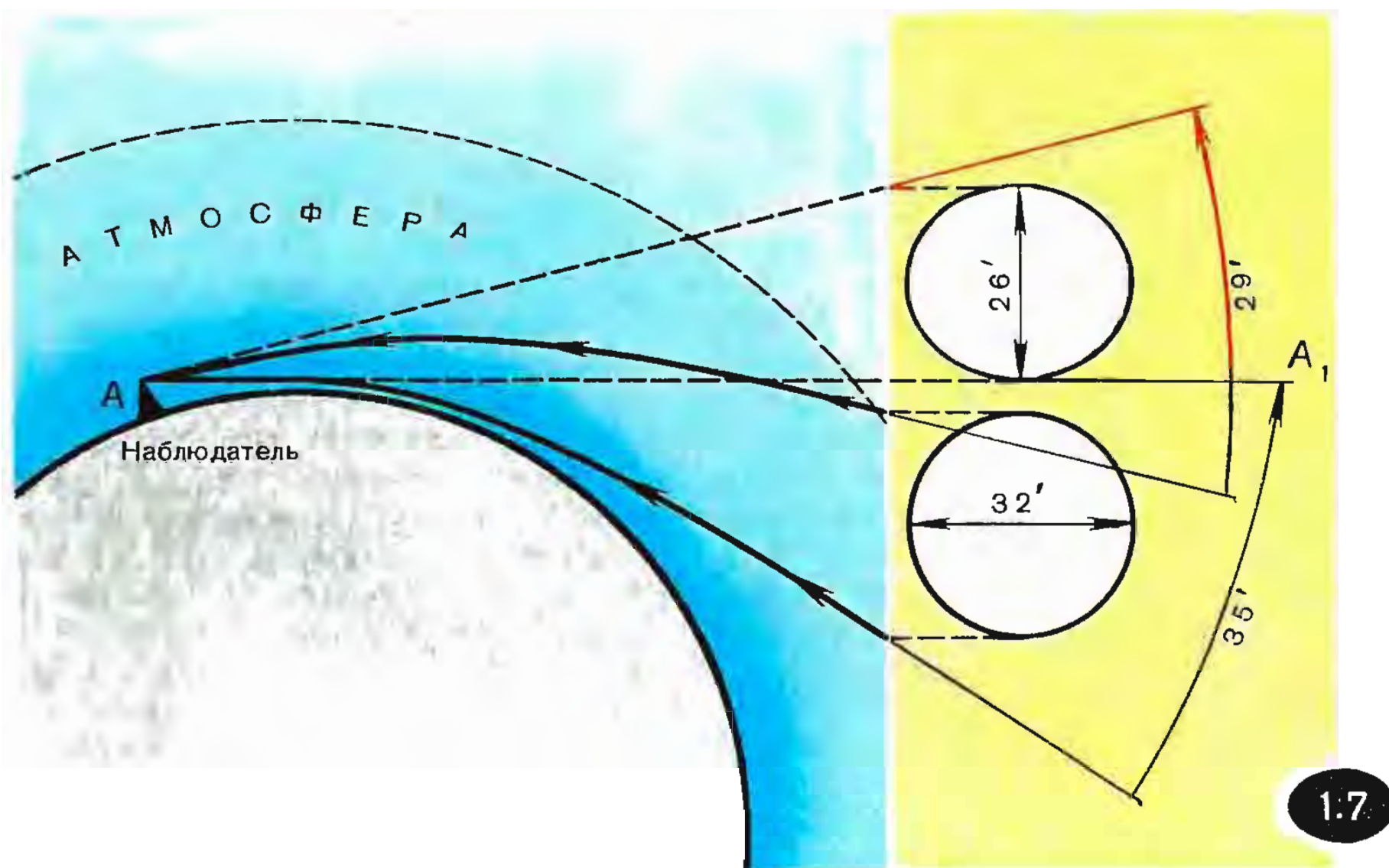
Интересно, что верхний край солнечного диска приподнимается вследствие рефракции света меньше, чем нижний, т. е. не на  $35'$ , а только на  $29'$ . Ведь рефракция уменьшается по мере уменьшения зенитного расстояния. Именно поэтому заходящее солнце и кажется наблюдателю сплюснутым по вертикали.

Сказанное поясняет рисунок 1.7. Здесь  $AA_1$  — направление от наблюдателя к линии горизонта. Стрелками показан ход лучей в атмосфере от краев солнечного диска к наблюдателю. Искривление лучей в атмосферном воздухе приводит к тому, что наблюдатель видит солнечный диск в пределах угла, образуемого на рисунке штриховыми прямыми, т. е. видит диск, слегка сплюснутый в вертикальном направлении.

**Зеленый луч.** Возникновение зеленого луча можно объяснить, если принять во внимание изменение показателя преломления с частотой света.

Обычно показатель преломления растет с увеличением частоты. Лучи с более высокой частотой преломляются сильнее. Значит, сине-зеленые лучи претерпевают





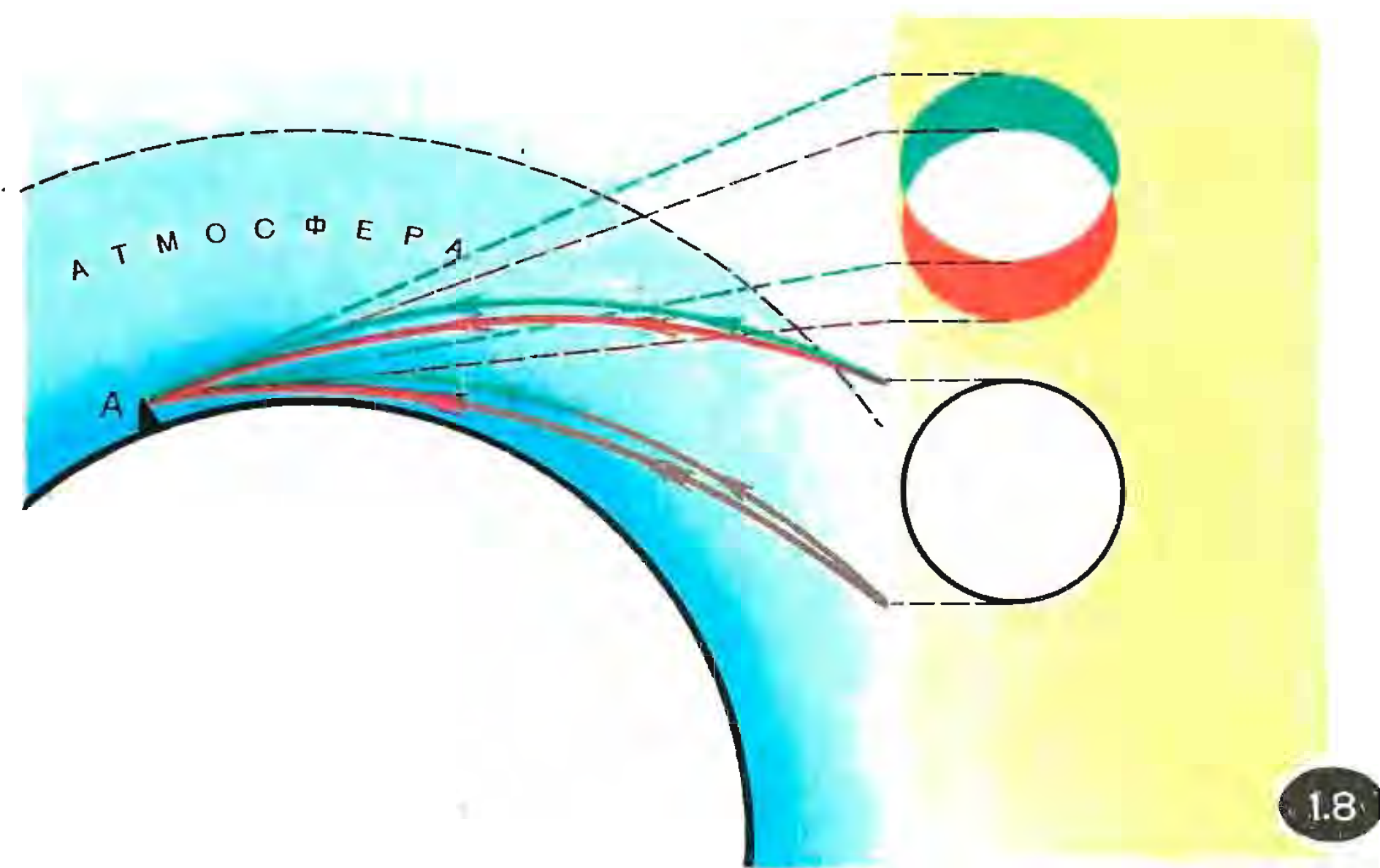
более сильную рефракцию по сравнению с красными лучами (рис. 1.8).

Допустим, что рефракция света в атмосфере есть, а вот рассеяния света нет. В этом случае верхний и нижний края солнечного диска вблизи линии горизонта должны были бы быть окрашенными в цвета радуги. Пусть для простоты в спектре солнечного света имеются всего два цвета — зеленый и красный; «белый» солнечный диск можно рассматривать в данном случае в виде наложенных друг на друга зеленого и красного дисков. Рефракция света в атмосфере приподнимает над горизонтом зеленый диск в большей степени, чем красный. Поэтому наблюдатель должен был бы видеть заходящее солнце таким, каким оно показано на рисунке 1.8 (или, по крайней мере, как показано слева вверху на с. 17). Верхний край солнечного

диска был бы зеленым, а нижний красным; в центральной же части диска наблюдалось бы смешение цветов, т. е. наблюдался бы белый цвет.

В действительности же нельзя не учитывать рассеяние света в атмосфере. Как мы уже знаем, оно приводит к тому, что из светового пучка, идущего от солнца, выбывают более эффективно лучи с более высокой частотой. Так что зеленой каемки сверху диска мы не увидим, а весь диск будет выглядеть не белым, а красноватым. Если, однако, почти весь солнечный диск ушел за горизонт, остался лишь самый верхний его краешек, и при этом стоит ясная и тихая погода, воздух чист (так что рассеяние света минимально), то в этом случае мы можем увидеть ярко-зеленый край солнца вместе с россыпью ярких зеленых лучей (см. внизу на с. 17).

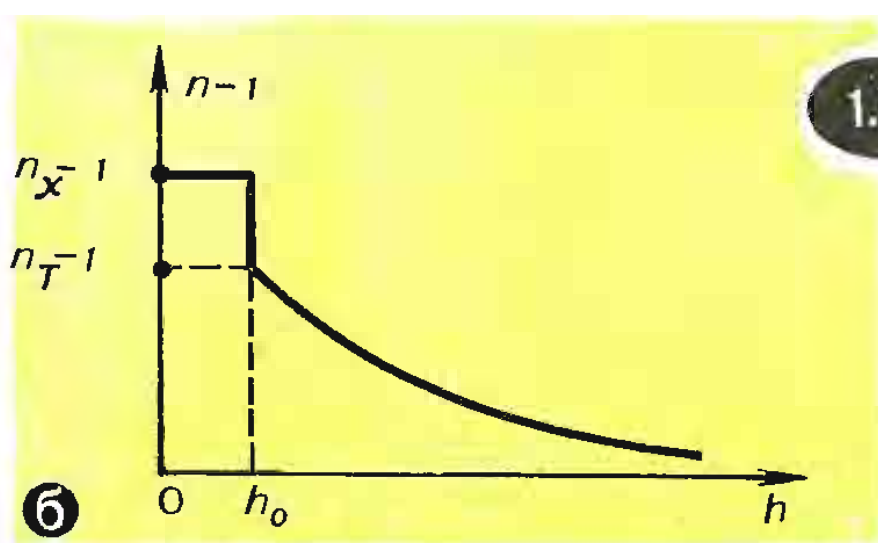
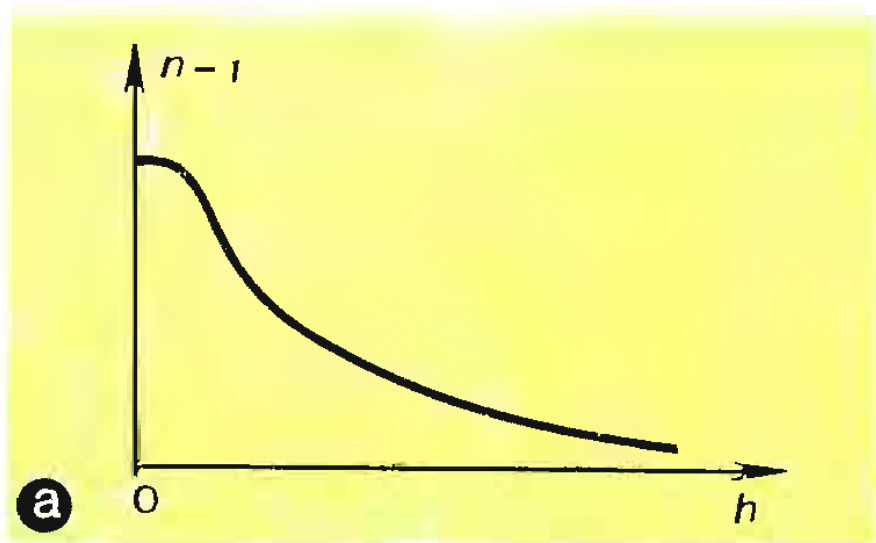




1.8

**Объяснение появления «слепой полосы».** Картина заката, изображенная на рисунке 1.3, наблюдается, если воздух около земной поверхности оказывается достаточно холодным, а выше имеется слой относительно теплого воздуха. В этом случае показатель преломления воздуха, изменяется с высотой примерно так, как показано на рисунке 1.9,а. Переход от нижнего холодного слоя воздуха к лежащему над ним теплему может приводить к довольно резко-

му спаду показателя преломления. Для простоты примем, что этот спад совершается скачком, поэтому между холодным и теплым слоями существует четко выраженная поверхность раздела, находящаяся на некоторой высоте  $h_0$  над земной поверхностью. Упомянутый скачок хорошо виден на рисунке 1.9,б, где через  $n_x$  обозначен показатель преломления воздуха в холодном слое, а через  $n_T$  — в теплом слое вблизи границы с холодным.



1.9

Показатель преломления воздуха очень мало отличается от единицы, поэтому для большей наглядности по вертикальной оси на этом рисунке отложены значения не самого показателя преломления, а его превышения над единицей, т. е. разность  $n-1$ .

Картина изменения показателя преломления, представленная на рисунке 1.9,б, использована при построении хода лучей на рисунке 1.10, где изображены часть поверхности земного шара и примыкающий к ней слой холодного воздуха толщиной  $h_0$ . (Масштабы на рисунке по необходимости искажены; в действительности высота  $h_0$  примерно в 100 тыс. раз меньше радиуса земного шара  $R$ .) Наблюдатель находится в точке А. Световой луч СА, приходящий к нему от небесного объекта, испытывает преломление в точке С на границе раздела холодного и теплого воздуха; при этом

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_{\text{х}}}{n_{\text{т}}} = 1 + \mu, \quad (1.1)$$

где

$$\mu = \frac{n_{\text{х}} - n_{\text{т}}}{n_{\text{т}}} \quad (\mu \ll 1).$$

Связь между углом  $\psi$  (зенитным расстоянием) и углом преломления  $\alpha_2$  устанавливает теорема синусов, примененная к треугольнику ОАС:

$$\frac{OA}{\sin \alpha_2} = \frac{OC}{\sin (180^\circ - \psi)}$$

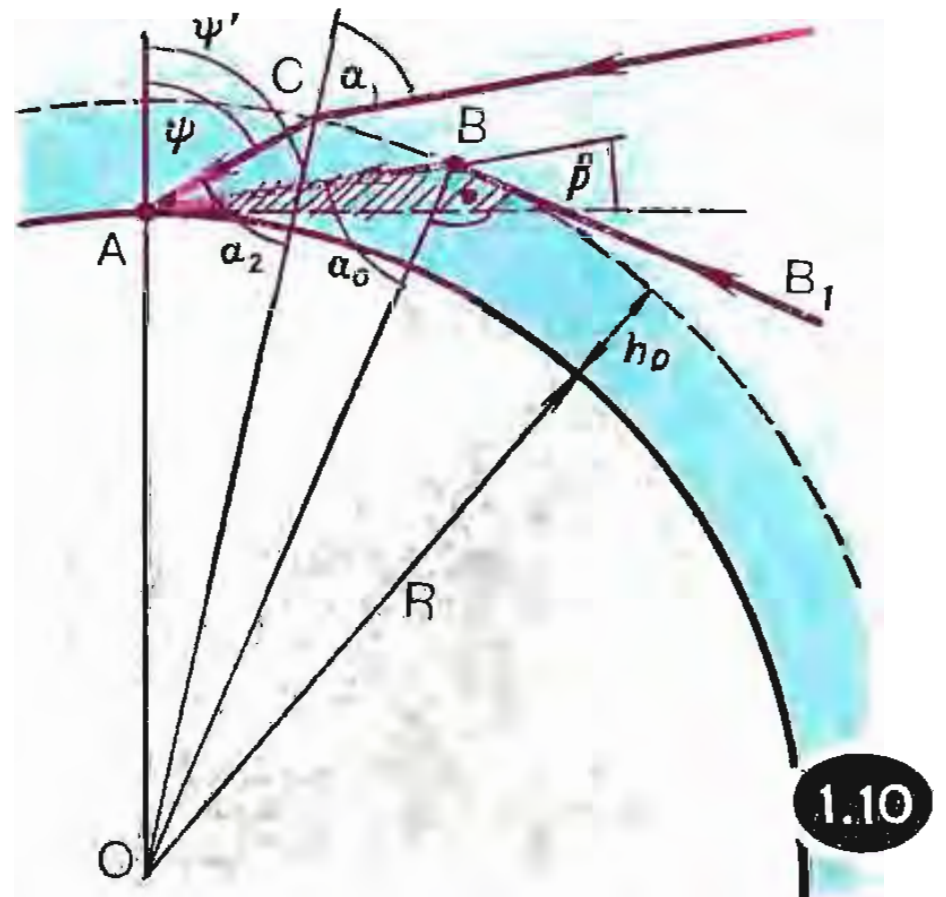
или, иначе,

$$\sin \alpha_2 = \frac{\sin \psi}{1 + \xi}, \quad (1.2)$$

где  $\xi = h_0/R$ . Из (1.2) видно, что по мере увеличения зенитного расстояния  $\psi$  от нуля до  $90^\circ$  угол  $\alpha_2$  возрастает, достигая максимального значения при  $\psi = 90^\circ$ .

Будем постепенно увеличивать  $\psi$ , начиная от нуля, при этом угол  $\alpha_2$  также будет увеличиваться. Предположим, что при некотором значении  $\psi = \psi'$  угол  $\alpha_2$  становится равным предельному углу  $\alpha_0$ , отвечающему полному внутреннему отражению на границе холодного и теплого слоев; в этом случае  $\sin \alpha_1 = 1$ . Углу  $\alpha_0$  соответствует на рисунке 1.10 луч ВА; он образует с горизонталью угол  $\beta = 90^\circ - \psi'$ . Ясно, что к наблюдателю не будут попадать лучи, которые войдут в холодный слой в точках, угловая высота которых над горизонтом меньше, чем угловая высота точки В, т. е. меньше угла  $\beta$ . Тем самым получает объяснение картина заката солнца, показанная на рисунке 1.3,а.

Угловую ширину «слепой полосы» (т. е. угол  $\beta$  на рисунке 1.10) нетрудно вычислить. Рассмотрим в связи с этим следующую задачу. Найти угловую ширину «слепой полосы», наблюдаемой при закате солнца (рис. 1.3,а), если высота холодного слоя воздуха  $h_0 = 50$  м, а отношение разности показателей преломления холод-





ного и теплого слоев к показателю преломления теплого слоя равно  $\mu=10^{-5}$ .

При решении задачи будем использовать рисунок 1.10. Поскольку луч  $B_1B$  составляет с  $OB$  угол  $90^\circ$ , можно переписать (1.1) в виде

$$\frac{1}{\sin \alpha_0} = 1 + \mu. \quad (1.3)$$

Теорема синусов для треугольника  $OAB$  дает

$$\frac{OA}{\sin \alpha_0} = \frac{OB}{\sin \psi'}.$$

Учитывая, что  $\beta=90^\circ - \psi'$  и  $h_0/R=\xi$ , перепишем последнее равенство следующим образом:

$$\cos \beta = (1 + \xi) \sin \alpha_0. \quad (1.4)$$

Из (1.3) и (1.4) получаем

$$\cos \beta = \frac{1 + \xi}{1 + \mu}. \quad (1.5)$$

Далее воспользуемся тем, что угол  $\beta$  весьма мал, так что

$$\cos \beta = 1 - \frac{\beta^2}{2}.$$

Кроме того, воспользуемся малостью  $\xi$  и  $\mu$ , вследствие чего можно принять

$$\frac{1 + \xi}{1 + \mu} = (1 + \xi)(1 - \mu) = 1 - (\mu - \xi).$$

В результате соотношение (1.5) преобразуется к виду

$$\beta^2 = 2(\mu - \xi). \quad (1.6)$$

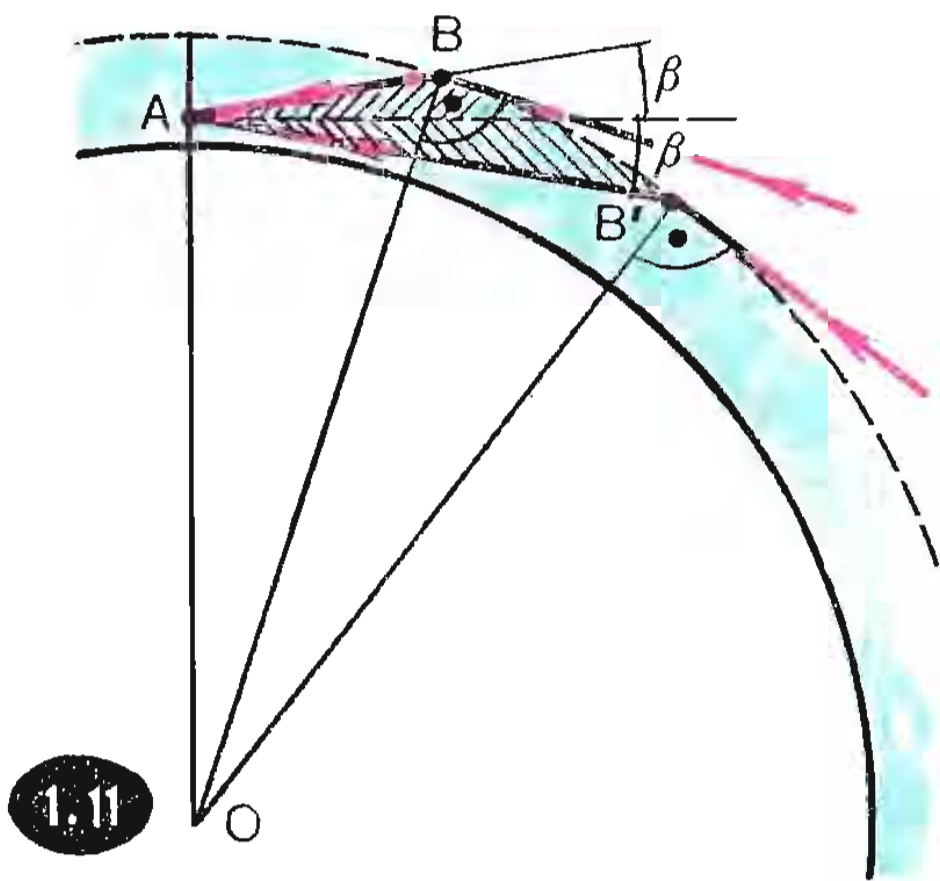
Таким образом,

$$\beta = \pm \sqrt{2(\mu - \xi)}. \quad (1.7)$$

Наличие двух знаков означает, что слепая полоса существует как над линией горизонта (знак «+»), так и под линией горизонта (знак «-»). Чтобы убедиться в существовании слепой полосы под линией горизонта, наблюдателю достаточно подняться на холм. Мы поговорим об этом чуть позднее, а пока будем рассматривать лишь ту слепую полосу, которой в (1.7) отвечает знак «+». Для  $h_0=50$  м и  $R=6380$  км получаем  $\xi=0,78 \cdot 10^{-5}$ . Подставляя это значение  $\xi$  в (1.7), находим  $\beta=2,1 \cdot 10^{-3}$  рад  $=7,2'$ .

Теперь нетрудно объяснить и картину заката солнца, показанную на рисунке 1.3,б. Если наблюдатель находится на некотором возвышении, то он может, в принципе, наблюдать лучи, характеризующиеся зенитным расстоянием  $\psi$ , превышающим  $90^\circ + \beta$  (рис. 1.11). В этом случае он увидит часть солнечного диска, расположенную ниже слепой полосы, имеющей угловую ширину  $2\beta$ . Полагая, что угол  $\beta$  равен  $7'$ , получаем, что слепая полоса, пересекающая солнечный диск, имеет ширину  $14'$ . Диск солнца виден под углом около  $30'$ ; отсюда следует, что ширина слепой полосы в данном случае чуть меньше половины диаметра солнечного диска.

**Кажущееся увеличение размеров заходящего солнца.** Итак, мы познакомились с физикой солнечных закатов. Любуясь картиной заката, читатель будет теперь знать, с чем связан красный цвет зари, чем объясняется небольшая сплюснутость солнечного диска по вертикали, почему заходящее солнце может выглядеть весьма причудливо, когда и почему воз-





никает удивительный зеленый луч. Но есть одна особенность в картине заката, для объяснения которой бесполезно было бы обращаться за помощью к законам физики. По-видимому, многие обращали внимание на то, что у горизонта солнечный диск кажется заметно более крупным, нежели в зените. Сразу же подчеркнем: увеличение размеров заходящего солнца — это не более, чем оптическая иллюзия. Измерения показывают, что углы, под которыми виден диск солнца в зените и у горизонта, — одни и те же (если, конечно, не принимать во внимание уже обсуждавшуюся нами небольшую сплюснутость заходящего светила вследствие рефракции света в земной атмосфере).

Чем же можно объяснить эту оптическую иллюзию? На сей счет высказываются разные соображения. Например, полагают, что иллюзия объясняется психологией нашего восприятия «небесного свода»: он представляется нам не полусферой, а куполом, как бы прижатым (приплюснутым) к земной поверхности. Чтобы убедиться в этом, попробуйте «на глазок» разделить пополам воображаемую дугу, соединяющую наивысшую точку «небесного свода» с какой-либо точкой на линии горизонта. Можно не сомневаться, что вы укажете на упомянутой дуге точку, направление на которую составит с земной поверхностью угол отнюдь не  $45^\circ$ , а существенно меньший; обычно указывают угол между  $20^\circ$  и  $30^\circ$ . Кажущаяся приплюснутость «небесного свода»

приводит к тому, что, когда мы наблюдаем солнце в зените, то мысленно помещаем его гораздо ближе к себе, чем тогда, когда смотрим на заходящее солнце и помещаем его в нашем сознании за далекой линией горизонта. Известно, что если удаленный объект виден под таким же углом, что и близкий объект, то это означает, что первый объект больше второго. Обычно мы даже не задумываемся над тем, что далекий объект должен быть в данном случае более крупным; мы воспринимаем его таким подсознательно. Вот почему заходящее солнце представляется нам более крупным, чем солнце в зените.

Существует и другое объяснение иллюзии увеличения размеров заходящего солнца. По сравнению с предыдущим это объяснение представляется нам более простым и естественным. Оно связано с психологией нашего восприятия размеров объектов, наблюдаемых в далекой перспективе. Как известно, по мере удаления от нас различные объекты на поверхности земли делаются в наших глазах всё меньше и меньше. Можно сказать, что по мере приближения к линии горизонта размеры объектов как бы устремляются к нулю; точнее говоря, устремляется к нулю угол, под которым видны эти объекты. В отличие от них приближающееся к линии горизонта светило наблюдается нами под неизменным углом; по этой причине оно и воспринимается нашим сознанием как преувеличенно большое.

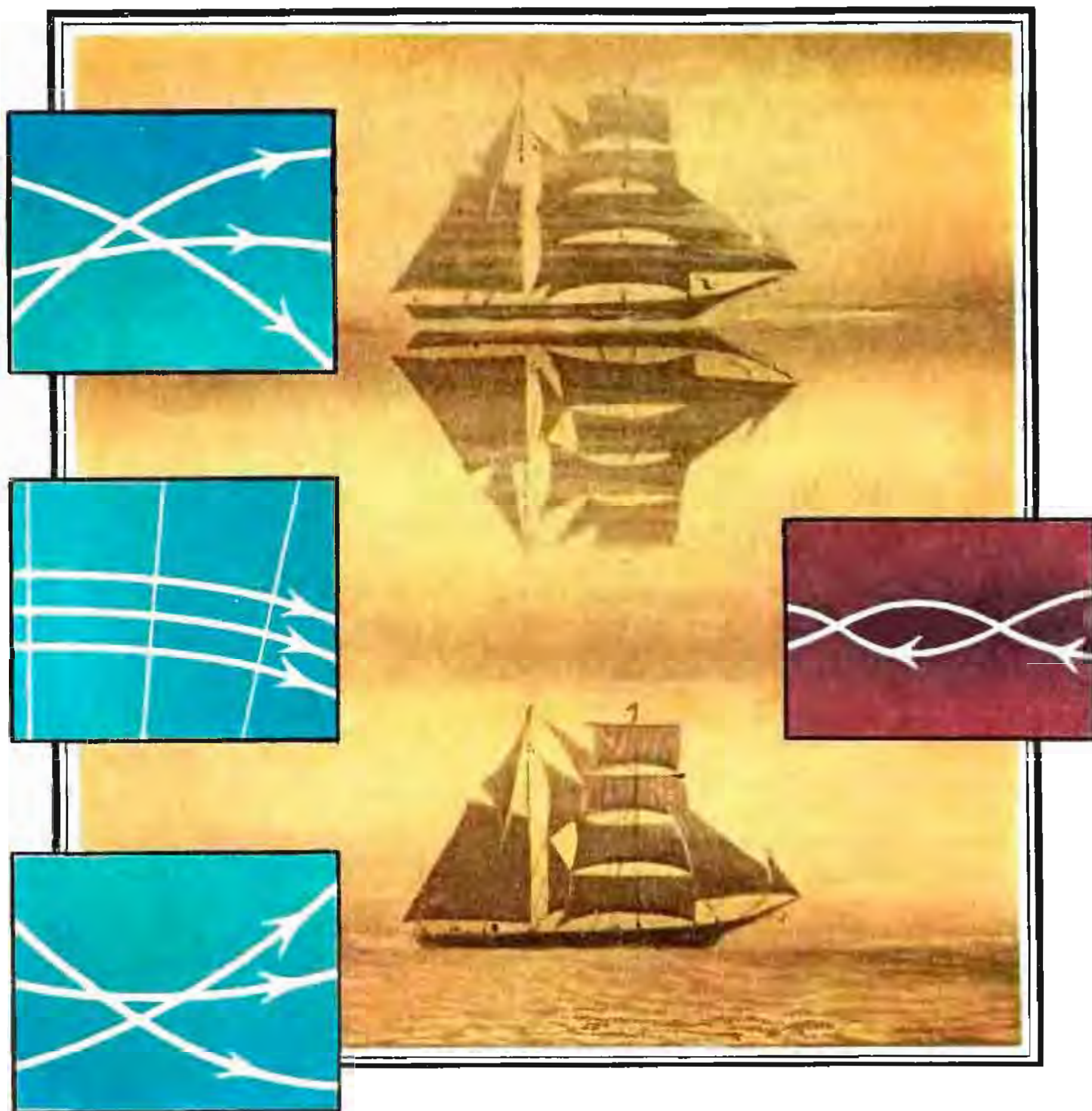
Глава

2

мираж

Пустыня мертвая пылает, но не дышит.  
Блестит сухой песок, как желтая парча,  
И даль небес желта и так же горяча,  
Мираж струится в ней и сказки жизни пишет.

*А. М. Федоров*







даже города, которые на самом деле находятся далеко от наблюдателя, скрыты от него за горизонтом. Эти видения появляются вдруг у линии горизонта или повисают над ней в воздухе. Иногда они предстают перед наблюдателем в перевернутом виде, иногда оказываются сдвоенными: перевернутое изображение возникает вместе с прямым.

В давние времена миражи порождали многие суеверия; их считали проделками злых духов. Из средних веков дошла до нас легенда о «Летучем голландце» — корабле-призраке, встреча с которым в океане якобы предвещала несчастье. Эту легенду породил суеверный страх, охватывавший матросов, когда в тихую штилевую погоду перед ними вдруг возникало таинственное видение — бесшумно несущийся на всех парусах корабль.

Существовали легенды о злых духах, специально вызывавших сказочные видения для того, чтобы обмануть путников, заставить их свернуть с дороги. Согласно одной из таких легенд, коварная фея Моргана любила охотиться за человеческими душами, подстерегать в пустыне караваны, очаровывать караванщиков прекрасными призрачными видениями — сверкающими дворцами, пышными садами, роскошными фонтанами. Усталые путники невольно устремлялись к этим садам и дворцам, сбивались с дороги и в конечном счете погибали в песках. «Фата-Моргана» — так называют особый вид миражей, когда над песчаной равниной или над поверхностью моря вдруг возникают призрачные сады и луга, дворцы и замки, фонтаны и колоннады, и при этом одна картина быстро и неуловимо

сменяется другой. У К. Д. Бальмонта есть стихотворение, называющееся «Фата-Моргана».

Фата-Моргана,

Замки, узоры, цветы и цвета,  
Сказки, где каждая краска, черта  
С каждой секундой — не та.

Фата-Моргана

Явственно светит лишь тем, кто,

внимательный, рано

Утром, едва только солнце взойдет,

Глянет с высокого камня на море...

Правда ль тут будет, неправда ль обмана,

Только роскошной цветной пеленой

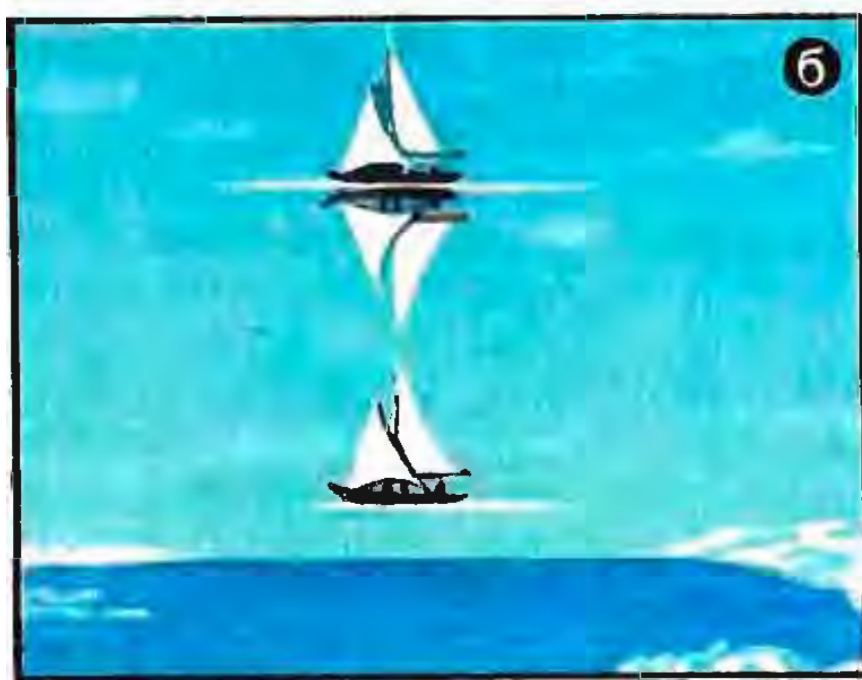
Быстро возникнет пред ним над волной

Фата-Моргана.

**Некоторые виды миражей.** Из большого многообразия миражей выделим несколько видов: уже упоминавшиеся «озерные» миражи, называемые также нижними миражами, верхние миражи, двойные и тройные миражи, миражи сверхдальнего видения.

*Нижние* («озерные») миражи возникают над сильно нагретой поверхностью. Пример такого миража можно видеть на рисунке 2.1,а. *Верхние* миражи возникают, наоборот, над сильно охлажденной поверхностью, например над холодной водой. Если нижние миражи наблюдают, как правило, в пустынях и знойных степях, то верхние наблюдают в северных широтах. Например, жители города Ломоносова иногда отчетливо видят в воздухе здания и улицы Ленинграда, мосты через Неву. Это типичный пример верхнего миража. Заметим, что от Ломоносова до Ленинграда 40 км, так что о прямой видимости здесь не может быть и речи.

Верхние миражи отличаются разнообразием. В одних случаях



они дают прямое изображение объекта, в других случаях в воздухе появляется *перевернутое* изображение. Миражи могут быть *двойными*, когда наблюдаются два изображения: прямое и перевернутое. Эти изображения могут быть разделены полосой воздуха (одно может оказаться над линией горизонта, а другое под ней), но могут непосредственно смыкаться друг с другом. Иногда возникает еще одно — третье изображение. Пример *тройного* верхнего миража можно видеть на рисунке 2.1,б.

Особенно удивительны миражи *сверхдальнего видения*. К. Фламарион в своей книге «Атмосфера» описывает пример подобного миража: «Опираясь на свидетельства нескольких лиц, заслуживающих доверия, я могу сообщить про мираж, который видели в городе Вервье (Бельгия) в июне 1815 г. Однажды утром жители города увидели в небе войско, и так ясно, что можно было различить костюмы артиллеристов и даже, например, пушку со сломанным колесом, которое вот-вот отвалится... Это было утро сражения при Ватерлоо!» Описанный мираж изображен в виде цветной акварели одним из очевидцев. Эта акварель воспроизведена на рисунке 2.1,в. Заметим, что расстояние от Вервье до Ватерлоо по прямой линии более 100 км. Известны случаи, когда подобные миражи наблюдались и на существенно больших расстояниях — до 1000 км. «Летучего голландца» следует отнести именно к таким миражам.

Ниже мы объясним физику миражей отмеченных видов. Но предварительно необходимо рассмотреть, как распространяется световой луч в *оптически неоднородной* среде (жидкости или газе),



где показатель преломления *непрерывно* меняется от точки к точке. Мы уже знаем, что в такой среде световой луч плавно искривляется. С этим явлением, называемым рефракцией света в земной атмосфере, мы познакомились в главе, посвященной закату солнца. Однако там мы рассматривали искривление лучей, идущих к земному наблюдателю от небесных объектов (так называемая *астрономическая рефракция*). Теперь же рассмотрим *земную рефракцию* — искривление лучей, идущих к наблюдателю от объектов, находящихся на земной поверхности.

**Искривление светового луча в оптически неоднородной среде.** Полезно понаблюдать на опыте, как распространяется узкий световой пучок в оптически неоднородной среде. Рассмотрим жидкую среду. Чтобы поставить опыт, надо, во-первых, приготовить такую среду, а во-вторых, позаботиться о том, чтобы световой пучок был хорошо виден в ней. Наполним аквариум прямоугольной формы или специально изготовленную плоскопараллельную кювету водой примерно до половины. Затем через воронку со шлангом, конец которого надо опустить до самого дна кюветы, будем медленно наливать насыщенный раствор поваренной соли (300 г соли на литр воды). Раствор соли будет растекаться по дну кюветы и будет постепенно вытеснять вверх воду. В итоге нижняя половина кюветы окажется заполненной более плотной жидкостью (раствором соли), а верхняя — менее плотной (водой). Вследствие взаимной диффузии между жидкостями через некото-

рое время образуется переходный слой с плавно изменяющейся в вертикальном направлении плотностью, а значит, и показателем преломления. Он будет постепенно возрастать в направлении сверху вниз. Чтобы световой луч был хорошо виден в жидкости, можно предварительно добавить в чистую воду и в солевой раствор щепотку хвойного концентрата, продающегося в аптеке, слабый раствор которого обладает способностью светиться зеленым светом (люминесцировать) под действием обычного (белого) света.

Теперь приступим к самому опыту. Через боковую стенку кюветы направим внутрь жидкости узкий световой луч. Сначала направим луч так, чтобы он шел снизу вверх под некоторым углом  $\alpha$  к вертикали (рис. 2.2,а). По мере перехода луча в слои жидкости с более низкими показателями преломления угол луча с вертикалью будет возрастать. Световой луч внутри кюветы будет изгибаться; его направление будет приближаться к горизонтальному. Затем направим луч сверху вниз под углом  $\alpha$  к вертикали (рис. 2.2,б). При переходе в слои жидкости с более высокими показателями преломления угол луча с вертикалью будет уменьшаться. Картина, наблюдаемая в этих случаях, вполне понятна; достаточно вспомнить обсуждение астрономической рефракции в главе о закате солнца (напомним рисунок 1.6).

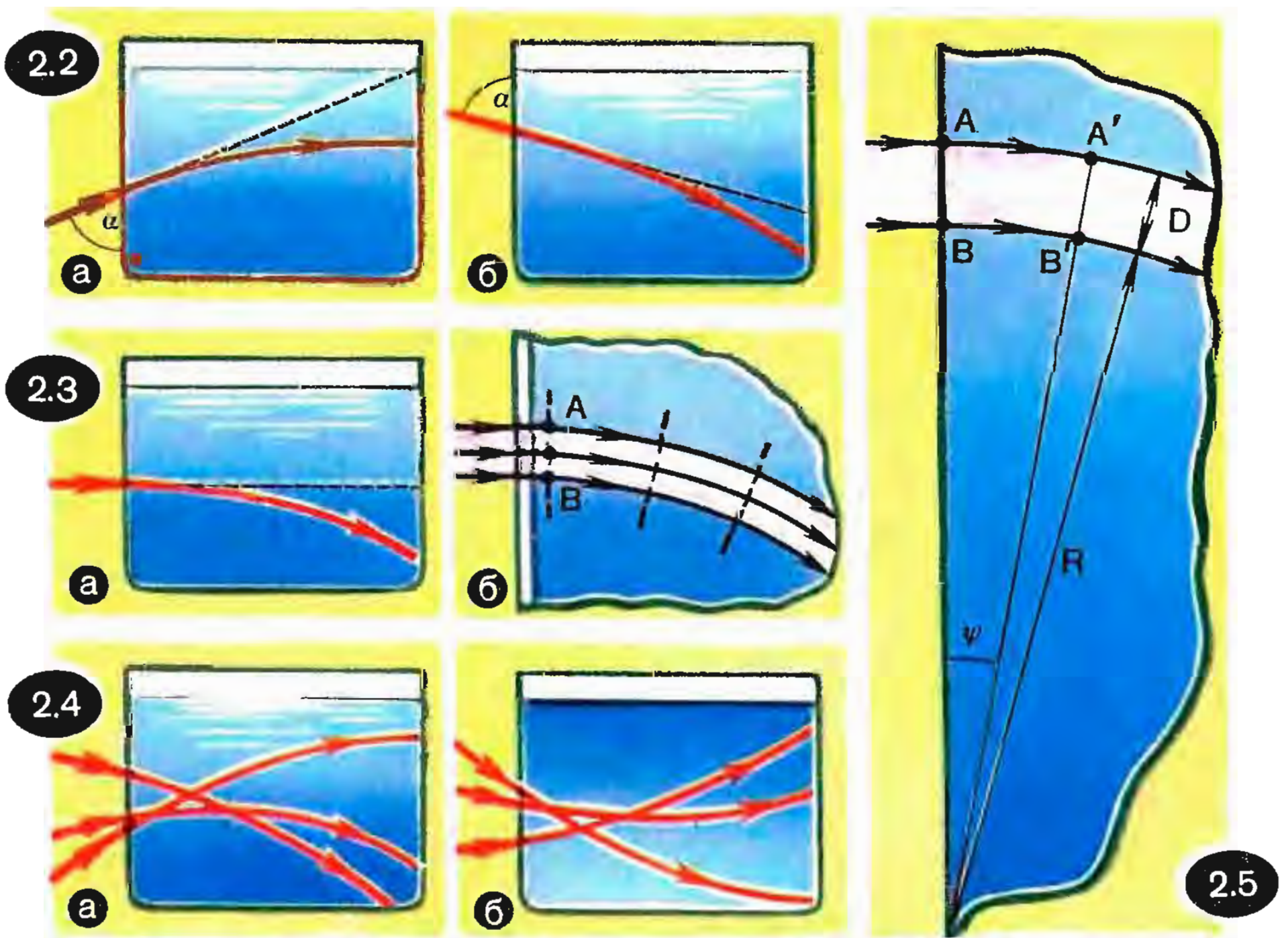
А теперь обратимся к более интересному случаю: луч входит в кювету *строго горизонтально* (рис. 2.3,а). Казалось бы, он должен распространяться внутри кюветы тоже горизонтально. Однако, как показывает опыт, световой



луч в жидкости будет все более изгибаться книзу — в сторону слоев оптически более плотных.

Это нетрудно объяснить, если принять во внимание что бесконечно узкий световой луч есть идеализация, а в действительности мы имеем дело со световыми пучками *конечной ширины*. Пусть световой пучок входит в кювету строго горизонтально (рис. 2.3,а). Штриховые линии изображают сечения волнового фронта пучка в разных точках вдоль оси пучка; стрелками показаны световые лучи. Читателю, не знакомому с понятием волнового фронта, достаточно будет сообщить, что в любой момент времени все точки волнового фронта находятся в

одной и той же фазе колебания и что в каждой точке пространства поверхность волнового фронта и световой луч взаимно перпендикулярны. Рассмотрим фронт АВ светового пучка, только что вошедшего в жидкость. Пусть  $v_A$  — скорость света в точке А, а  $v_B$  — в точке В. Напомним, что показатель преломления равен скорости света в вакууме, деленной на скорость света в среде. Поскольку показатель преломления в точке А меньше, чем в точке В, то, следовательно,  $v_A > v_B$ . Отсюда следует, что вертикальный, вначале волновой, фронт пучка (фронт АВ) будет по мере распространения пучка в жидкости все более наклоняться, как это показано на



рисунке 2.3,б. Это означает, что пучок будет постепенно загибаться книзу.

Данный опыт позволяет заключить: если свет распространяется в среде, показатель преломления которой уменьшается в направлении снизу вверх, то независимо от начального направления луча он всегда будет искривляться так, чтобы его траектория была обращена выпуклостью вверх (рис. 2.4,а). Если бы показатель преломления уменьшался в направлении сверху вниз, то тогда выпуклая сторона изогнутого светового луча была бы обращена вниз (рис. 2.4,б). Обобщая, можно сформулировать следующее важное правило: *в оптически неоднородной среде световой луч изгибается так, что его траектория всегда оказывается обращена выпуклостью в сторону уменьшения показателя преломления среды.*

**Радиус кривизны светового луча.** Насколько резко будет искривляться световой луч в среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления? Это зависит от того, насколько быстро изменяется показатель преломления при переходе от одних точек среды к другим.

Прделаем несложные математические выкладки.

Пусть световой пучок диаметра  $D$  входит горизонтально в среду, показатель преломления которой уменьшается в направлении снизу вверх. В точке  $A$ , отвечающей верхнему краю пучка, он равен  $n - \Delta n$ , а в точке  $B$ , отвечающей нижнему краю, равен  $n$  ( $\Delta n \ll n$ ) (рис. 2.5). Обозначим через  $R$  радиус кривизны пучка сразу после того, как он вошел в среду. Можно счи-

тать, что  $R \gg D$ . Угол  $\psi$  на рисунке выбираем достаточно малым, чтобы полагать, что показатель преломления в  $A'$  такой же, как и в  $A$ . Дугу  $AA'$  световой луч проходит за время

$$\psi(R + D)/v_A,$$

а дугу  $BB'$  за время

$$\psi R/v_B.$$

Эти времена равны:

$$\frac{\psi(R + D)}{v_A} = \frac{\psi R}{v_B}. \quad (2.1)$$

Так как

$$v_A = \frac{c}{(n - \Delta n)}, \quad v_B = \frac{c}{n},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме, то равенство (2.1) можно переписать после сокращения общих множителей в следующем виде:

$$(R + D)(n - \Delta n) = Rn. \quad (2.2)$$

Раскрывая скобки и пренебрегая слагаемым  $D\Delta n$ , как величиной второго порядка малости, получаем:

$$R = \frac{n}{\Delta n/D}. \quad (2.3)$$

Отношение  $\Delta n/D$  характеризует *быстроту изменения* показателя преломления с расстоянием; его называют *градиентом* показателя преломления. В данном случае речь идет о градиенте показателя преломления в вертикальном направлении (в горизонтальном направлении показатель преломления не меняется, значит, в этом направлении его градиент равен нулю). Из формулы (2.3) видно, что чем больше градиент показателя преломления  $\Delta n/D$ , тем меньше радиус кривизны пучка  $R$  и, следовательно, тем круче изгибается световой пучок.

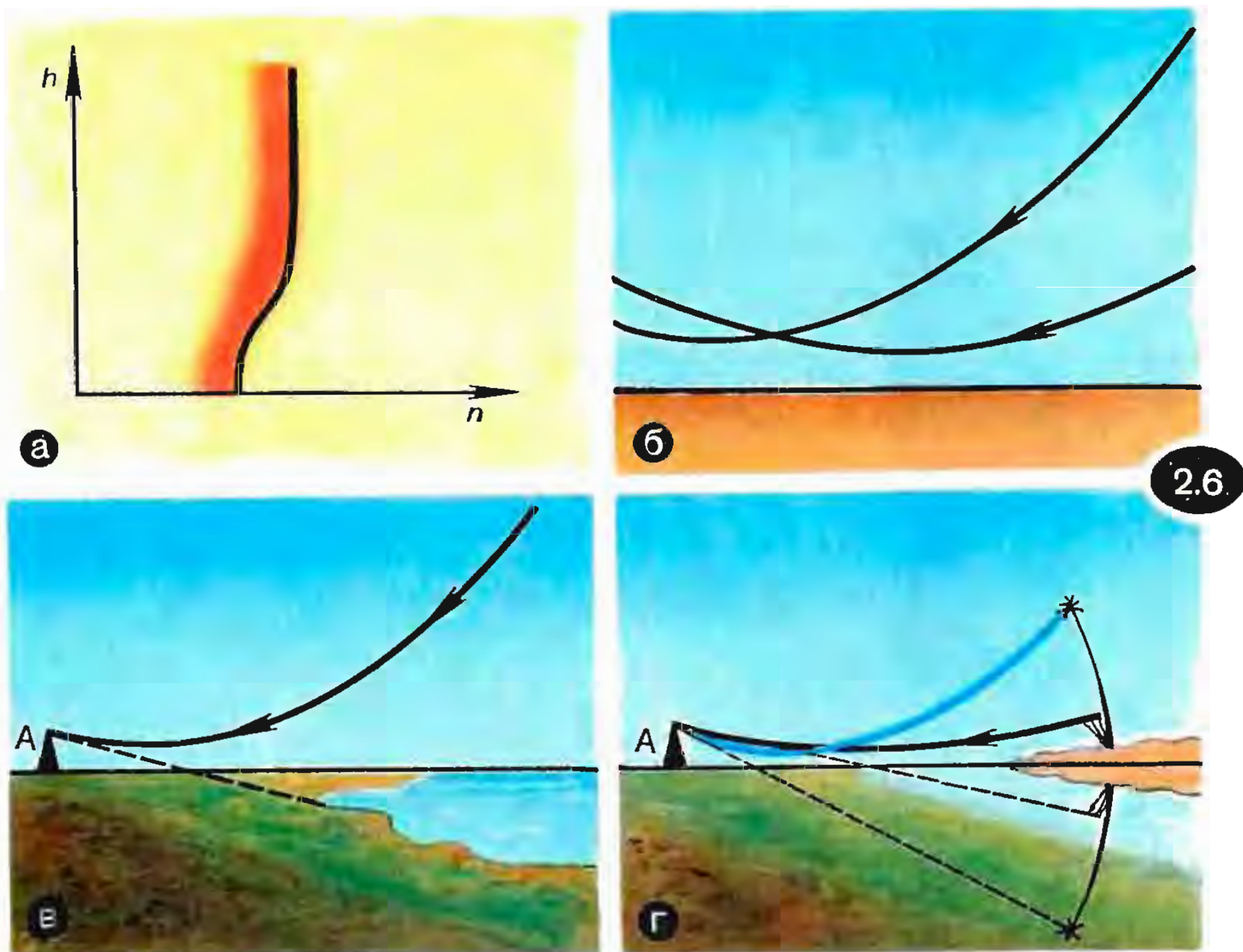


В предельном случае, когда показатель преломления изменяется не плавно, а скачком, т. е. когда имеется четкая граница между двумя областями с разными значениями показателя преломления (это отвечает бесконечно большому градиенту показателя преломления), световой луч испытывает не изгиб, а излом, и на границе двух сред он резко изменяет свое направление, преломляясь и отражаясь или же только отражаясь.

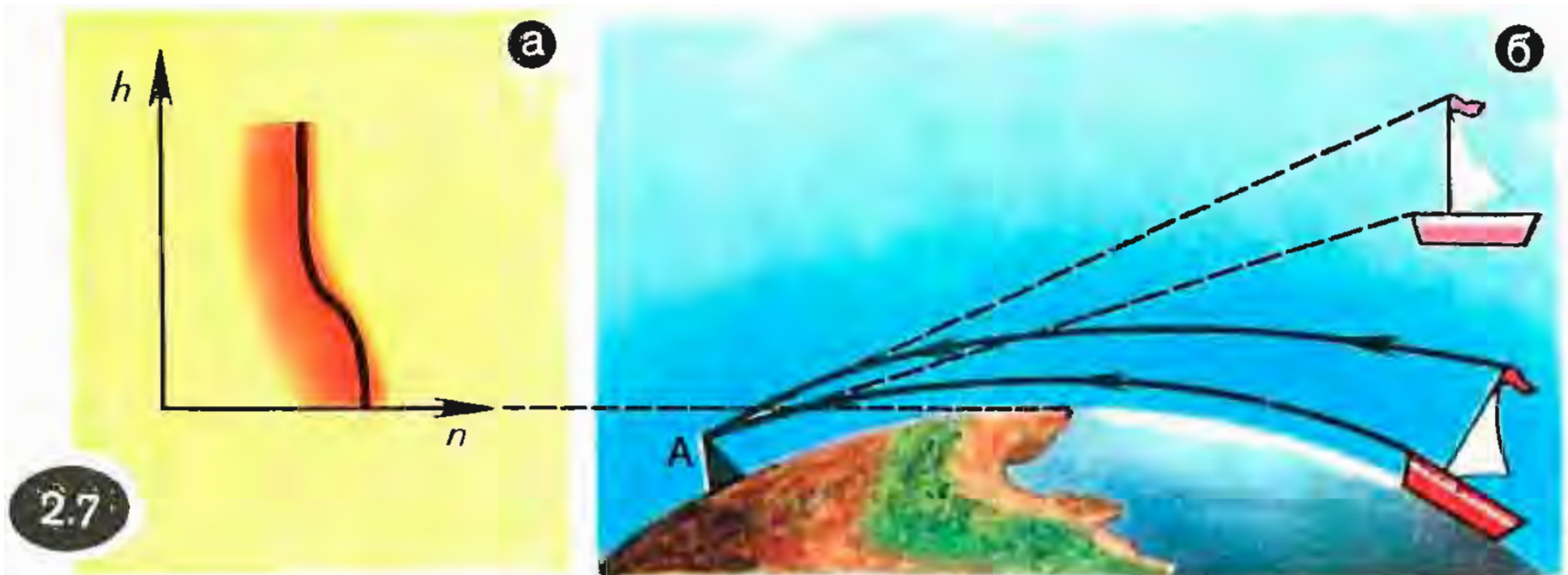
**Объяснение нижнего («озерного») миража.** Если воздух у самой поверхности земли сильно нагрет и, следовательно, его плотность относительно мала, то показатель

преломления у поверхности будет меньше, чем в более высоких воздушных слоях. Изменение показателя преломления воздуха  $n$  с высотой  $h$  вблизи земной поверхности для рассматриваемого случая показано на рисунке 2.6,а. Заметим, что изменение показателя преломления с высотой представлено на рисунке для наглядности более значительным, чем это наблюдается в действительности.

В соответствии с установленным выше правилом, световые лучи вблизи поверхности земли будут в данном случае изгибаться так, чтобы их траектория была обращена выпуклостью вниз (рис. 2.6,б). Пусть в точке А (рис. 2.6,в) находится наблюда-







тель. Световой луч от некоторого участка голубого неба попадет в глаз наблюдателя, испытав указанное искривление. А это означает, что наблюдатель увидит соответствующий участок небосвода не над линией горизонта, а ниже ее (см. штриховую прямую на рисунке 2.6,в). Ему будет казаться, что он видит воду, хотя на самом деле перед ним изображение голубого неба. Представим теперь, что у линии горизонта находятся холмы, пальмы или иные объекты. Благодаря отмеченному выше искривлению лучей наблюдатель увидит их перевернутыми (рис. 2.6,г) и воспримет как отражения соответствующих объектов в несуществующей воде. Так возникает иллюзия, представляющая собой «озерный» мираж.

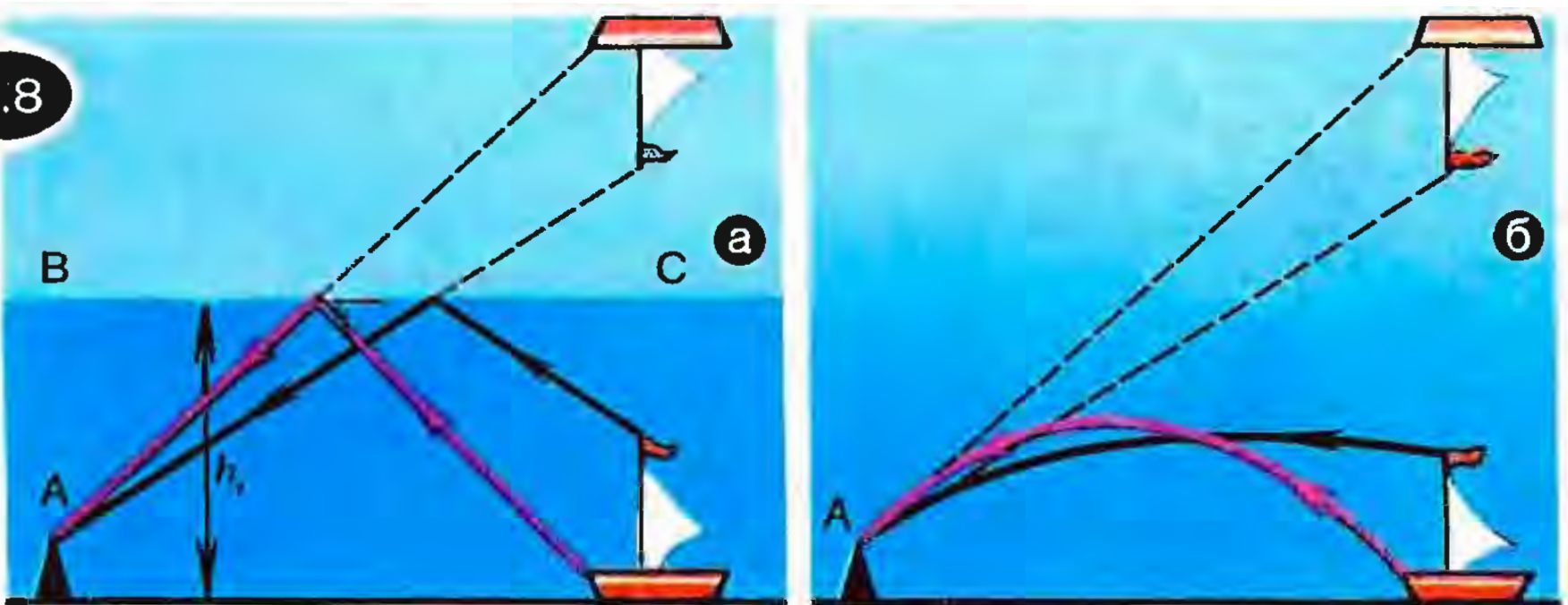
траектория обращена выпуклостью вверх. Поэтому теперь наблюдатель может видеть объекты, скрытые от него за горизонтом, причем он будет видеть их вверху, как бы висящими над линией горизонта (рис. 2.7,б). Недаром такие миражи называют *верхними*.

Верхний мираж может давать как прямое, так и перевернутое изображение. Показанное на рисунке 2.7,б прямое изображение возникает, когда показатель преломления воздуха уменьшается с высотой *относительно медленно*. При *быстром* уменьшении показателя преломления образуется перевернутое изображение. В этом просто убедиться, если рассмотреть гипотетический случай — показатель преломления воздуха на некоторой высоте  $h_1$  уменьшается скачком (рис. 2.8,а). Для простоты кривизна земной поверхности не принимается во внимание. Лучи от объекта, прежде чем попасть к наблюдателю А испытывают полное внутреннее отражение от границы ВС ниже которой в данном случае находится более плотный, а выше — менее плотный воздух. Видно, что верхний мираж дает перевернутое изображение объекта. В действи-

**Простые верхние миражи.** Теперь предположим, что воздух у самой поверхности земли или воды не нагрет, а, напротив, заметно охлажден по сравнению с более высокими воздушными слоями; изменение  $n$  с высотой  $h$  показано качественно на рисунке 2.7,а. Световые лучи в рассматриваемом случае изгибаются так, что их



2.8



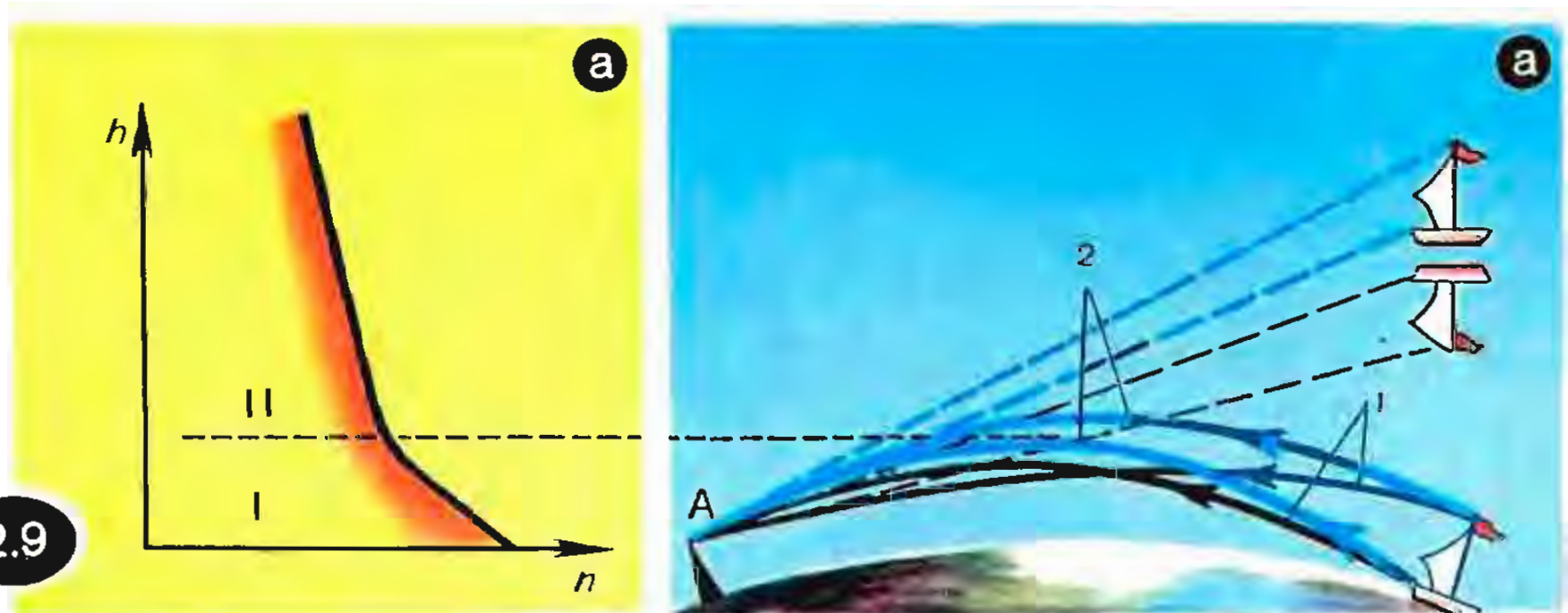
тельности, разумеется, нет скачкообразной границы между слоями воздуха; переход совершается постепенно. Однако если он совершается достаточно резко, верхний мираж даст перевернутое изображение (рис. 2.8,б).

**Двойные и тройные миражи.** Допустим, что показатель преломления воздуха уменьшается с высотой сначала быстро, а затем медленно (рис. 2.9,а). В этом случае световые лучи в области I будут искривляться сильнее, чем в области II. В результате возникают два изображения (рис. 2.9,б). Световые лучи 1, распространяющиеся в пределах воздушной облас-

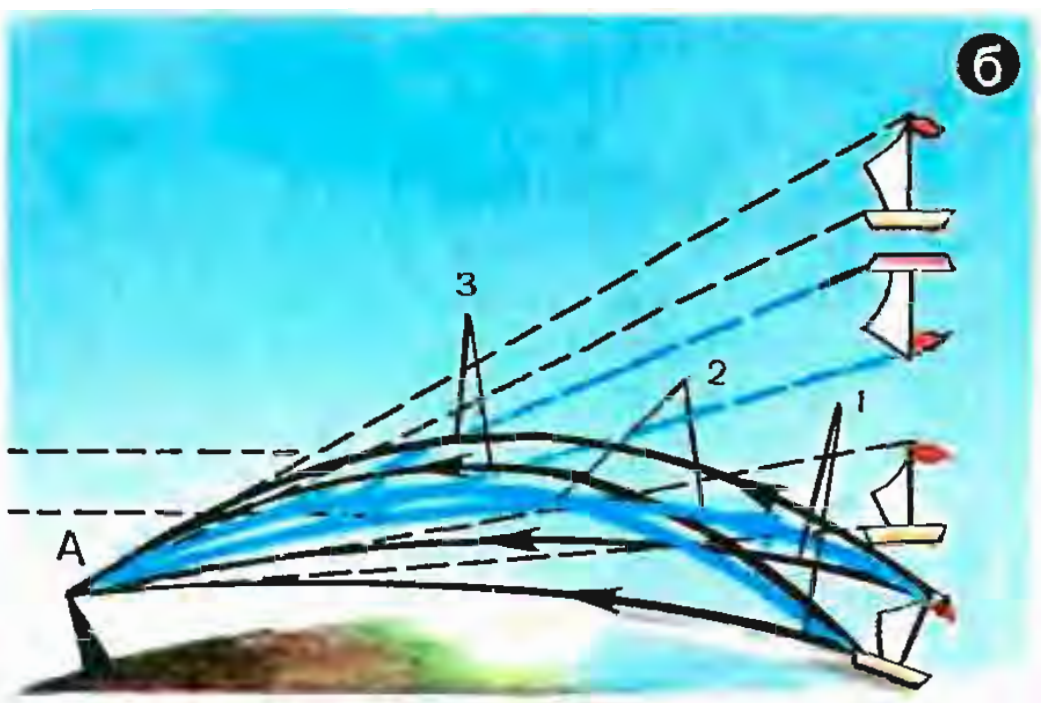
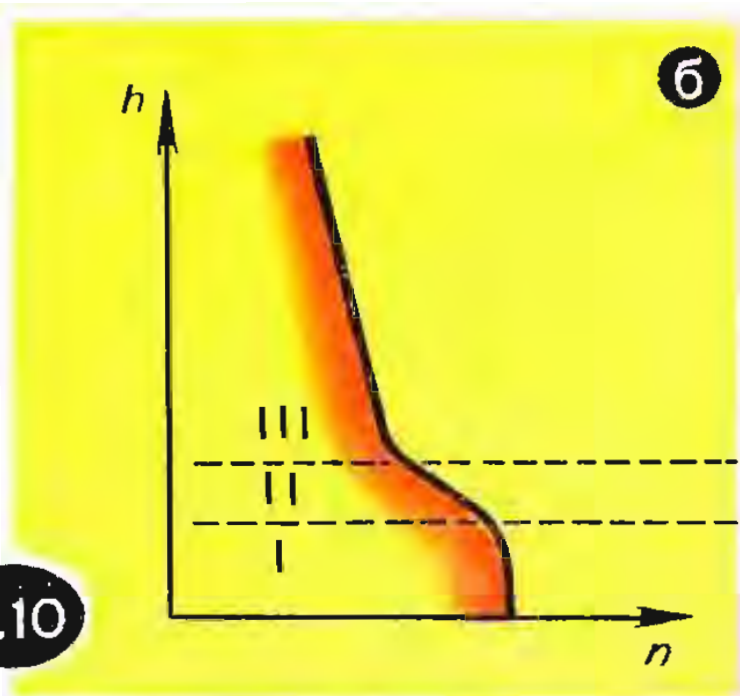
ти I (те самые, которые сильно искривляются), формируют перевернутое изображение объекта. Лучи 2, распространяющиеся в основном в пределах области II, искривляются в меньшей степени и формируют прямое изображение.

Теперь представим себе, что существуют три последовательные воздушные области: первая (у самой поверхности), где показатель преломления уменьшается с высотой медленно, следующая, где показатель преломления уменьшается быстро, и, наконец, третья, где показатель преломления снова уменьшается медленно. В этом случае возможен тройной мираж. На рисунке 2.10,а пред-

2.9



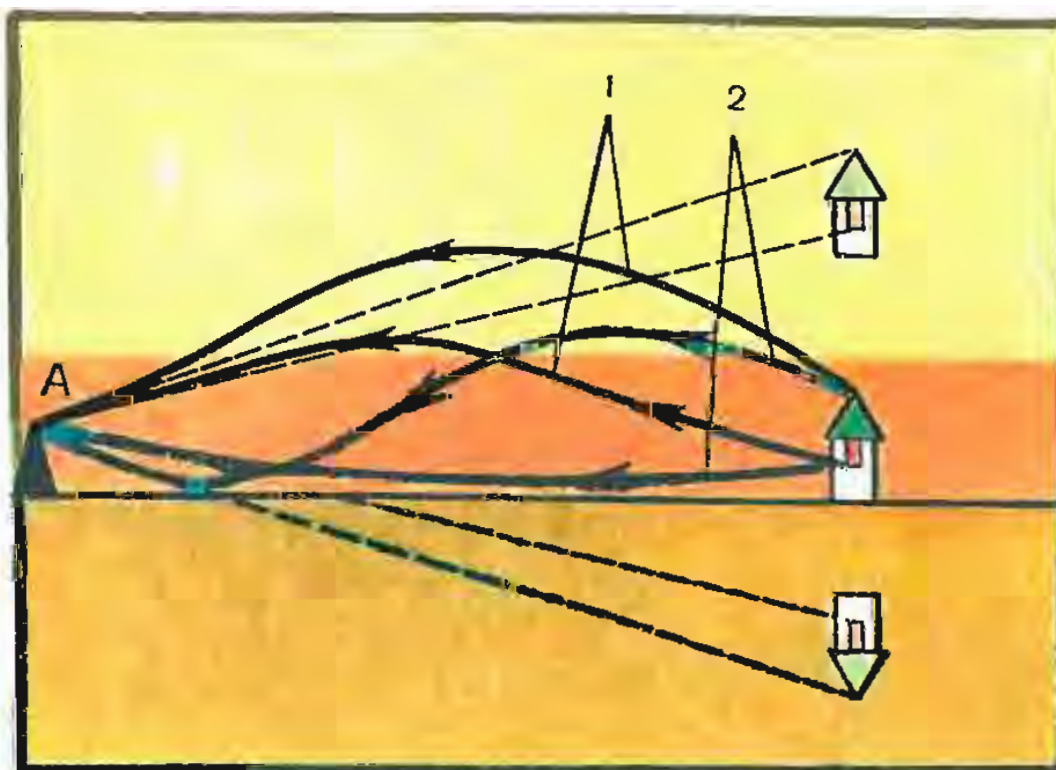
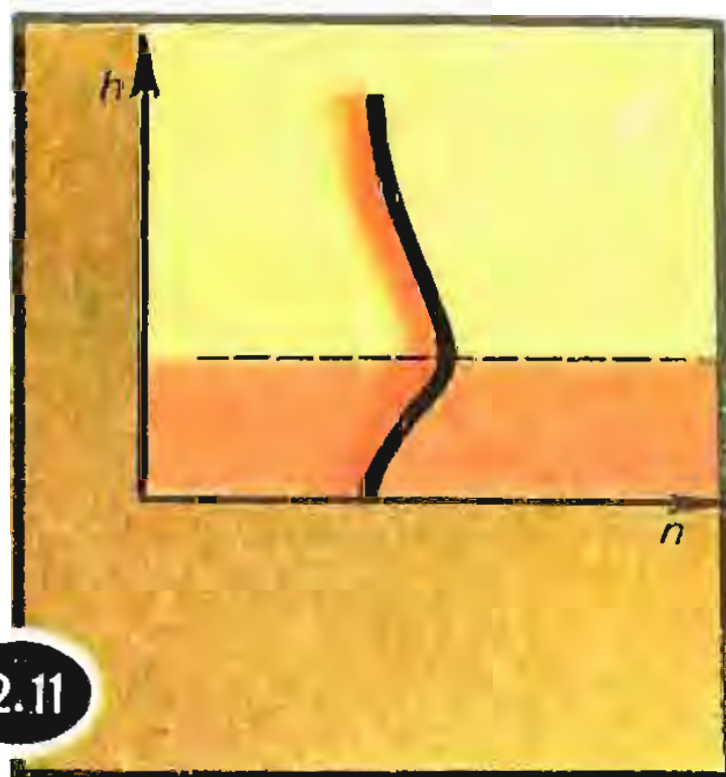




ставлено рассматриваемое изменение показателя преломления с высотой; цифрами I, II, III обозначены соответствующие воздушные области (начиная от приповерхностной). На рисунке 2.10,б показано, как возникает тройной мираж. Лучи 1 формируют нижнее прямое изображение объекта, они распространяются в пределах воздушной области I. Лучи 2 формируют перевернутое изображение; попадая в воздушную область II, эти лучи испытывают достаточно сильное искривление. Наконец, лучи 3 формируют верхнее прямое изображение объекта.

Двойной мираж может возникнуть также в случае, когда у са-

мой поверхности воздух сильно нагрет, выше охлажден, а еще выше снова нагрет. Показатель преломления воздуха с высотой сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться (рис. 2.11,а). В данном случае ход световых лучей от объекта к наблюдателю может иметь вид, показанный на рисунке 2.11,б (как обычно, через А обозначен наблюдатель). На рисунке выделены две воздушные области: область, где показатель преломления растет с высотой (она окрашена в розовый цвет), и область, где показатель преломления с высотой уменьшается (она окрашена в желтый цвет). Обратите внимание: все световые



2.11



лучи в пределах розовой области обращены выпуклостью вниз, тогда как лучи в желтой области обращены выпуклостью вверх (напомним, что траектория луча всегда обращена выпуклостью в сторону менее плотного воздуха). Судя по рисунку, наблюдатель увидит два изображения объекта — одно выше линии горизонта, а другое (перевернутое) ниже. Первое изображение формируют лучи 1, а второе — лучи 2.

Под влиянием ветра и вертикальных воздушных потоков слой холодного воздуха может искажаться, изменять толщину, перемещаться по высоте. Поэтому как верхнее, так и нижнее изображения будут изменяться со временем, создавая картину сменяющихся друг друга видений.

Так возникает знаменитая «Фата-Моргана».

**Миражи сверхдальнего видения.** Природа этих миражей изучена менее всего. Ясно, что атмосфера должна быть очень прозрачной, свободной от загрязнений и водяных паров. Но этого мало. Должен образоваться устойчивый слой охлажденного воздуха на некоторой

высоте над поверхностью земли. Ниже и выше этого слоя воздух должен быть более теплым. Данная ситуация похожа на ту, какую мы рассматривали на рисунке 2.11,а. Световой луч, попавший внутрь плотного холодного слоя воздуха, оказывается как бы «запертым» внутри него и распространяется в нем как по своеобразному световоду (см. справа на с. 33). Обратим внимание, что траектория луча на этом рисунке все время обращена выпуклостью в сторону менее плотных областей воздуха.

Возникновение сверхдальних миражей можно объяснить распространением лучей внутри подобных «световодов», которые иногда создает природа. Впрочем, такое объяснение нельзя считать исчерпывающим. Возможно, что при каких-то условиях в атмосфере образуются своеобразные воздушные линзы, а также возникают вторичные миражи (миражи от миражей). Возможно, наконец, что определенную роль в возникновении сверхдальних миражей играет ионосфера (слой ионизированных газов на высотах от 70...100 км), которая способна отражать световые волны.

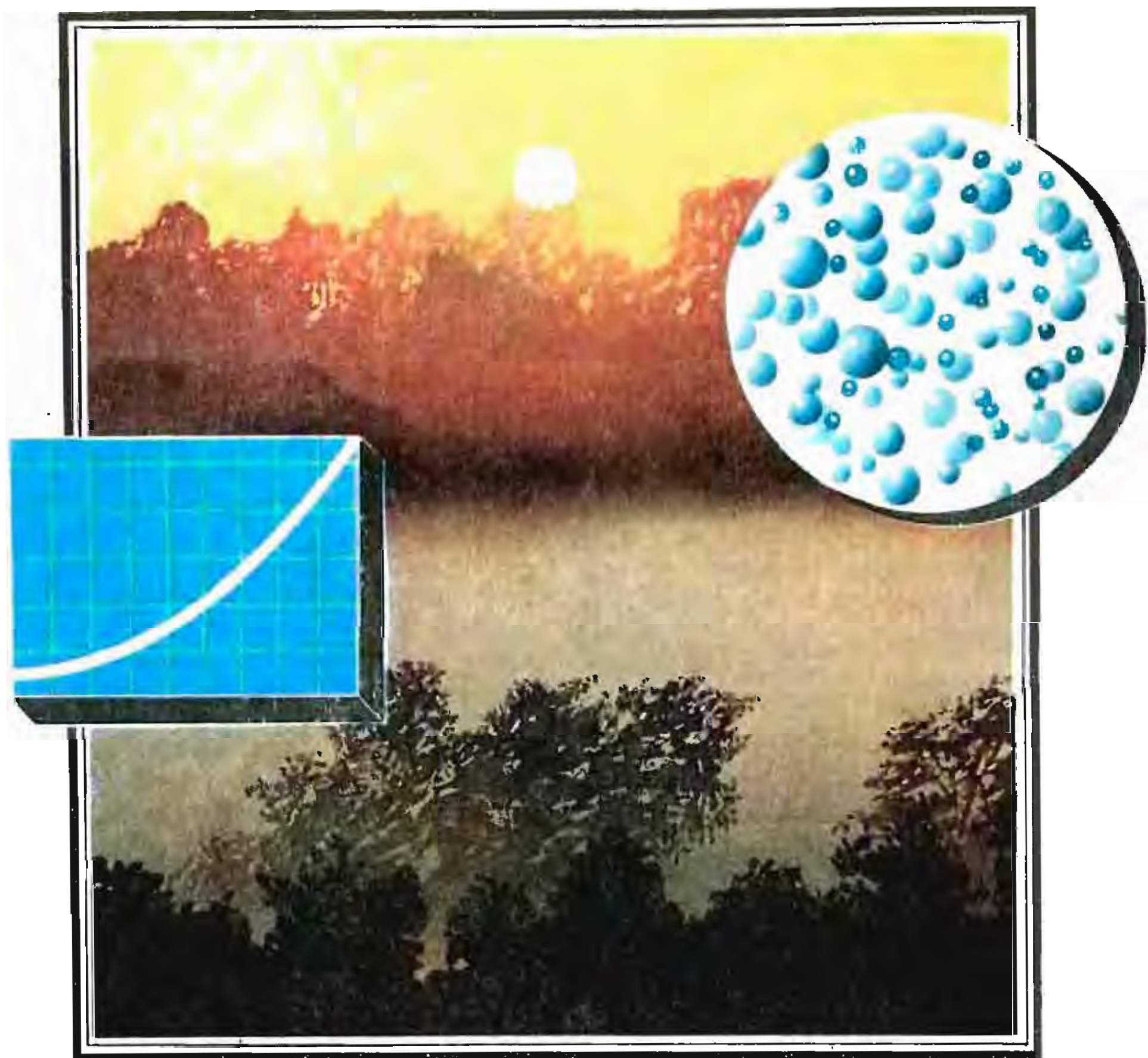
глава

3

Туман

Бледнеет ночь... Туманов пелена  
В лощинах и лугах становится белее,  
Звучнее лес, безжизненной луна  
И серебро росы на стеклах холоднее.

*И. А. Бунин*



В наше время туманами интересуются не только поэты и художники. Пожалуй, особенно сильно туманы волнуют сегодня диспетчеров аэропортов, работников морских и речных портов, летчиков, капитанов кораблей, водителей автомашин и, конечно же, огромную армию метеорологов, синоптиков. «Внимание! Видимость на дорогах до 1 км», — предупреждает нас по радио служба погоды. Это значит, что ожидается слабый туман. При умеренном тумане видимость уменьшается до сотен метров, а при сильном — до нескольких десятков метров. И тогда временно закрываются аэродромы, встают на якорь суда, включаются сирены маяков.

А как важно было предвидеть появление тумана в дни боевых действий во время Великой Отечественной войны! Сколько дерзких операций провели, как говорится, перед носом у противника наши бойцы и партизаны под прикрытием тумана! Недаром же в те грозные годы родилась песня:

Ой, туманы мои, растуманы!  
Ой, родные поля и луга!  
Уходили в поход партизаны,  
Уходили в поход на врага!

(слова этой песни написал М. В. Исаковский, а музыку В. Г. Захаров).

Туманы хорошо знакомы как живущим в сельской местности, так и жителям городов. Сельский житель обычно рад туману. Он знает, что туман ранней весной предвещает потепление, что туман на утренней заре летом связан с выпадением росы, которая напитает растения влагой. Иначе воспринимают туман жители больших современных городов с сильно

загрязненным воздухом. Городскому жителю в сильный туман не только трудно ходить по улицам, но и трудно дышать; его физическое состояние резко ухудшается, портится настроение. В довольно мрачных тонах описывает Э. Верхарн туман, сгустившийся в большом городе над загрязненной рекой:

Сплошными белыми пластами  
Туман залег между домов...  
Туман сырой, туман холодный,  
Туман, как белый войлок плотный,  
Окутал низкие челны.  
Они, закинув якоря,  
Туман кровавя нимбом фонаря,  
В безумье тихое сейчас погружены...  
Седая ночь миры в туманах прячет  
И в тусклых душах монотонно плачет.

К счастью, в наших городах не бывает таких мрачных, унылых туманов. Зато с ними знакомы жители Лондона и Парижа, Лос-Анджелеса и Токио, где слово «туман» нередко связывают со страшным словом «смог». В романах Бальзака, Золя, Диккенса можно найти немало сцен с описанием удручающе мрачных туманов. «Туман везде, — читаем мы, например, в романе Ч. Диккенса «Холодный дом». — Туман ползет в камбузы угольных бригов; туман лежит на реях и плывет сквозь снасти больших кораблей; туман оседает на бортах баржей и шлюпок. Туман слепит глаза и забивает глотки престарелым гринвичским пенсионерам, хрипящим у каминов в доме призрения. На мостах какие-то люди, перегнувшись через перила, заглядывают в туманную преисподню, и сами, окруженные туманом чувствуют себя как на воздушном шаре, что висит среди туч».



Несмотря на подобные способности вызвать озноб описания тумана, его все же вряд ли можно отнести к грозным явлениям природы. В давние времена он воспринимался не как что-то карающее, а просто как таинственное явление, способное порождать призраки и скрывать предметы, как нечто незаметно подкрадывающееся, обволакивающее. Таинственность тумана рождала суеверные представления, и возникали различные легенды, иногда даже светлые, не лишённые поэзии.

Герой «Карельских рун» (эпических произведений древней народной поэзии Карелии) кузнец Илмаринен выковал стальную узду и цепь, чтобы поймать свирепых зверей. Он обращается к дочери тумана с просьбой помочь ему:

И ловить зверей он вышел,  
Говоря слова такие:  
«Терхенетяр, дочь тумана!  
Решетом всю хмарь просей ты,  
Поразвесь клочками дымку  
Над звериными тропами,  
Чтобы мне пройти неслышно,  
Никого не всполошивши».

Существует старинная эстонская сказка «Король Туманной горы». Эстонка Тийу случайно повстречалась с этим королем. Он помог бедной эстонке, но велел сохранить тайну его горы. Тийу сохранила тайну, она ничего не сказала односельчанам о могущественном короле туманов. Те решили, что она колдунья, которую следует сжечь на костре. «Но как только огонь стал разгораться,— повествует сказка,— на землю пал такой густой туман, что и в двух шагах ничего не было видно. Когда, наконец, солнечные лучи побороли туман, оказалось, что костер не загорелся, а женщина ис-

чезла, словно растаяла в тумане. Король Туманной горы спас ее».

Надо признать, что поэты всегда любили обращаться к туману, они использовали его как поэтический образ, помогающий выразить самые разные настроения. В одних случаях поэты видят в туманной дымке неуловимый облик возлюбленной:

Как сквозь туман вишневые цветы  
На горных склонах раннею весною  
Белеют вдалеке,—  
Так промелькнула ты,  
Но сердце все полно тобою.

В других случаях туман наводит их на грустные думы, вызывает беспокойство, тревогу:

В тумане утреннем вся бухта Акаси,  
Которой свет зари едва-едва коснулся.  
Не видно островов...  
И думы все мои  
О корабле, что не вернулся.

Эти чем-то напоминающие изящные кружева стихи относятся к средневековой японской поэзии X—XIII вв. Автор первого стихотворения Ки-но Цураюки, автор второго, к сожалению, не известен.

Часто с туманом ассоциируются печальные воспоминания, чувство утраты. За душу берут исполненные глубокой печали строки, написанные И. С. Тургеневым:

Утро туманное, утро седое,  
Нивы печальные, снегом покрытые,  
Нехотя вспомнишь и время былое,  
Вспомнишь и лица, давно позабытые.

Порождаемая туманом печаль может обостриться настолько, что появляется чувство безысходности, незащитности. Его создает холодный туман, долго не прекращающийся, «пронизывающий до костей». Это ощущение хорошо

передал Райнис в своем стихотворении «Туман без конца»:

Туман сочится меж ветвей,  
Трава сырая побелела.  
Пронизывает до костей  
Седую изморосью тело.  
Где спрятаться? Где переждать?  
Туманный полог не редет.  
Настанет день... И ночь опять...  
А изморось все сеет, сеет.

**Туман глазами внимательного наблюдателя.** Туман представляет собой скопления мелких капелек воды (или мелких ледяных кристалликов), возникающие при определенных условиях в непосредственной близости от поверхности земли или водной поверхности. Туман стелется над самой поверхностью земли или воды, образуя слой толщиной примерно от метра до десятков метров (иногда до сотен метров). Он снижает горизонтальную видимость, ограничивает ее расстояниями от километра (слабый туман) до нескольких метров (очень сильный туман).

Когда и где образуется туман? Все знают, что туман часто образуется в низинах, оврагах, болотистых местах, где воздух достаточно влажный. Возникает он и над поверхностью воды (морские, озерные, речные туманы). Туман может образоваться утром, но может появиться и вечером — после захода солнца. Иногда туман не прекращается целые сутки.

Из огромного разнообразия туманов мы выделим пять конкретных примеров, опишем их, а впоследствии объясним физику возникновения.

*Первый пример.* Предположим, что имеется хорошо прогреваемый солнцем водоем — пруд, озеро,

мелководная бухта. За ночь воздух над поверхностью воды охлаждается в большей степени, чем сама вода, и его температура оказывается существенно ниже. Над водой возникает утренний туман.

Этот утренний туман весьма нестойк. Взойдет солнце, и он растает без следа. Желая подчеркнуть быстротечность молодости и юных мечтаний, А. С. Пушкин недаром упоминает утренний туман. Напомним строки из его стихотворения «К Чаадаеву»:

Любви, надежды, тихой славы  
Недолго нежил нас обман,  
Исчезли юные забавы,  
Как сон, как утренний туман.

*Второй пример.* Холодный воздух переносится ветром в горизонтальном направлении и оказывается над теплой водой. И тут же над водой начинает образовываться туман. Такой туман можно наблюдать, например, в Арктике, когда слои холодного воздуха над льдами перемещаются на открытую воду.

*Третий пример.* Теплый воздух переносится ветром в горизонтальном направлении и оказывается над холодной поверхностью. При этом он охлаждается, и в результате возникает туман. Такой туман образуется, например, когда воздушные массы, получившие теплоту от реки, перемещаются к покрытому снегом холодному берегу. Таковы зимние туманы, характерные для Ленинграда. Возможен и другой случай: слой воздуха, прогретый над берегом, перемещается в сторону моря и там отдает теплоту холодной морской воде. Эти туманы образуются летними вечерами на море вблизи берега.





**Туман под микроскопом.** При температурах, не опускающихся ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , туман состоит в основном из мелких капелек воды, а при более низких температурах из мелких ледяных кристалликов. В дальнейшем мы будем рассматривать только водяные туманы.

Справа на с. 45 можно видеть фотографию тумана, снятую при значительном увеличении. На фотографии видны капельки различного диаметра. Они принимают значения примерно от 0,5 мкм до 100 мкм. В обычном тумане диаметр водяных капелек в основном порядка 10 мкм. Если в тумане преобладают очень мелкие капельки (диаметр менее 1 мкм), то такой туман называют *дымкой*. Если же капли тумана относительно велики (диаметр порядка 100 мкм), то это так называемая *морось*. Количество капелек в  $1\text{ см}^3$  тумана примерно от 100 до 1000.

Общая масса всех водяных капелек в единице объема тумана называется *водностью тумана*; эта величина измеряется в единицах плотности, чаще всего в  $\text{г}/\text{м}^3$ . Водность тумана обычно не превышает  $0,1\text{ г}/\text{м}^3$ . В особо плотных туманах она может достигать  $1\text{ г}/\text{м}^3$ . Эти числа кажутся очень малыми, ведь собрав воедино все капельки из тумана, занимающего объем  $10^3\text{ м}^3$  и имеющего водность  $0,1\text{ г}/\text{м}^3$ , мы получим всего полстакана воды (100 г) и едва сможем утолить жажду. Поэтому кажется удивительным, как быстро намокает вся одежда у того, кто окунулся в промозглую сырость тумана.

Однако не следует особенно удивляться. В действительности воды в тумане не так уж мало. Рассмотрим слой тумана толщи-

ной 10 м, висящий над полем площадью  $5\text{ км}^2$ . Объем такого туманного слоя равен  $5 \cdot 10^7\text{ м}^3$ . При водности тумана  $0,1\text{ г}/\text{м}^3$  в нем содержится  $5 \cdot 10^3$  л воды. Этого вполне достаточно для орошения рассматриваемого поля.

То, что туманы и росы — существенный источник влаги, необходимой растениям, хорошо известно крестьянам. Разумеется, они не производили расчетов, просто они знали это из собственного опыта. Недаром сказка «Король Туманной горы», о которой мы говорили выше, заканчивается так: «...И не было больше удачи этим людям. Каждое лето засуха причиняла им большой урон, хлеба и травы погибали, потому что по ночам не опускался над ними освежающий туман. Король Туманной горы гневался на людей, которые хотели предать смерти его питомицу».

**Насыщенный водяной пар.** Прежде чем переходить к объяснению физики возникновения тумана, надо предварительно поговорить о *насыщенном водяном паре*.

Предположим, что мы находимся на берегу какого-нибудь водоема и глядим на поверхность воды. Она представляется нам спокойной. Но в действительности перед нами совершается великое множество микрособытий, недоступных нашему взору. Наиболее быстрые молекулы воды, преодолев притяжение со стороны других молекул, высканивают из водной массы и образуют пар над водной поверхностью. Мы называем это *испарением воды*. Молекулы водяного пара сталкиваются друг с другом и с молекулами воздуха, часть молекул пара пере-

ходит обратно в жидкость. Это есть *конденсация пара*. При данной температуре устанавливается своеобразное *равновесие* (его называют *динамическим*), когда число молекул воды, покидающих за единицу времени жидкость, в среднем равно числу молекул воды, возвращающихся за то же время обратно. Можно сказать, что процессы испарения и конденсации взаимно компенсируются. Водяной пар, находящийся в этом случае над поверхностью воды, называют *насыщенным*.

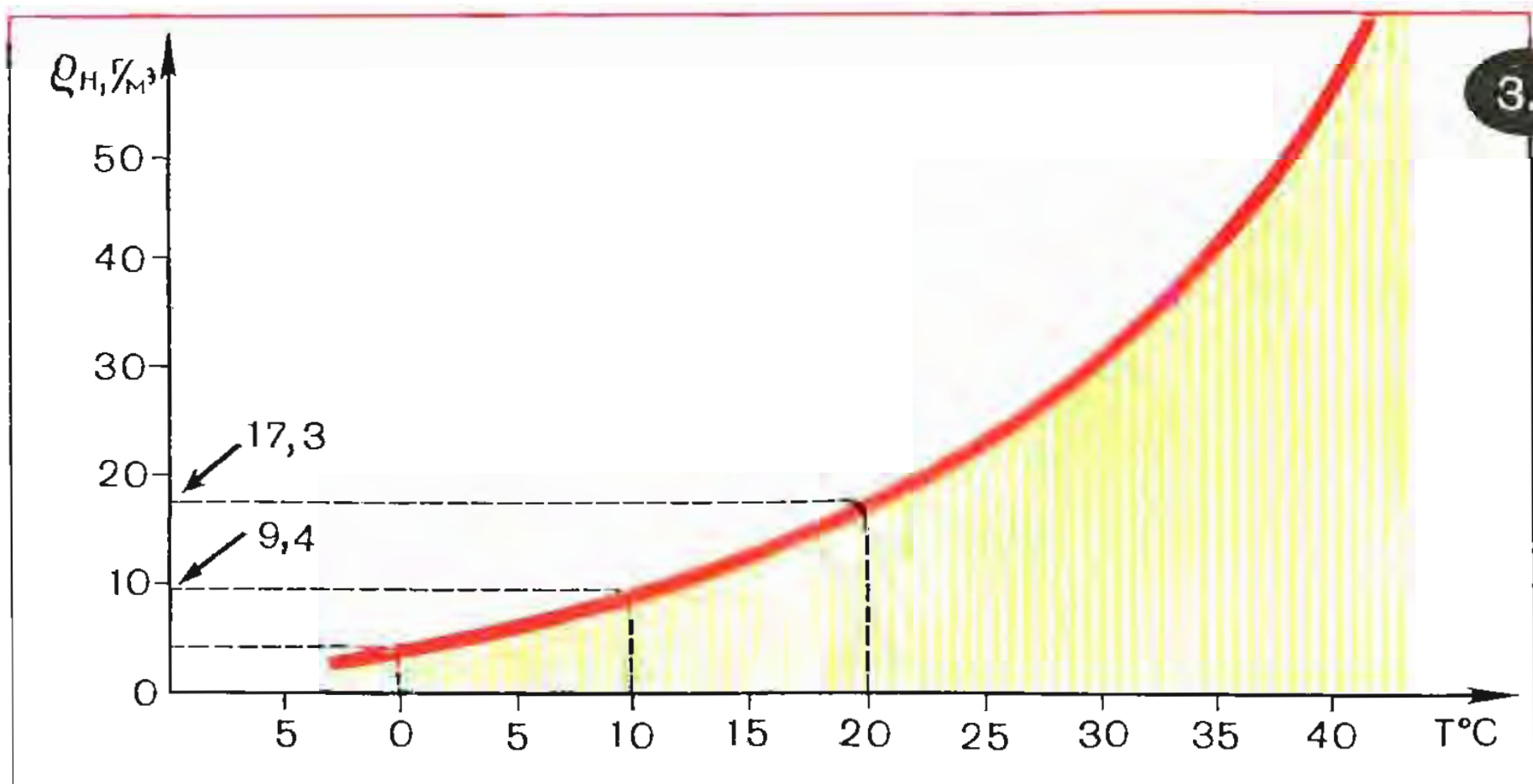
Если температура вдруг повысится, пар станет ненасыщенным: процесс испарения начнет преобладать над процессом конденсации, в результате давление пара начнет расти. Это будет продолжаться до того момента, пока снова не установится динамическое равновесие между испарением и конденсацией, иначе говоря, пока пар снова не станет насыщенным.

Если, напротив, температура вдруг понизится, пар станет перенасыщенным — теперь уже конденсация начнет преобладать над

испарением. В результате давление пара будет понижаться до тех пор, пока не будет снова достигнуто динамическое равновесие, т. е. состояние насыщения пара.

Мы видим, таким образом, что *давление насыщенного пара зависит от температуры*: оно возрастает с увеличением температуры и падает с ее уменьшением. Часто вместо давления пара рассматривают его плотность  $\rho$  (массу водяных паров в единице объема). Ясно, что плотность насыщенного пара  $\rho_n$  растет с увеличением температуры и падает с ее уменьшением. На рисунке 3.1 приведен график зависимости плотности насыщенного пара от температуры; первая величина измеряется в данном случае в  $\text{г/м}^3$ , а вторая — в  $^\circ\text{C}$ . Из графика видно, что при повышении температуры, например, от  $5^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$  плотность насыщенного пара возрастает более чем в 10 раз.

Заметим, что изображенный график подходит для *плоской* водной поверхности. Над *выпуклой* поверхностью плотность (и давле-



ние) насыщенного пара при данной температуре больше, чем над плоской поверхностью, а над вогнутой, наоборот, меньше. Дело в том, что в случае с выпуклой поверхностью имеются более благоприятные условия для преобладания испускания над конденсацией, тогда как вогнутая форма поверхности более благоприятствует конденсации.

Сделанное замечание имеет прямое отношение к туману. Представьте себе, что возникла и постепенно растет капелька воды в тумане. Она растет за счет конденсации водяных паров. А конденсируются они на выпуклой поверхности капельки. Но не будем забегать вперед — разговор о физике возникновения тумана еще впереди.

Теперь мысленно уберем поверхность воды и представим себе некий объем воздуха, содержащий какое-то количество водяных паров. Пусть плотность этих паров равна плотности насыщенного пара при данной температуре (в соответствии с графиком на рисунке 3.1). Предположим, что температура воздуха в рассматриваемом объеме вдруг уменьшилась. Тогда водяной пар окажется пересыщенным, начнется конденсация пара и на стенках объема появится влага — выпадет роса. Это будет продолжаться до тех пор, пока плотность водяных паров в рассматриваемом объеме не снизится до значения, равного плотности насыщенного водяного пара при новой температуре.

**Задача, имеющая отношение к возникновению тумана.** Предварительно поговорим о том, что такое относительная и абсолютная

влажность. *Относительная влажность*  $f$  при данной температуре определяется как отношение давления  $p$  водяных паров при этой температуре к давлению  $p_n$  насыщенных паров, соответствующему рассматриваемой температуре:

$$f = \frac{p}{p_n} 100\%. \quad (3.1)$$

Обычно относительную влажность измеряют в процентах.

При фиксированной температуре давление водяного пара  $p$  пропорционально его плотности  $\rho$ , поэтому вместо формулы (3.1) можно использовать формулу

$$f = \frac{\rho}{\rho_n} 100\%. \quad (3.2)$$

Плотность водяных паров, находящихся в воздухе при данной температуре, называют *абсолютной влажностью* воздуха (для рассматриваемой температуры). Это есть общая масса водяных паров в единице объема воздуха в том или ином конкретном случае. (Ее не надо путать с водностью тумана — общей массой водяных капелек в единице объема; масса пара — это одно, а масса водяных капелек (масса воды) — это, очевидно, другое.) Из (3.2) следует, что относительная влажность воздуха может быть определена как отношение абсолютной влажности к плотности насыщающих паров; все эти три величины ( $f$ ,  $\rho$ ,  $\rho_n$ ) должны соответствовать выбранному значению температуры.

Рассмотрим следующую задачу. В замкнутом объеме  $V=1 \text{ м}^3$  при температуре  $T_1=20^\circ\text{C}$  находится воздух с относительной влажностью  $f_1=60\%$ . Сколько воды надо дополнительно испарить в рассматриваемый объем, чтобы относительная влаж-



ность стала  $f_2=80\%$ ? Выпадет ли роса, если воздух охладить до  $T_2=10^\circ\text{C}$ ?

Пусть  $\rho_1$  — абсолютная влажность при температуре  $T_1$ . После дополнительного испарения воды массы  $m$  абсолютная влажность станет  $\rho_1 + m/V$ . Используя (3.2), запишем:

$$f_1 = \frac{\rho_1}{\rho_n} 100\% ;$$

$$f_2 = \frac{\rho_1 + m/V}{\rho_n} 100\% ,$$

откуда получаем

$$f_2/f_1 = (\rho_1 + m/V) / \rho_1$$

и, следовательно,

$$m = \rho_1 V \frac{f_2 - f_1}{f_1} ,$$

или, иначе,

$$m = \rho_n V \frac{f_2 - f_1}{100\%} . \quad (3.3)$$

Величина  $\rho_n$  здесь есть плотность насыщенного пара при  $T_1=20^\circ\text{C}$ . Согласно графику на рисунке 3.1 она равна  $17,3 \text{ г/м}^3$ . Подставляя это число в (3.3) и используя данные из условия задачи, находим, что  $m=3,5 \text{ г}$ .

Итак, надо дополнительно испарить  $m=3,5 \text{ г}$  воды, чтобы относительная влажность воздуха в нашем объеме поднялась с  $f_1=60\%$  до  $f_2=80\%$ . Теперь масса водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  воздуха составит

$$m' = m + \rho_1 V = m + \rho_n \frac{f_1}{100\%} V ,$$

где  $\rho_n$  — по-прежнему плотность насыщенного пара при  $20^\circ\text{C}$ , равная  $17,3 \text{ г/м}^3$ . Таким образом,

$$m' = (3,5 + 17,3 \cdot 0,6) \text{ г} = 13,9 \text{ г} .$$

Наконец, по графику на рисунке 3.1 находим, что при температуре  $T_2=10^\circ\text{C}$  плотность насыщенного пара составляет  $9,4 \text{ г/м}^3$ . Это меньше, чем  $13,9 \text{ г/м}^3$ . Значит, после рассмотренного дополнительного испарения и после охлаждения пар стал пересыщенным и, следовательно, выпадет роса.

Поставленная задача решена. Но прежде чем с ней расстаться, напомним понятие *точка росы*. Это такая температура, при которой пар, содержащийся в воздухе, оказывается насыщенным. Иначе говоря, если температура есть точка росы, то плотность насыщенного пара есть абсолютная влажность. Значит, график на рисунке 3.1 можно рассматривать двояко: как зависимость плотности насыщенного пара от температуры или как зависимость между точкой росы и абсолютной влажностью. В первом случае по оси абсцисс откладываются значения температуры (в  $^\circ\text{C}$ ), а по оси ординат значения плотности насыщенного пара (в  $\text{г/м}^3$ ). Во втором случае по оси абсцисс откладываются значения точки росы (в  $^\circ\text{C}$ ), а по оси ординат значения абсолютной влажности (в  $\text{г/м}^3$ ).

**Возникновение тумана. Туманы испарения и туманы охлаждения.** В известном смысле возникновение тумана есть явление выпадения росы. Существенно, однако, что выпадение росы происходит в данном случае не на поверхности земли или воды, не на поверхностях листьев или травинок, а в объеме воздуха. При определенных условиях водяные пары, находящиеся в воздухе, частично конденсируются, в результате чего и возникают водяные капельки тумана. Сразу же отметим, что лишь очень небольшая часть массы водяных паров превращается в воду, содержащуюся в капельках тумана. Из графика на рисунке 3.1 видно, что при обычных температурах (близких к  $20^\circ\text{C}$ ) общая масса насыщенных паров в кубометре воздуха составляет

20 г. В то же время водность тумана, как ранее отмечалось, не превышает обычно  $0,1 \text{ г/м}^3$ . Значит, в воду капель тумана конденсируется примерно не более 1% массы водяных паров.

При каких условиях возникает туман? Таких условий два. Во-первых, необходимо, чтобы в воздухе содержалось достаточно большое число так называемых *ядер конденсации* — центров, на которых происходит конденсация пара. Наряду с отдельными молекулами воздуха или пара, а также со случайно образующимися скоплениями молекул, роль ядер конденсации играют ионы, капельки воды, пылинки, частички сажи и вообще всевозможные мелкие загрязнения, которые по тем или иным причинам могут появиться в воздухе. В городском воздухе, вследствие его относительно сильной загрязненности, плотность ядер конденсации в 10...100 раз больше, чем в воздухе сельских, морских, горных районов. Именно поэтому городские туманы отличаются, как правило, более высокой плотностью и устойчивостью.

Во-вторых, для возникновения тумана необходим не просто насыщенный, а *пересыщенный* пар; его плотность должна быть в несколько раз больше плотности насыщенного пара. Для получения пересыщенного пара можно использовать два способа. Они поясняются на рисунке 3.2, где 1 — кривая, фигурировавшая ранее, на рисунке 3.1.

В случае (рис. 3.2, слева) воздух имеет определенную и притом достаточно большую абсолютную влажность  $\rho_0$ ; температура воздуха постепенно понижается.

По достижении температуры

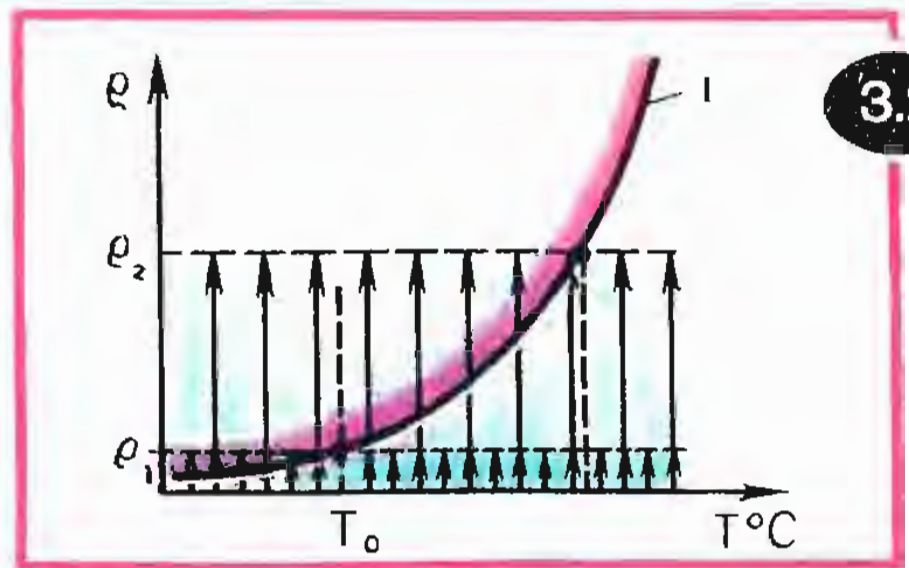
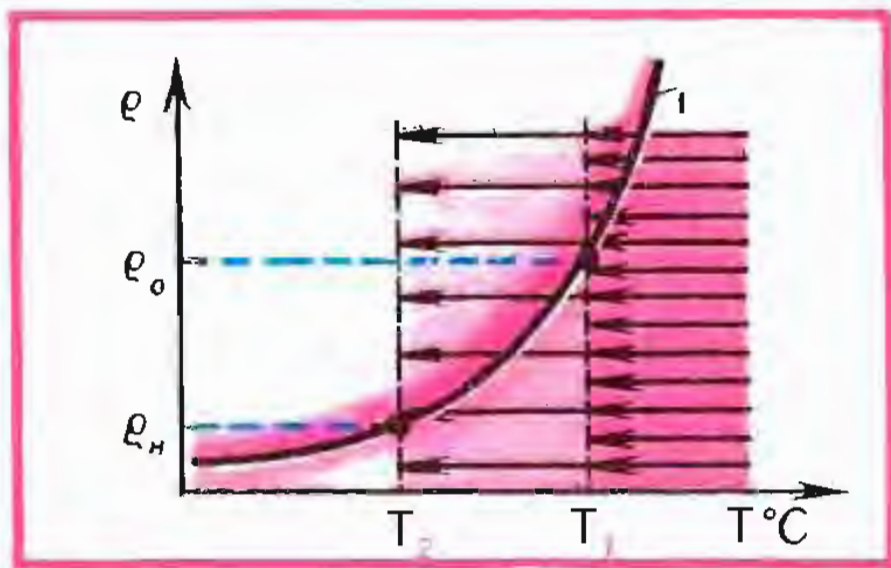
$T=T_1$  (точки росы) пар насыщается; при дальнейшем охлаждении он становится пересыщенным. Следует охлаждать воздух до такой температуры  $T_2$ , чтобы соответствующая ей плотность насыщенного пара  $\rho_n$  оказалась в несколько раз меньше абсолютной влажности  $\rho_0$  (см. рисунок). Выпадающий в рассматриваемом случае туман называют *туманом охлаждения*.

В случае (рис. 3.2, справа) воздух имеет какую-то определенную и притом достаточно низкую температуру  $T_0$ . С относительно теплой поверхности в холодный воздух испаряется дополнительное количество пара — в результате абсолютная влажность воздуха повышается. За счет указанного испарения абсолютная влажность повышается до значения  $\rho_2$ , в несколько раз превышающего значение плотности насыщенного пара  $\rho_1$ , которое соответствует данной температуре  $T_0$ . Выпадающий при этом туман называют *туманом испарения*.

Итак, различные виды туманов можно разделить на две группы — туманы охлаждения и туманы испарения. В связи с этим вернемся к тем пяти конкретным примерам туманов, которые отмечались раньше.

*Первый пример.* Прилегающий к воде остывший утренний воздух имеет более низкую температуру, чем вода. Поэтому с теплой водной поверхности в холодный воздух испаряется дополнительное количество пара. В результате возникает туман испарения.

*Второй пример.* Здесь происходит испарение дополнительного количества пара в относительно холодный воздух (который находится над поверхностью льда) с



3.2

относительно теплой поверхности, какой является в данном случае поверхность открытой воды. Как и в предыдущем примере, мы имеем здесь дело с туманом испарения.

*Третий пример.* Теплый воздух, нагревшийся в первом случае (зимой) над речной водой, а во втором случае (летом) над берегом, обогащается влагой, а затем охлаждается над заснеженным берегом или над морской водой. И в том и в другом случае возникает туман охлаждения.

*Четвертый пример.* Теплые слои воздуха, обогатившиеся влагой, поднимаются вверх и сильно охлаждаются. Возникает туман охлаждения, который затем опускается по склону горы обратно к морю.

*Пятый пример.* Вследствие перехода теплоты от нагретого слоя приповерхностного воздуха к быстро остывшей земле происходит охлаждение воздуха и возникает типичный туман охлаждения.

**Некоторые подробности физики возникновения тумана.** Отметим, что физический механизм образования тумана описан выше лишь в самых общих чертах. В действительности он значительно слож-

нее. Необходимое для образования тумана пересыщение пара зависит от плотности и характера ядер конденсации, а также от температуры. Разделение туманов на туманы испарения и охлаждения достаточно условно; обычно процесс образования тумана включает как охлаждение воздуха, так и испарение в него дополнительного количества пара.

Взять хотя бы обсуждавшийся ранее утренний туман над мелководной бухтой. Мы отнесли его к туманам испарения — с поверхности теплой воды испаряется в остывший воздух дополнительная масса паров. Однако нельзя забывать, что, прежде чем остыть, прилегающий к воде слой воздуха был теплым и поэтому был обогащен влагой. Так что туман начал образовываться уже во время остывания воздуха, а на этой стадии туман следует рассматривать как туман охлаждения.

Достаточно сложен сам процесс формирования тумана, иначе говоря, процесс возникновения и роста водяных капель, взаимодействия их друг с другом. Любопытно, что в процессе формирования тумана относительная влажность воздуха понижается. Это связано с несколькими причинами: некоторым уменьшением абсолютной влажности за счет частичной кон-



денсации пара, повышением плотности насыщенного пара над выпуклой поверхностью (над поверхностью капли), повышением плотности насыщенного пара в результате увеличения температуры вследствие выделения теплоты парообразования при конденсации пара. Поэтому процесс формирования тумана, начавшись, развивается затем отнюдь не лавинообразно, а наоборот, довольно быстро прекращается. Недаром, как мы уже отмечали, в водяные капли тумана конденсируется не более 1% массы паров.

Процесс возникновения и формирования тумана весьма чувствителен к степени пересыщения пара и к плотности ядер конденсации. Обе величины могут меняться как во времени, так и от одной точки пространства к другой; это приводит к соответствующим изменениям во времени и пространстве плотности тумана. В результате туман клубится, волнуется, ползет.

**Туман и цвет.** Цвет тумана определяется световыми волнами, которые, рассеиваясь на капельках воды, попадают в глаз наблюдателя. Капельки диаметром много больше микрометра практически одинаково рассеивают свет во всем интервале длин волн, воспринимаемых глазом. Этим объясняется молочно-белый и белесоватый цвет плотных туманов. Мелкие же капельки, диаметр которых меньше 1 мкм, рассеивают преимущественно более короткие световые волны (в соответствии с законом Рэлея, о котором мы говорили в главе 1). Поэтому не

слишком плотные туманы, а тем более туманная дымка окрашены в синеватые и голубоватые тона. В этой связи напомним описанный в главе 1 опыт Тиндаля (см. рис. 1.4). Теперь читатель легко сообразит, почему солнце, луна, фонари, наблюдаемые сквозь туман, кажутся красноватыми.

Итак, казалось бы, все ясно. Сам туман белый или синеватый, а наблюдаемые сквозь него источники света имеют красные оттенки. Но в природе подчас встречаются довольно неожиданные ситуации. Обратимся в связи с этим к картине Клода Моне, на которой художник изобразил Вестминстерское аббатство в Лондоне. Мы видим его сквозь густой туман, который на картине окрашен в красные и даже багровые тона. Это поначалу вызывало немалое удивление у зрителей, полагавших, что туман не может быть красным. Однако художник оказался прав: он рисовал вечерний туман, а такой туман и в самом деле может быть окрашен в красные тона. Это происходит вследствие рассеяния крупными каплями тумана красных лучей, приходящих к нам от заходящего солнца.

Как уже отмечалось, городские туманы нередко имеют желтоватые оттенки, выглядят серыми, грязными. Это объясняется сильной загрязненностью воздуха многих больших городов, присутствием в нем пыли и частичек сажи. Надо иметь в виду также, что химические соединения, отравляющие воздух городов, растворяясь в каплях тумана, могут окрашивать их в различные цветовые тона, в том числе желтоватые.

# Глава

# 4

# облака

Там щедрым отблеском зари освещены,  
Густые облака, сбегая с вышины,  
Нависли пышными янтарными клубами...

*В. Г. Бенедиктов*







Вышло облачко высоко,  
Стало тонкое, сквозное,  
Улыбнулось одиноко —  
И угасло в ярком зное.

Это стихотворение И. А. Бунина очень лирично. Образ одинокого облака, родившегося и растаявшего на наших глазах, невольно вызывает легкую грусть.

Прекрасное стихотворение посвятил облаку английский поэт П. Шелли. В нем есть выразительные строки:

Я землей рождено, я водой вспоено,  
Вращено средь небесной равнины,  
Отдыхаю в горах, исчезаю в морях;  
Я меняюсь, но нет мне кончины.

В этих строках много не только поэзии. В них хорошо отражена также физика красивого и удивительного явления природы, называемого облаком. Обратимся же теперь к физике облаков, но прежде еще раз внимательно посмотрим на облачное небо.

**Облачное небо.** В толковом словаре В. Даля дано короткое и в то же время достаточно точное определение облака: «Облако — туман в высоте». Как и туман, облако представляет собой взвесь в воздухе мелких и мельчайших капелек воды. Наряду с водяными капельками в облаке могут находиться также мелкие кристаллики льда. Облако может целиком состоять из таких кристалликов.

При всем сходстве с туманом облако все же существенно отличается от него. Это видно уже из того, что существует много видов облаков. Строго говоря, на туман похожи лишь слоистые облака (рис. 4.1,а); они образуются близко от земной поверхности и представляют собой белесые или се-

рые однородные горизонтальные полосы (слои).

Расстояние от земли до облачной полосы не превышает обычно нескольких сотен метров, но может составлять и всего десятки метров. Толщина слоистого облака порядка 100 м...1 км, зато его горизонтальная протяженность может достигать 100 км. Слоистые облака часто возникают на склонах гор. Осадки из слоистых облаков не выпадают, если не считать мелкой мороси.

Значительно более мощные слои образуют слоисто-дождевые облака (рис. 4.1,б). Они темно-серые, плотные, иногда почти черные, с размытой нижней границей. Эти облака могут обкладывать весь небосвод, покрывая его темными пятнами; именно с такими облаками мы и связываем представление о пасмурной погоде.

Расстояние от земной поверхности до слоисто-дождевых облаков обычно составляет примерно 100 м...1 км, толщина облаков порядка километра, горизонтальная протяженность достигает 100...1000 км. Как видно уже из названия, эти облака дают дождь. Облака могут существовать сутки и более; выпадающие из них дожди могут быть длительными, обложными. При определенных условиях из слоисто-дождевых облаков выпадает снег.

В отличие от слоистых облаков, являющихся, как правило, капельными, слоисто-дождевые облака — смешанные: в нижней своей части они состоят из капелек воды, а в верхней — из кристалликов льда.

Как слоистые, так и слоисто-дождевые облака называют облаками нижнего яруса. Над ними

могут находиться облака среднего яруса, к которым относят *высококучевые облака* (рис. 4.1,в). Эти облака имеют обычно вид покрывающих часть небосвода волнистых гряд. Высота их нижней границы 2...5 км, толщина примерно такая же, как у слоистых облаков. Высококучевые облака состоят обычно целиком из ледяных кристалликов. Осадки из этих облаков не выпадают.

Еще более высоко образуются облака верхнего яруса, например *перистые облака* (рис. 4.1,г) — переплетения нежных белых нитей, тонкие белые полосы, которые, сливаясь, образуют силуэты перьев, хвостов и крыльев птиц, рыбьих скелетов и т. п. Высота нижней границы перистых облаков 6...10 км, толщина около километра. Облака состоят из кристалликов и не дают осадков.

Все перечисленные виды облаков имеют общую черту: они сильно развиты в горизонтальном направлении и относительно слабо в вертикальном. Это облачные слои, горизонтальная протяженность которых в сотни и тысячи раз больше их толщины и достигает 100...1000 км. Вертикальные перемещения воздушных масс в таких облаках происходят сравнительно медленно; максимальная вертикальная скорость воздушных потоков не превышает примерно 10...20 см/с. Время существования рассматриваемых облаков измеряется сутками.

Иное дело — облака вертикального развития: *кучевые облака* хорошей погоды (рис. 4.1,г) и *кучево-дождевые облака* (рис. 4.1,е). Нижняя граница этих облаков лежит в нижнем ярусе (на высоте около 1 км), а вершина попадает в верхний ярус. Толщина или, луч-

ше сказать, высота кучевых облаков достигает 5...8 км, а кучево-дождевых 10...15 км. В то же время горизонтальная протяженность обычного кучевого облака составляет всего 1...10 км, а кучево-дождевого — не превышает нескольких десятков километров. В рассматриваемых облаках весьма существенны вертикальные перемещения воздушных масс (с характерными скоростями порядка 10 м/с). В отличие от облаков слоистого характера, кучевые облака существуют недолго; время их жизни измеряется часами, десятками минут.

Кучевые облака хорошей погоды обычно отделены одно от другого. Но возможны и довольно причудливые нагромождения облаков, которые, кстати говоря, любил изображать на своих пейзажах Клод Лоррен. Физические процессы, происходящие в кучевом облаке, обуславливают характерные особенности его внешнего вида — вытянутость в вертикальном направлении, куполообразную вершину, обилие белых клубов («барашков»). При всем том кучевые облака поражают неповторимостью своего вида; ни одно из них не копирует другое.

Кучево-дождевые облака по своему виду похожи на кучевые, но, в отличие от последних, имеют более крупные размеры, более высоки. Внизу они темные, иногда почти черные. Вершина облака часто растекается в горизонтальном направлении, что придает облаку форму наковальни (рис. 4.1,ж). Кучево-дождевые облака смешанные: в нижней части капельные, в верхней ледяные. Они дают сильные ливни и град.

Итак, мы рассмотрели шесть типов облаков — четыре типа об-

Облака верхнего яруса



Перистые облака

Облака среднего яруса



Высококучевые облака

Облака нижнего яруса



Слоисто-дождевые облака



Слоистые облака

ОБЛАНА  
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

4.1



Кучевые облака хорошей погоды



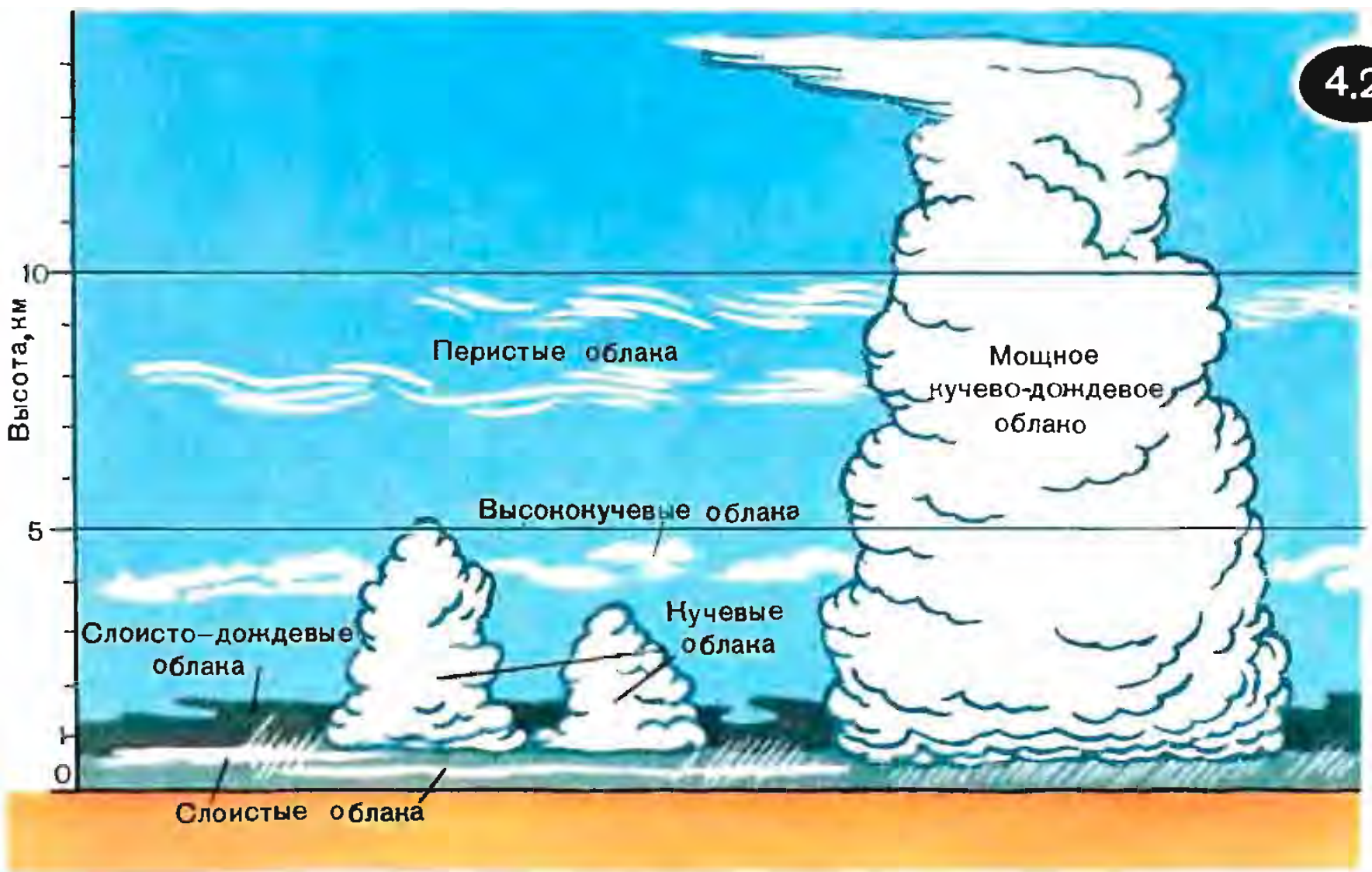
Кучево-дождевое облако



Мощное кучево-дождевое облако

ОБЛАНА  
ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ





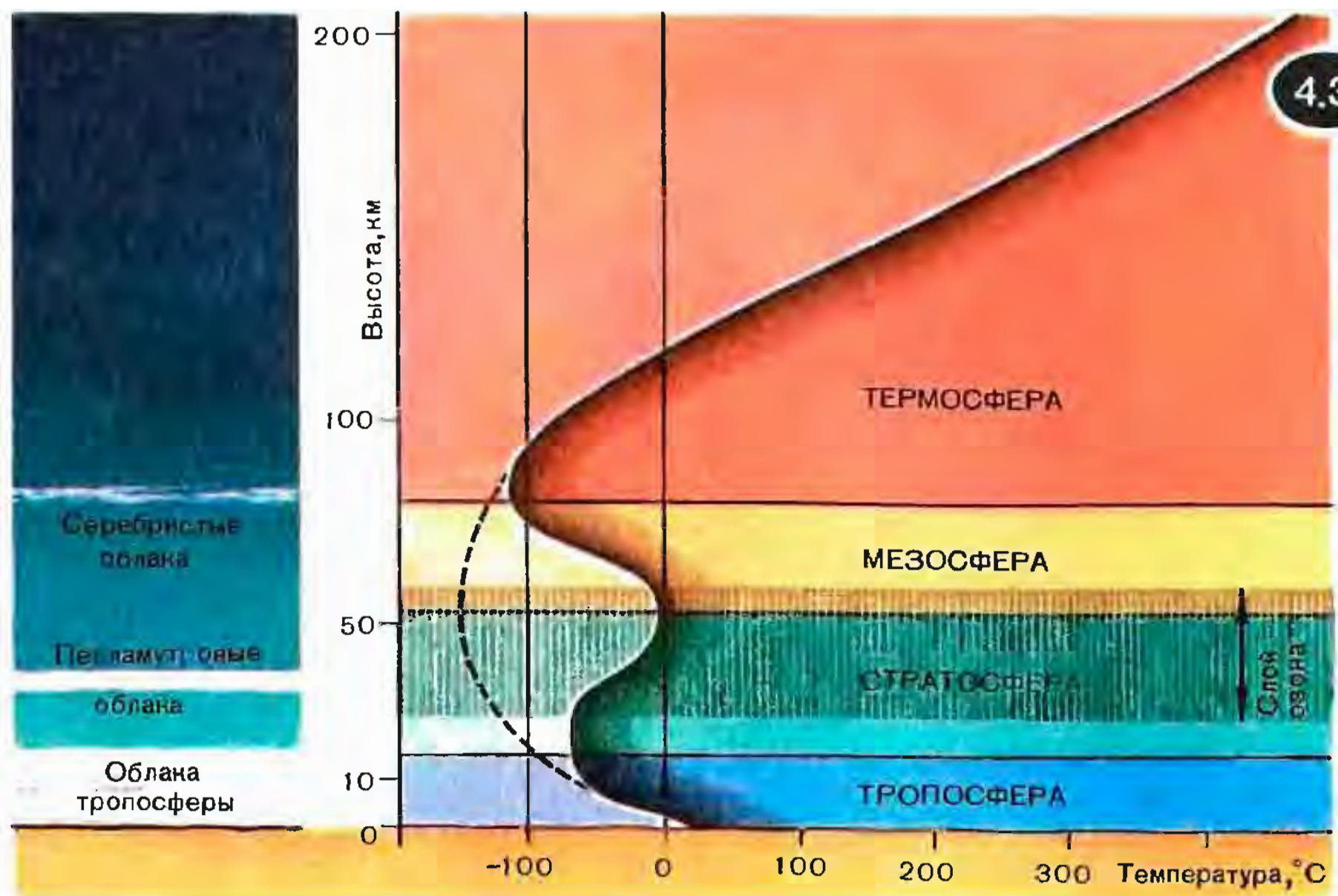
лаков горизонтального развития (слоистые, слоисто-дождевые, высококучевые, перистые) и два типа облаков вертикального развития (кучевые и кучево-дождевые). На рисунке 4.2 перечисленные типы облаков схематически изображены все вместе, что позволяет представить себе в целом структуру облачного покрова. Все эти облака образуются в пределах нижнего слоя атмосферы, называемого тропосферой. В более высоких слоях атмосферы облаков почти нет; лишь на высотах около 30 км можно обнаружить *перламутровые облака* да на высотах около 80 км — *серебристые облака*. Перламутровые облака очень тонкие, они просвечивают; в сумерки вблизи солнца они окрашиваются в красный, золотистый и зеленоватый цвета. Серебристые облака также очень тонкие. Они

светятся серебристым цветом ночью, вскоре после захода солнца или незадолго до восхода. Это рассеянный облаками солнечный свет.

Облака переносятся ветрами на огромные расстояния, в результате чего осуществляется постоянный влагообмен между различными областями нашей планеты. Крайне упрощенная схема влагообмена такова: вода из моря попадает в облака, образующиеся над поверхностью моря, затем ветры переносят эти облака на материк, где они изливаются дождями, наконец, через реки вода возвращается обратно в море.

Облачный покров нашей планеты достаточно велик. Облака покрывают в среднем около половины всего небосвода. В них содержится во взвешенном состоянии  $10^{12}$  кг воды (льда).





**Земная атмосфера.** В известном смысле земную атмосферу можно уподобить слоеному пирогу: она состоит из ряда слоев или, точнее говоря, ряда вложенных одна в другую сфер. Разделение на слои (сферы) проводят, учитывая характер изменения температуры атмосферного воздуха с высотой. На рисунке 4.3 выделены четыре слоя атмосферы: *тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера* — и изображена кривая, отражающая изменение температуры воздуха с высотой.

По мере подъема от поверхности земли температура воздуха сначала убывает. Это известно всем — ведь вершины высоких гор круглый год покрыты снегом и льдами. Тот, кто летал на авиалайнерах, неоднократно слышал сообщения бортпроводниц о том, что температура воздуха за бор-

том самолета 60...70 градусов мороза. Напомним, что современные авиалайнеры летают на высотах 8...10 км.

Не всем, однако, известно, что уменьшение температуры воздуха с высотой происходит лишь до определенных высот: до 17 км над тропиками и 10 км над полярными областями. Эти числа как раз и определяют высоту верхней границы тропосферы (как видим, она зависит от географической широты). Температура воздуха на границе тропосферы составляет над тропиками около  $-75^{\circ}\text{C}$ , а над полюсами около  $-60^{\circ}\text{C}$ .

К тропосфере примыкает стратосфера. В стратосфере температура воздуха при подъеме сначала остается постоянной (до высот 25...30 км), а затем начинает возрастать — вплоть до высоты 55 км, отвечающей верхней границе стра-

тосферы; при этом температура достигает значений, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ . В следующем атмосферном слое — мезосфере — температура снова начинает уменьшаться по мере подъема; она падает до  $-100^{\circ}\text{C}$  и даже до  $-150^{\circ}\text{C}$  на уровне верхней границы мезосферы, имеющей высоту около 80 км. Еще выше начинается термосфера; здесь температура по мере подъема возрастает.

Итак, в тропосфере температура воздуха с высотой уменьшается, в стратосфере температура сначала не меняется, а затем растет, в мезосфере она снова уменьшается и, наконец, в термосфере снова начинает расти. Заметим, что слово «тропосфера» происходит от греческого «тропос», означающего «поворот»; над тропосферой совершается первый поворот температуры. Атмосфера действительно напоминает слоеный пирог: слои, где температура понижается, чередуются со слоями, где она повышается.

Происхождение такого «слоеного пирога» нетрудно объяснить. Ведь снизу атмосфера подогревается земной поверхностью, а сверху солнечным излучением; поэтому ее температура должна возрастать при приближении как к поверхности земли, так и к верхней границе атмосферы. В результате температурная кривая должна, казалось бы, иметь вид, показанный на рисунке 4.3 пунктиром. В действительности же температура изменяется с высотой не по пунктирной, а по непрерывной линии и обнаруживает некоторое увеличение в области стратосферы. Это повышение температуры вызвано поглощением ультрафиолетовой составляющей солнечного излучения в слое озо-

на ( $\text{O}_3$ ), который занимает интервал высот примерно от 20 до 60 км.

Для образования облаков надо, чтобы воздух был влажным (или, во всяком случае, не слишком сухим) и чтобы происходило достаточно сильное понижение температуры воздуха. Наиболее влажен воздух вблизи земной поверхности, в тропосфере. К тому же в тропосфере температура воздуха с высотой уменьшается. Поэтому неудивительно, что почти весь облачный покров Земли сосредоточен в пределах тропосферы. Серебристые облака образуются значительно выше тропосферы — вблизи верхней границы мезосферы. Существенно, что на этих высотах температурная кривая проходит через очередной и притом относительно сильный минимум. Отметим, что на высотах вблизи максимума температурной кривой (на границе стратосферы и мезосферы) облака никогда не наблюдаются.

Посмотрев на рисунок 4.3, читатель может заключить, что на высоте 200 км температура воздуха становится равной  $400^{\circ}\text{C}$ . А как же быть с «космическим холодом»? Недоумение читателя, возможно, возрастет еще более, если мы сообщим, что на высоте 400 км температура атмосферы достигает уже  $1000^{\circ}\text{C}$ . А между тем на этих высотах летают космические корабли, космонавты выходят в открытый космос, и ничего страшного в столь ужасной «жаре» с ними не происходит. Дело в том, что на больших высотах атмосфера становится крайне разреженной. Так, на высоте 400 км давление воздуха равно всего  $10^{-8}$  мм рт. ст., что соответствует глубочайшему вакууму. При столь огромном разрежении гигантская



кинетическая энергия молекул атмосферного воздуха (отвечающая температуре  $1000^\circ\text{C}$ ) не может причинить вреда космонавтам, поскольку самих-то молекул крайне мало.

**Адиабатное расширение газа.** Одним из главных процессов, приводящих к образованию облака, является процесс *адиабатного расширения воздуха при его подъеме над поверхностью земли.*

Предположим, что некоторая масса газа (в частности, воздуха) расширяется. При этом газ совершает работу  $A$  против сил внешнего давления. Пусть  $Q$  — теплота, которую получает извне газ в процессе расширения. Совершенная газом работа  $A$  и полученная им теплота  $Q$  определяют изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$ :

$$\Delta U = Q - A. \quad 4.1$$

Это есть первое начало термодинамики; оно представляет собой не что иное, как закон сохранения энергии для рассматриваемой массы газа.

Изменение внутренней энергии газа связано с изменением его температуры. Пусть  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно начальная и конечная абсолютные температуры газа. Будем полагать, что газ состоит из двухатомных молекул и что его молярная масса есть  $\mu$  (для воздуха можно принять  $\mu = 29$  кг/кмоль). Для такого газа

$$\Delta U = \frac{5}{2} \frac{MR(T_2 - T_1)}{\mu}, \quad (4.2)$$

где  $M$  — масса газа,  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $R = 8,3 \cdot 10^3$  Дж/(кмоль·К).

Если  $Q > A$ , то  $\Delta U > 0$ . В этом случае  $T_2 > T_1$ , следовательно, газ

при расширении нагревается. Если  $Q = A$ , то  $\Delta U = 0$ . В этом случае  $T_2 = T_1$  — температура расширяющегося газа остается неизменной (*изотермическое расширение*).

Для нас интересен случай, когда можно принять  $Q = 0$ , т. е. когда можно пренебречь теплообменом между газом и окружающей его средой. В данном случае соотношение (4.1) принимает вид

$$\Delta U = -A. \quad (4.3)$$

Видно, что теперь  $\Delta U < 0$  и, следовательно,  $T_2 < T_1$  — газ при расширении охлаждается. Рассматриваемый процесс называют *адиабатным расширением* газа. При таком расширении газ не получает теплоты извне и поэтому совершает работу только за счет собственной внутренней энергии (в результате чего и охлаждается). Подставляя (4.2) в (4.3), получаем формулу, связывающую уменьшение температуры адиабатно расширяющегося двухатомного газа и работу, совершенную газом:

$$T_1 - T_2 = \frac{2}{5} \frac{\mu A}{MR}. \quad (4.4)$$

Приведем без вывода формулу для работы адиабатно расширяющегося двухатомного газа:

$$A = \frac{5}{2} \frac{M}{\mu} RT_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{7}} \right]. \quad (4.5)$$

Здесь  $p_1$  и  $T_1$  — начальное давление и начальная температура газа, а  $p_2$  — его конечное давление.

Решим задачу. *Найти уменьшение температуры адиабатно расширяющегося воздуха при его подъеме на высоту 1 км, если известно, что начальная температура воздуха  $27^\circ\text{C}$  и что давление воздуха на указанной высоте составляет 0,9 от давления у поверхности.*

Согласно условию задачи,  $\frac{p_2}{p_1} = 0,9$ .

Чтобы вычислить  $0,9^{2/7}$ , представим:  $0,9^{2/7} = (1 - 0,1)^{2/7}$  и воспользуемся приближенным соотношением:  $(1 - \alpha)^{\beta} = 1 - \beta\alpha$ , справедливым, когда  $\alpha \ll 1$ .

В результате находим:

$0,9^{2/7} = 1 - 0,1 \cdot \frac{2}{7} = 1 - 0,03$ , после чего

выражение (4.5) преобразуется к виду

$$A = \frac{5}{2} \frac{0,03 MRT_1}{\mu}. \quad (4.6)$$

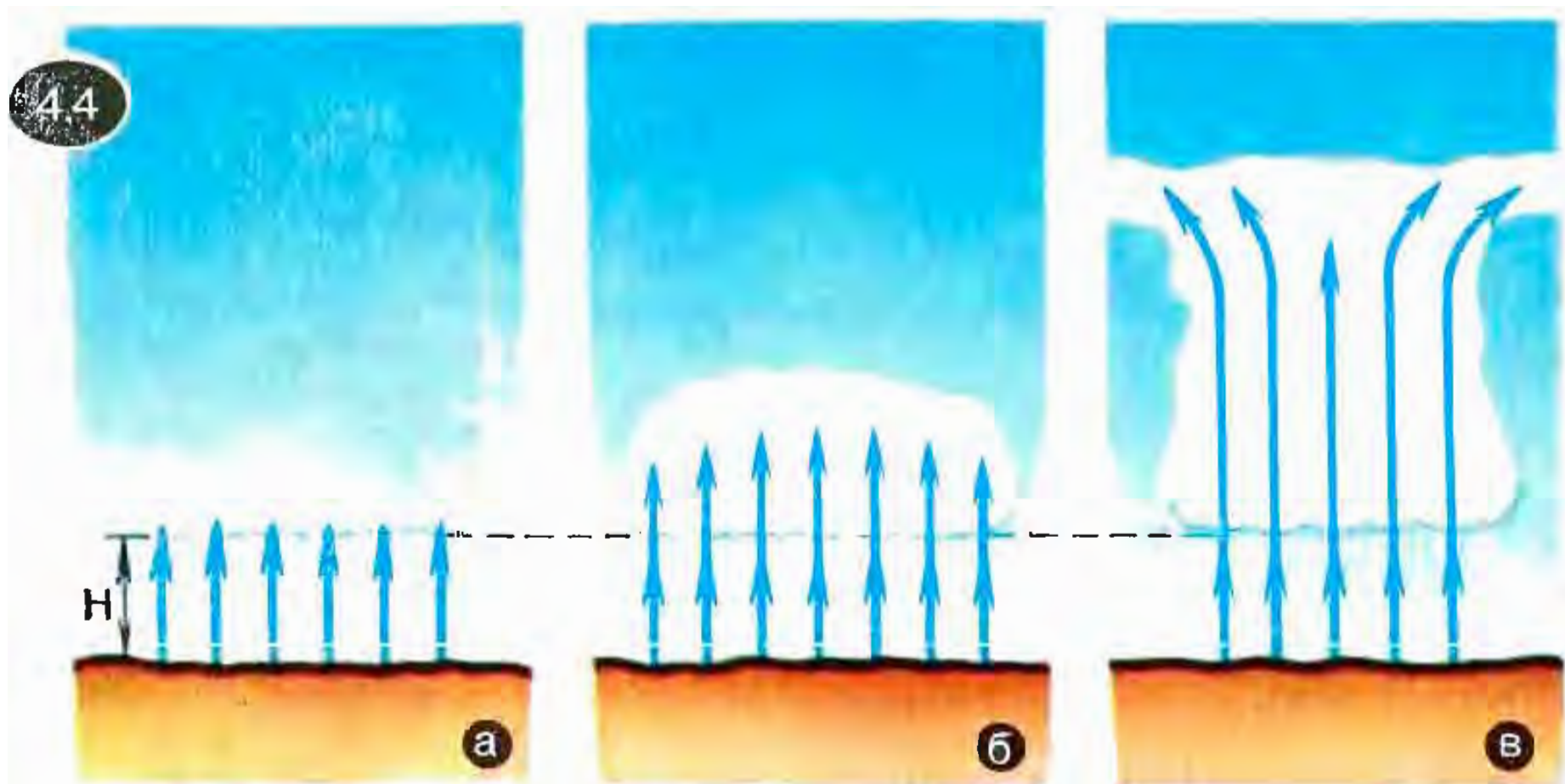
Подставляя (4.6) в (4.4), находим  $T_1 - T_2 = 0,03 T_1$ . Так как  $T_1 = 300$  К, то отсюда следует, что  $T_1 - T_2 = 9$  К. Итак, за счет адиабатного расширения воздух при подъеме на 1 км охлаждается на 9 градусов.

**Как образуются облака.** Процесс образования облака начинается с того, что некоторая масса достаточно влажного воздуха поднимается вверх. По мере подъема будет происходить *расширение воздуха*. Это расширение можно считать *адиабатным*, так как воздух поднимается относительно быстро, и при достаточно боль-

шом его объеме (а в образовании облака принимает участие действительно большой объем воздуха) теплообмен между рассматриваемым воздухом и окружающей средой за время подъема попросту не успевает произойти.

Как мы уже знаем, при адиабатном расширении газа его температура понижается. Значит, *поднимающийся вверх влажный воздух будет охлаждаться*. Когда температура охлаждающегося воздуха понизится до точки росы, станет возможным процесс *конденсации пара*, содержащегося в воздухе. При наличии в атмосфере достаточного количества ядер конденсации этот процесс действительно начинается. Если ядер конденсации в атмосфере мало, конденсация начинается не при температуре, равной точке росы, а при более низких температурах (напомним замечания, касавшиеся образования тумана, — см. предыдущую главу).

Итак, достигнув некоторой высоты  $H$ , поднимающийся влажный воздух охладится (в результате





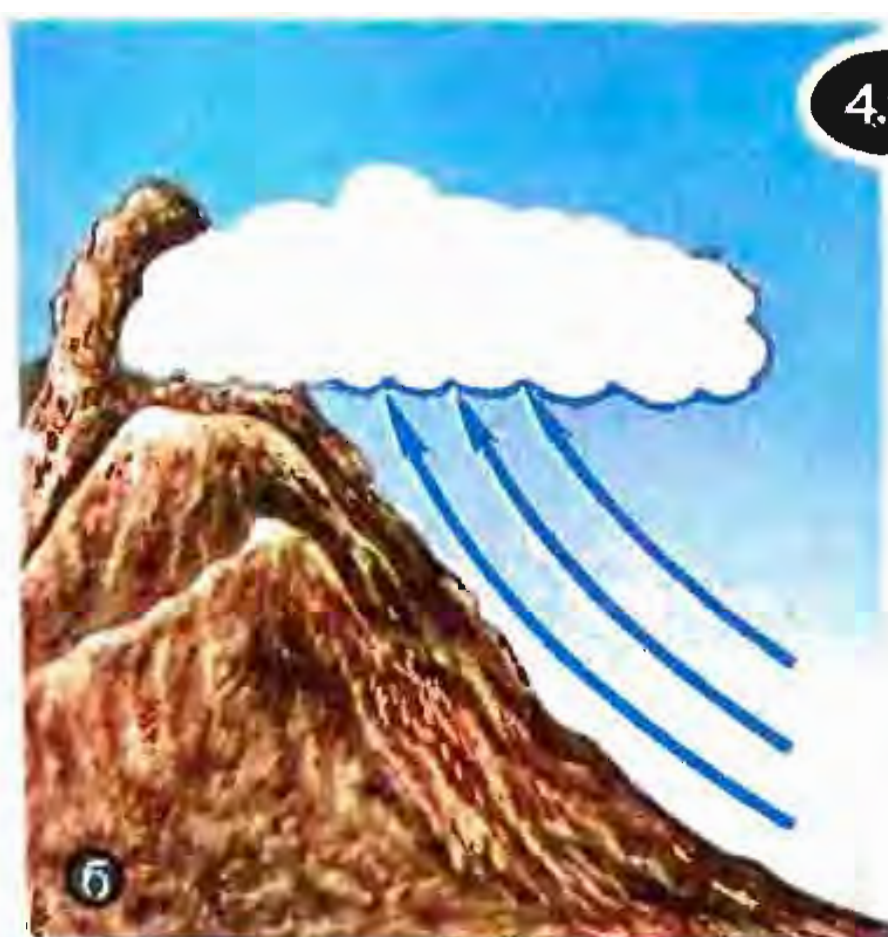
адиабатного расширения) настолько, что начнется конденсация водяных паров. Высота  $H$  есть *нижняя граница* формирующегося облака (рис. 4.4,а). Продолжающийся поступать снизу воздух проходит сквозь эту границу, и процесс конденсации паров будет происходить уже выше указанной границы — облако начнет развиваться в высоту (рис. 4.4,б). Вертикальное развитие облака прекратится тогда, когда воздух перестанет подниматься; при этом сформируется *верхняя граница* облака (рис. 4.4,в).

Теперь рассмотрим, что же заставляет воздух подниматься вверх. Во-первых, подъем воздушных масс может происходить вследствие *конвекции* — когда в жаркий день солнечные лучи сильно прогреют земную поверхность и она передаст теплоту приземным слоям воздуха (рис. 4.5,а). В этом случае говорят об облаках *конвекционного* происхождения. Кучевые облака имеют чаще всего именно такое происхождение.

Во-вторых, дующий по горизонтальному направлению, вдоль

поверхности земли ветер может встретить на своем пути горы или иные природные возвышения. Обтекая их, ветер переместит вверх воздушные массы (рис. 4.5,б). Образующиеся в данном случае облака называют облаками *орографического* происхождения. Такое происхождение могут иметь слоистые и слоисто-дождевые облака.

В третьих, облака образуются на теплых и холодных фронтах. Если массы теплого воздуха, перемещаясь в горизонтальном направлении, теснят холодный воздух, возникает так называемый *теплый фронт*. Если же наступающий холодный воздух движется быстрее отступающего теплого, то говорят о *холодном фронте*. Теплый фронт изображен схематически на рисунке 4.6,а, где красными стрелками показаны перемещения теплого воздуха, а синими — холодного. Вблизи границы между теплой и холодной воздушными массами возникают восходящие потоки воздуха (как теплого, так и холодного). В результате могут образоваться облака гори-







4.6

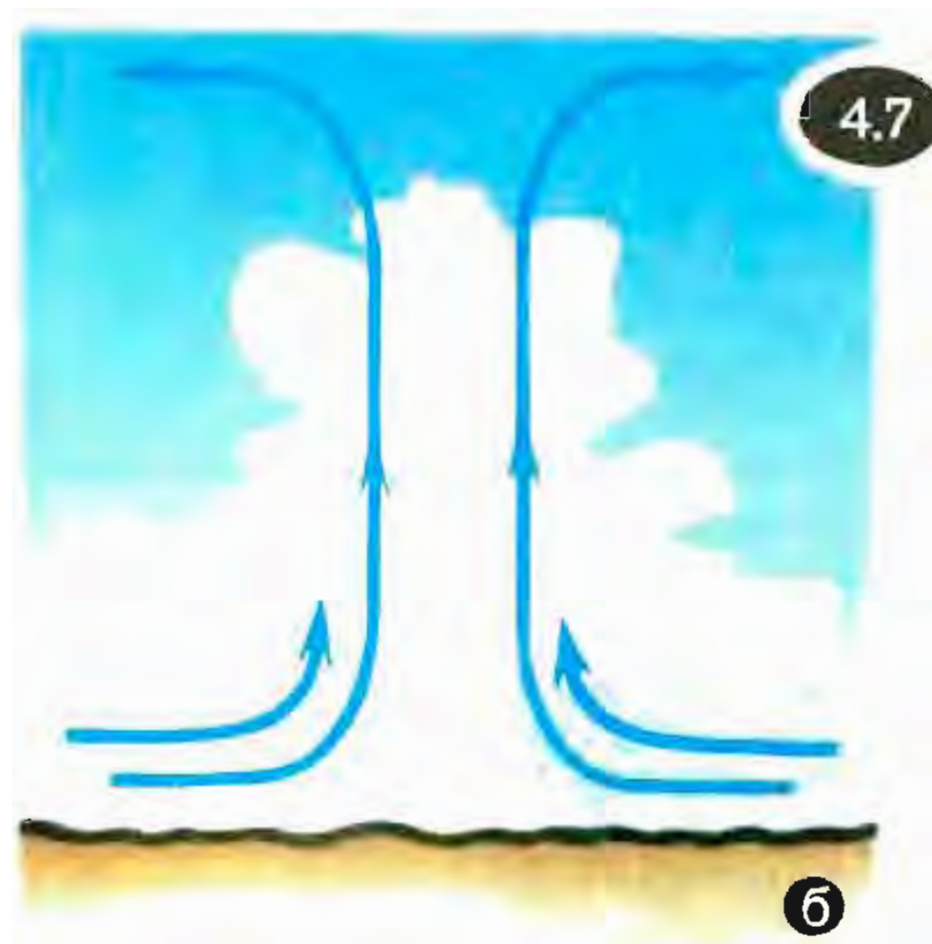
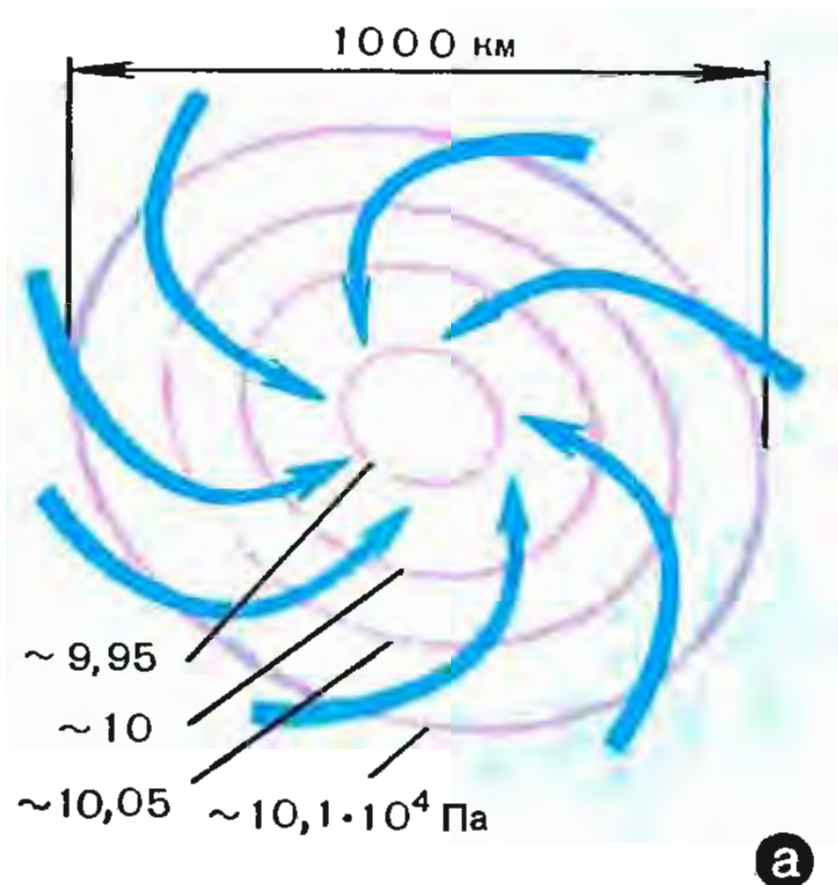
зонтального развития всех ярусов — слоисто-дождевые, высококучевые, перистые. На рисунке 4.6,б показан холодный фронт. Здесь образуются восходящие потоки только теплого воздуха. При этом формируются, как и на теплом фронте, облака всех ярусов. Итак, на теплом фронте наступающий теплый воздух как бы «наваливается» на стелющийся понизу холодный воздух и по нему поднимается вверх. На холодном же фронте наступающий холодный воздух проникает под теплый воздух и как бы приподнимает его.

В-четвертых, вертикальные перемещения воздушных масс могут быть связаны с циклонической деятельностью, которая, в свою очередь, связана с взаимодействием теплых и холодных фронтов. Циклоны и антициклоны представляют собой мощные атмосферные вихри диаметром до нескольких тысяч километров и высотой 10...20 км. Вблизи поверхности земли ветры направляются от периферии к центру циклона, поскольку в центре циклона дав-

ление воздуха меньше, чем на его периферии. В Северном полушарии ветры «закручиваются» к центру циклона *против часовой стрелки*, а в Южном — *по часовой стрелке*. На рисунке 4.7,а изображены изобары циклона у поверхности земли; стрелками показано направление ветров (для Северного полушария). Стекающиеся к центру циклона воздушные массы устремляются затем вертикально вверх (рис. 4.7,б). Это приводит к образованию мощных слоистых и слоисто-дождевых облаков, выпадают осадки. В верхней тропосфере возникают горизонтальные ветры, направленные по спирали от центра циклона; они выносят к его периферии воздушные массы, захваченные циклоном. Зарождение или приход уже сформировавшегося циклона всегда приводит к значительному ухудшению погоды, сопровождается длительными дождями.

Приближение центральной области циклона мы чувствуем по понижению атмосферного давления. Мы говорим: «Давление упа-





ло — пойдут дожди, будет пасмурно».

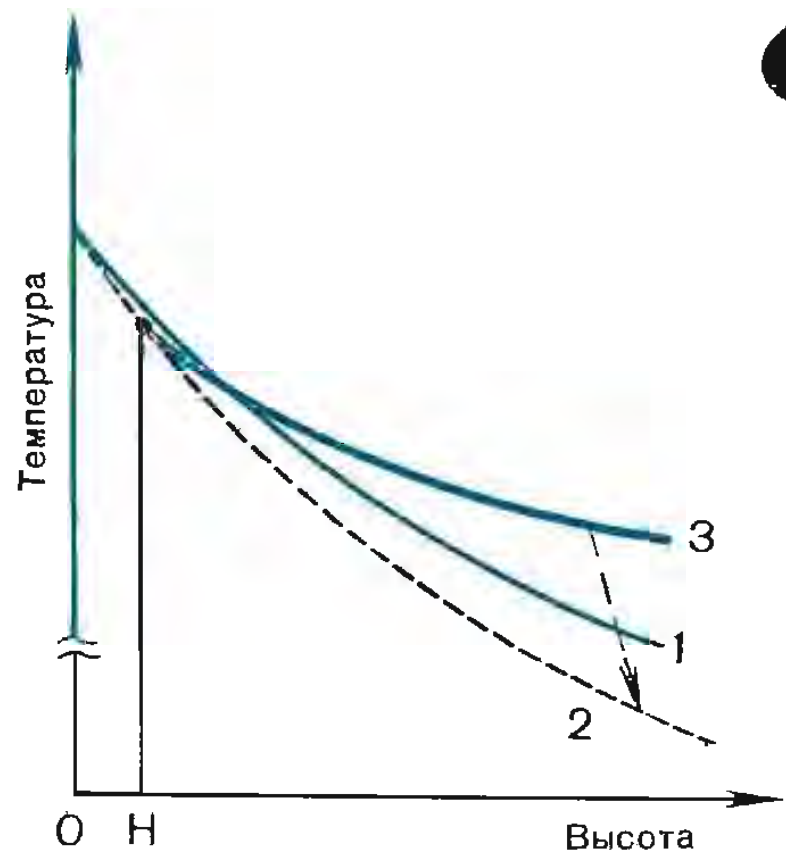
Заметим, что для антициклонов характерна обратная картина процессов. В центре антициклона давление выше, чем на периферии. В верхней тропосфере ветры «закручиваются» к центру антициклона, а вблизи земной поверхности — от центра; в центре возникают мощные нисходящие потоки воздуха. Опускающийся вниз воздух нагревается, относительная влажность уменьшается, облачность исчезает — устанавливается ясная погода. Недаром повышение атмосферного давления мы справедливо связываем с улучшением погоды.

**Кучевое облако.** Остановимся немного подробнее на физике процессов, приводящих к образованию обычного кучевого облака конвекционного происхождения. Такое облако имеет значительные вертикальные размеры, указывающие на то, что конвекционные потоки могут подниматься на боль-

шую высоту — значительно выше нижней границы облака. Для объяснения обратимся к рисунку 4.8. На нем приведены (сугубо качественно) три зависимости температуры воздуха от высоты. Зависимость 1 относится к воздуху, не участвующему в образовании облака. Этот воздух окружает облако с боков; будем считать, что в нем нет вертикальных потоков. Падение температуры с высотой отражает в данном случае естественный ход температурной кривой в пределах тропосферы (см. рис. 4.3). Зависимость 2 относится к поднимающемуся (и, следовательно, адиабатно расширяющемуся) сухому воздуху. При адиабатном расширении воздух охлаждается, поэтому температурная кривая 2 опускается более круто, чем кривая 1. Следует, однако, иметь в виду, что в действительности вверх поднимается не сухой, а влажный воздух; в результате охлаждения воздуха содержащийся в нем пар будет конденсироваться (начиная с некоторой высоты  $H$ , фиксирующей

нижнюю границу облака). При конденсации пара выделяется скрытая теплота парообразования. Количество выделившейся теплоты оказывается довольно заметным. Это приводит к тому, что температура поднимающегося влажного воздуха будет понижаться с высотой медленнее, чем даже температура неподвижного воздуха (температурная кривая 3). Данное обстоятельство является весьма важным. В самом деле, с учетом конденсации паров температура поднимающегося воздуха понижается, оставаясь в то же время выше температуры окружающего неподвижного воздуха. Тот факт, что охлаждающийся воздух остается более нагретым, чем окружающая его среда, обеспечивает способность продолжать подъем все выше и выше. В результате и происходит существенное развитие облака в вертикальном направлении.

Конечно, такое развитие не может быть неограниченным. По мере того как конденсируются водяные пары, воздух становится все менее влажным; он все более подсушивается. Поэтому температурная зависимость 3 уже не реализуется; происходит переход к зависимости 2, отвечающей сухому воздуху (этот переход условно показан на рисунке 4.8 штриховой стрелкой). Вследствие такого перехода температура поднимающегося воздуха на какой-то высоте сравняется с температурой окружающего воздуха и даже окажется немного ниже ее. В результате вертикальное развитие облака прекратится; холодные массы воздуха, отдавшего свою влагу в облако, начнут растекаться в стороны и опускаться вниз вокруг кучевого облака, формируя харак-



терные для таких облаков барашки (рис. 4.9).

Рассмотрим задачу. Будем исходить из условия предыдущей задачи, полагая теперь, что в процессе подъема и охлаждения воздуха происходит конденсация некоторого количества содержащихся в воздухе паров. Примем, что масса  $m$  сконденсировавшегося пара в 1000 раз меньше массы воздуха  $M$ . Удельная теплота парообразования  $\lambda = 2,5 \cdot 10^6$  Дж/кг. Вместо соотношения (4.1) в данном случае надо использовать соотношение

$$\Delta U = -A + \lambda m, \quad (4.7)$$

учитывающее выделение при конденсации пара скрытой теплоты парообразования.

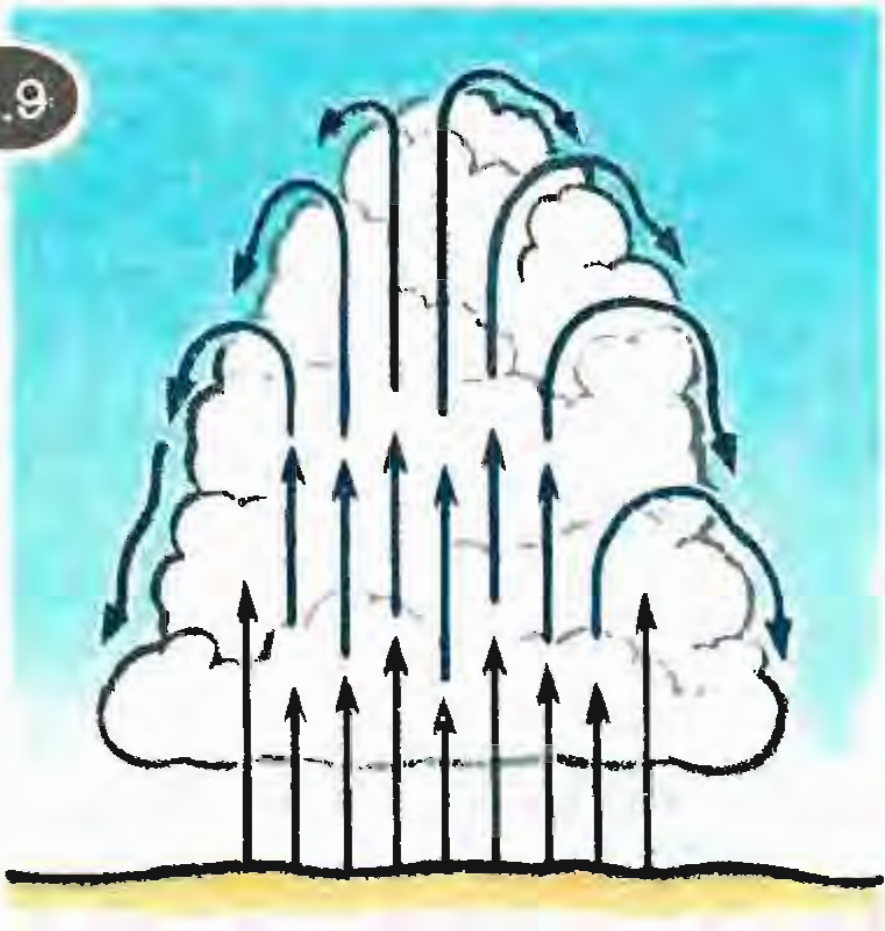
Теперь вместо (4.4) имеем:

$$T_1 - T_2 = \frac{2}{5} \mu \frac{(A - \lambda m)}{MR}. \quad (4.8)$$

Подставляя (4.6) в (4.8) и учитывая, что  $m = 10^{-3} M$ , находим

$$T_1 - T_2 = \frac{2}{5} \frac{\mu}{MR} \left( \frac{5}{2} \frac{M}{\mu} RT_1 \cdot 0,03 - 10^{-3} \lambda M \right)$$





или, с учетом результата, полученного при решении предыдущей задачи,

$$T_1 - T_2 \left( 9 - \frac{2}{5} \frac{\mu}{R} \lambda \cdot 10^{-3} \right) \text{ К.}$$

Напомним, что  $\mu = 29$  кг/кмоль,  $R = 8,3 \cdot 10^3$  Дж/(кмоль·К). Используя значения постоянных, получаем:

$$\frac{2}{5} \frac{\mu}{R} \lambda \cdot 10^{-3} = 3,5 \text{ К.}$$

Таким образом,  $T_1 - T_2 = 5,5$  К.

**Микрофизика облаков.** Различают микрофизику и макрофизику облаков. *Макрофизика* изучает перемещения воздушных масс, приводящие к образованию, росту и испарению облака в целом. *Микрофизика* рассматривает микроструктуру облака, исследует процессы образования, слияния, испарения водяных капель. В частности, микрофизика изучает условия формирования тех или иных осадков.

Как мы уже отмечали, облака могут состоять из капелек воды (водяные, или капельные облака),

ледяных кристалликов (ледяные, или кристаллические облака), а также одновременно из капель и из кристалликов (смешанные облака). Водяные облака существуют не только при плюсовой температуре, но и при температурах ниже нуля (примерно до  $-20$  °С) — это переохлажденные водяные облака. Например, при  $-10$  °С облака в 50% случаев водяные, в 30% смешанные и только в 20% ледяные.

Водяные капли в облаке имеют различные диаметры — от долей микрометра до нескольких миллиметров. Ледяные кристаллики облака чаще всего имеют форму шестигранных призм-столбиков длиной порядка 0,1 мм и шестигугольных пластинок размером 0,1...0,5 мм.

Как бы ни была мала ледяная капля, она все же существенно тяжелее воздуха. Поэтому возникает естественный вопрос: каким образом водяные капли (а вместе с тем и облако в целом) удерживаются в воздухе? Одновременно возникает и другой вопрос: при каких условиях водяные капли перестают удерживаться в воздухе и падают на землю в виде дождя?

Начнем с наиболее мелких капелек, радиус которых составляет доли микрометра. Таким капелькам не дают падать вниз беспорядочные удары со стороны молекул воздуха, находящихся в хаотичном тепловом движении. Эти удары вынуждают капельку отскакивать в самых различных направлениях; в итоге она движется по причудливо изломанной траектории. Такое движение называют *броуновским* — по имени английского ботаника Р. Броуна, открывшего его в 1828 г. (Броун наблюдал движение очень мелких твер-

дых частичек, взвешенных в жидкости; частички двигались под действием ударов со стороны молекул жидкости.)

Чем массивнее капля, тем труднее молекулам воздуха отбросить ее и, следовательно, тем меньше роль броуновского движения, но больше влияние земного притяжения. Когда радиус капли становится больше микрометра, ее движение перестает быть броуновским; капля начинает падать под действием силы тяжести. И тогда «вступает в игру» новый фактор, препятствующий падению капли вниз, — *сопротивление воздушной среды*. Представим себе, что в какой-то момент времени в некоторой точке пространства над земной поверхностью образовалась водяная капля радиусом  $R$  (пусть, например,  $R=10$  мкм). В этот момент времени на каплю действует только сила тяжести  $P$ . Если  $\rho_0$  — плотность воды,  $g$  — ускорение свободного падения, то

$$P = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0 g \quad (4.9)$$

( $\frac{4}{3} \pi R^3$  — объем капли). Под действием *силы тяжести* капля начинает падать вниз, ее скорость начинает расти. Одновременно возникает и начинает расти действующая на каплю *сила сопротивления* воздуха  $F$ . Она направлена противоположно силе тяжести и пропорциональна скорости капли  $v$ :

$$F = 6\pi\eta Rv, \quad (4.10)$$

где  $\eta$  — коэффициент, определяющий вязкость воздуха. (*Вязкость*, или, иначе, *внутреннее трение* — свойство газов и жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно

другой; по этой причине, например, скорость газового или жидкого потока в трубе уменьшается при переходе от оси трубы к ее стенкам.) По мере возрастания силы сопротивления  $F$  уменьшается разность  $R-F$ , поэтому скорость падающей капли нарастает все медленнее. *Когда сила сопротивления воздуха сравняется по модулю с силой тяжести, дальнейшее увеличение скорости капли прекратится*, и далее капля будет падать равномерно (ведь теперь равнодействующая сила, приложенная к капле, равна нулю:  $P-F=0$ ). Скорость равномерного движения капли  $v_p$  определяется из условия  $P-F=0$  с учетом (4.9) и (4.10):

$$v_p = \frac{2}{9} \frac{\rho_0 g R^2}{\eta}. \quad (4.11)$$

Равномерно падающая капля может быть остановлена и даже подброшена вверх восходящим потоком воздуха, если вертикальная скорость потока больше скорости капли  $v_p$ .

Решим задачу. В облаке существуют восходящий поток воздуха, имеющий скорость  $v_0=0,1$  м/с. Будет ли падать вниз капля радиусом 10 мкм? Тот же вопрос относится к капле радиусом 50 мкм. Вязкость воздуха  $\eta$  принять равной  $1,8 \cdot 10^{-5}$  кг/м · с).

Используя формулу (4.11), где  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup>,  $\rho_0=10^3$  кг/м<sup>3</sup>, находим скорости равномерного падения рассматриваемых капель. Для первой капли эта скорость оказывается равной  $1,2 \cdot 10^{-2}$  м/с, а для второй 0,3 м/с. Сравнивая эти значения с  $v_0$ , заключаем, что первая капля будет удерживаться в облаке, а вторая будет падать вниз.

Заметим, что хотя вторая капля из рассмотренной задачи должна падать вниз, однако это еще не

означает, что она обязательно достигнет поверхности земли. В процессе падения капля может испариться. Это, очевидно, надо рассматривать как еще один фактор, препятствующий опусканию облака на землю, ведь получившийся в результате испарения водяной пар поднимется вверх и там снова сконденсируется.

Мы видим, таким образом, что совсем не просто ответить на вопрос, почему облако не падает на землю. Здесь надо учитывать многое: *тепловое движение молекул воздуха, сопротивление воздуха, испарение капель*. Надо принимать во внимание также и ряд других факторов. Так, следует иметь в виду, что с увеличением радиуса капли сила сопротивления воздуха начинает играть все более существенную роль из-за того, что относительно большие капли (радиусом более 100 мкм) при своем падении вызывают турбулентные движения в воздушной среде. Надо учитывать также, что в процессе падения радиус капли вовсе не остается неизменным: наряду с испарением происходит дополнительная конденсация пара на поверхности капли, увеличивающая ее радиус. Возможно также слияние данной капли с другими каплями или, напротив, раздробление ее на несколько более мелких капель. Одним словом, микрофизика облака оказывается достаточно сложной.

**Осадки.** При определенных условиях из облаков выпадают осадки в виде *дождя, снега или града*. Мы уже отмечали, что дождь выпадает из слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаков. В первом случае дождь обычно идет дол-

го — часами, а то и целые сутки, временами почти прекращаясь, затем снова усиливаясь. Во втором случае дождь, как правило, имеет характер кратковременного (десятки минут) интенсивного ливня. Радиусы дождевых капель у земной поверхности оказываются в пределах примерно от 0,02 см (мелкий дождик из слоисто-дождевого облака) до 0,5 см (сильный ливень из кучево-дождевого облака).

Нетрудно понять, почему из слоисто-дождевых облаков выпадает обычно мелкокапельный дождь, тогда как кучево-дождевые облака могут давать ливни из относительно крупных капель. Напомним, что кучево-дождевое облако сильно развито в вертикальном направлении (до 10 км), в нем возникают мощные восходящие потоки воздуха, характеризующиеся скоростями порядка 10 м/с. В этих условиях мелкие капельки просто не могут достичь земли — они либо испаряются по дороге, либо отбрасываются вверх восходящими потоками. В данном случае необходимо, чтобы возникли достаточно крупные капли. Благодаря большой толщине облака такие капли действительно возникают. Процесс их возникновения можно представить следующим образом. Ледяные кристаллики из верхней части облака, падая вниз, превращаются сначала в снежные хлопья, а затем в сравнительно крупные капли. Продолжая падать сквозь толщу облака, эти капли растут за счет дополнительной конденсации пара и слияния с другими каплями.

Иное дело — дождь из слоисто-дождевых облаков. Относительно небольшая толщина таких облаков не позволяет каплям существенно



увеличиться во время падения внутри облака. Впрочем, в данном случае для выпадения дождя этого и не нужно. Когда небо затянуто слоисто-дождевыми облаками, нет мощных восходящих потоков воздуха, существующие потоки характеризуются вертикальными скоростями порядка всего 10 см/с (в 100 раз меньше, чем в кучево-дождевых облаках). Поэтому уже сравнительно мелкие капельки способны достигать поверхности земли.

Из кучево-дождевых облаков наряду с дождем может выпадать также *град* — наиболее интересный вид осадков, доставляющий нередко большие неприятности. Сильный град калечит плодовые деревья и кустарники, уничтожает посевы и даже способен разрушать строения, убивать людей и животных. Обычно град выпадает при сильной грозе в летнее время года, когда температура воздуха у поверхности земли выше 20 °С и возникают особенно мощные восходящие потоки воздуха. *Градины* представляют собой льдышки размерами от миллиметра до нескольких сантиметров (в отдельных случаях до десятков сантиметров). Градина часто состоит из нескольких чередующихся слоев прозрачного и непрозрачного (белого) льда; толщина отдельного слоя не менее 1 мм. Вид такой градины в разрезе дан справа на с. 57.

Ледяные кристаллики — зародыши градин — образуются на высотах 8...10 км, где температура понижается до —40 °С. Падая вниз и сталкиваясь с переохлажденными водяными каплями, они обрастают льдом, увеличиваются. В нижней части облака они подтаивают; там возникают крупные

дождевые капли в окружении мелких градин. Мощные восходящие воздушные потоки забрасывают мелкие градины в верхнюю часть облака, где те повторно обрастают льдом. Затем градины снова падают вниз и снова могут быть возвращены вверх восходящими потоками. Так повторяется несколько раз, пока градины не станут достаточно тяжелыми. Чередующиеся процессы нарастания льда и подтаивания как раз и приводят к возникновению образующих градину слоев льда разной степени прозрачности.

**Серебристые облака.** Заканчивая беседу об облаках, отметим особо один из наиболее удивительных видов облаков — *серебристые облака* (рис. 4.10).

«Над горизонтом быстро поднимаются тонкие серебристые полосы. Они напоминают слоеный пирог: слой яркий, слой темный. Протяженность их значительна», — такой текст был передан на Землю с борта советской орбитальной станции «Салют-6» в январе 1978 г. Текст относился к серебристым облакам; они наблюдались, когда орбитальная станция находилась над Южным полушарием.

Впервые серебристые облака наблюдал приват-доцент Московского университета В. К. Цераский ранним утром 12 июня 1885 г. Возвращаясь с прогулки, он заметил на предрассветном небе совершенно необычные, как бы светящиеся полосы облаков.

Спустя две недели Цераский определил высоту этих облаков по наблюдениям из двух разных пунктов. Он был поражен, получив необычно большую высоту —



79 км. Впоследствии серебристые облака наблюдали и многие другие исследователи. Они подтвердили: действительно, эти удивительные облака находятся на высоте около 80 км. Было установлено, что светиться их заставляет либо опустившееся за горизонт, либо еще не поднявшееся из-за горизонта солнце. Чем длиннее сумерки, тем больше вероятность увидеть серебристые облака. Такая возможность предоставляется в летние месяцы (лучше всего с 10 июня по 10 июля) и только на средних широтах (примерно от  $50^\circ$  до  $65^\circ$ ).

Те, кому доводилось видеть серебристые облака, неизменно восхищаются эффективностью наблюдаемого зрелища. На фоне звездного неба возникают светящиеся полупрозрачные полосы или светящаяся пелена, а иногда фантастические гигантские кольца-вихри. В Северном полушарии они движутся обычно с северо-востока на юго-запад или с севера на юг. Плывущие в двух разных направлениях облака образу-

ют светящуюся решетчатую структуру.

Какова природа серебристых облаков? Когда эти облака заметили впервые, то поначалу решили, что они возникли в результате конденсации паров, занесенных высоко в атмосферу вместе с вулканической пылью при мощном извержении вулкана Кракатау в августе 1883 г. Правда, от момента извержения вулкана до первого наблюдения серебристых облаков прошло почти два года. Кроме того, непонятно было, почему эти облака не наблюдались после других катастрофических извержений вулканов. Появление довольно ярких серебристых облаков после падения знаменитого Тунгусского метеорита (30 июня 1908 г.) породило мысль, что облака обязаны своим происхождением метеоритам. В первой четверти нашего столетия стала популярной метеоритная гипотеза, согласно которой частицы серебристых облаков — это очень мелкие осколки метеоритов, продукты их распыления в атмосфере.

Обе гипотезы образования серебристых облаков (как вулканическая, так и метеоритная) оказались несостоятельными. Они не могли дать ответ на ряд важных вопросов. Почему эти облака появляются лишь в узком интервале высот вблизи 80 км? Почему они наблюдаются только летом и только в средних широтах? Почему их структура очень напоминает структуру перистых облаков, которые, как известно, состоят из кристалликов льда? В 50-х годах ученые пришли к выводу, что серебристые облака имеют такую же природу, что и другие облака, например перистые.

Но каким образом могут возникнуть облака на столь больших высотах? Ведь на высоте 80 км плотность атмосферы ничтожна; здесь можно говорить фактически о вакууме. А уж водяных паров на такой высоте вроде бы и совсем не должно быть. Однако тут следует принять во внимание одно обстоятельство, имеющее решающее значение. Дело в том, что на высоте около 80 км температура атмосферы оказывается *наиболее низкой* (пусть читатель еще раз взглянет на рисунок 4.3). Установлено, что температура может достигать здесь значений  $-130^{\circ}$ ...  $-150^{\circ}$ С. Исследуя содержание водяных паров в атмосфере на разных высотах, ученые обнаружили некоторое увеличение плотно-

сти водяных паров в этом наиболее холодном слое атмосферы, т. е. на высотах 80...85 км. В середине 60-х годов это было подтверждено прямыми измерениями с помощью ракет. Было также установлено, что на рассматриваемых высотах влажность воздуха особенно повышается именно в летнее время и именно на средних широтах.

Выполненные исследования позволяют сегодня следующим образом объяснить возникновение серебристых облаков. В летнее время года на средних широтах наблюдаются довольно мощные восходящие потоки воздуха; они доставляют водяной пар в верхнюю область мезосферы, где тот превращается в ледяные кристаллики серебристых облаков. Конечно, на столь больших высотах интенсивность упомянутых восходящих потоков становится незначительной. Однако, благодаря исключительно низкой температуре на высоте около 80 км происходит практически *полное вымерзание* паров. Это способствует новому притоку пара снизу и *постепенному накоплению* ледяных кристалликов. На других широтах и в другие сезоны столь высокие восходящие потоки отсутствуют, а на высотах, где температура атмосферы не является минимальной, вымерзание пара оказывается недостаточно полным.



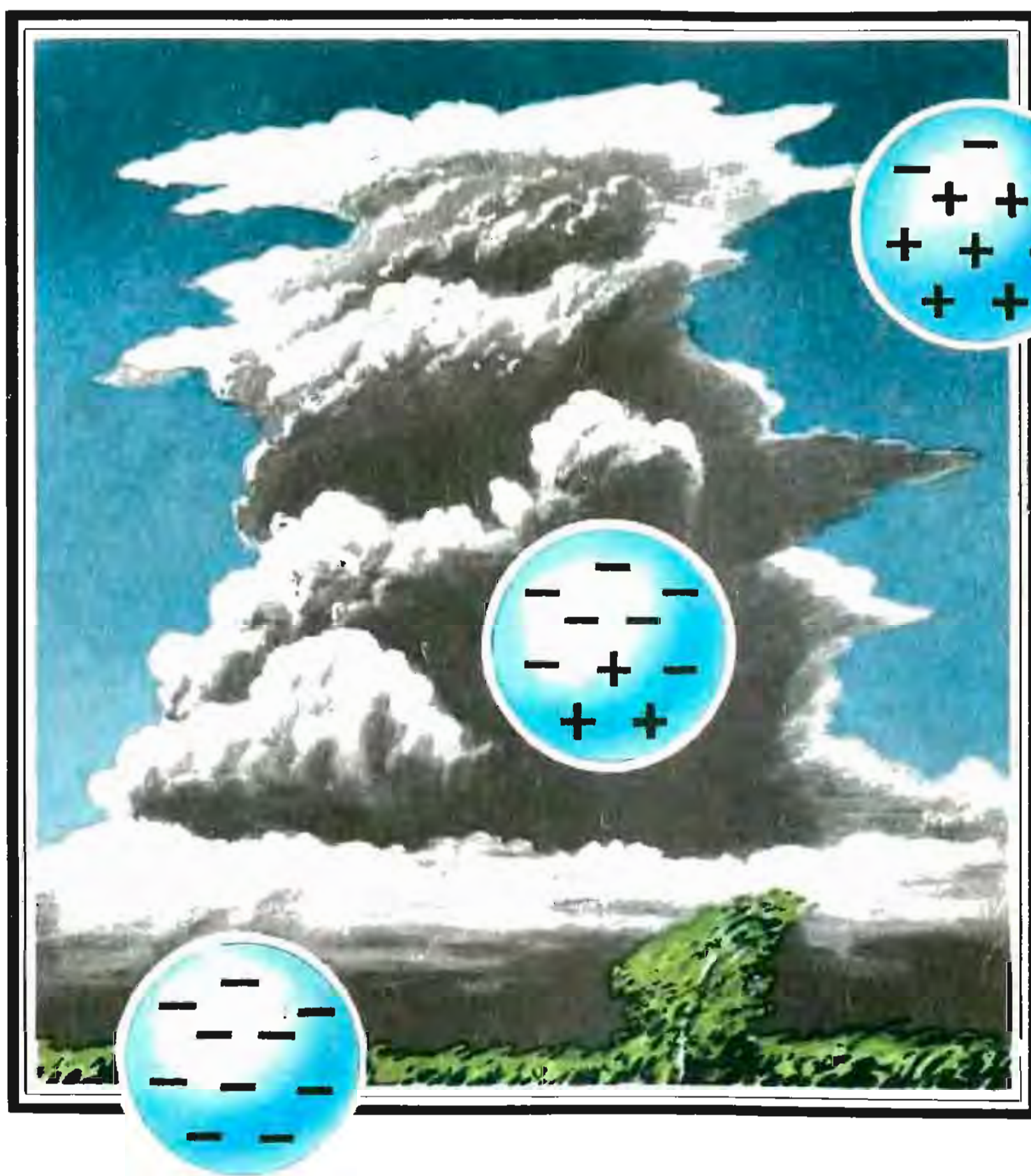
# Глава

# 5

# Грозовая туча

Последняя туча рассеянной бури!  
Одна ты несешься по ясной лазури,  
Одна ты наводишь унылую тень,  
Одна ты печалишь ликующий день.  
Ты небо недавно кругом облегла,  
И молния грозно тебя обвивала;  
И ты издавала таинственный гром  
И алчную землю поила дождем.

*А. С. Пушкин*



Огромная черная туча закрывает половину небосвода. Она надвигается, ширится, растет на глазах и вот уже зловеще нависает над головой. Дует порывами сильный ветер, несутся по воздуху листья и обломанные ветки, поднимаются столбы пыли. Ярко вспыхивает молния, разрывая мгновенным ослепительным светом сгустившиеся сумерки. Оглушительно гремит гром. И вот обрушиваются сверху потоки воды...

Совершенно понятно, почему такое грозное и эффектное явление природы во все времена оказывало огромное воздействие на психику человека, вызывало сильнейшие эмоции. Недаром для того чтобы подчеркнуть особую силу эмоционального напряжения, писатели и поэты часто обращались к грозе и буре. Доведенный до отчаяния коварством и бездушием дочерей король Лир в знаменитой трагедии В. Шекспира в исступлении заклинает разбушевавшуюся стихию:

Дуй, ветер! Дуй, пока не лопнут щеки!  
Лей, дождь, как из ведра, и затопи  
Верхушки флюгеров и колоколен!  
Вы, стрелы молний, быстрые как мысль,  
Деревья расщепляющие, жгите  
Мою седую голову! Ты, гром,  
В лепешку сплюсни выпуклость Вселенной  
И в прах развей прообразы вещей  
И семена людей неблагодарных!

Гроза и возмездие! Из тьмы веков тянется страх человека перед карающей рукой всевышнего. «Гроза нам в наказание посылается, чтобы мы чувствовали», — говорит один из персонажей драмы А. Н. Островского «Гроза».

Впрочем, люди всегда верили, что бог справедлив и милосерден. Поэтому они предпочитали связывать грозу и бурю не с богом,

а с противостоящими ему темными силами, духами тьмы и зла. Эта тема звучит в стихотворении Е. А. Баратынского:

Чья неприязненная сила,  
Чья своевольная рука  
Сгустила в тучи облака  
И на краю небес ненастье зародила?  
Кто, возмутив природы чин,  
Горами влажными на землю гонит море?  
Не тот ли злобный дух, геенны властелин,  
Что по Вселенной розлил горе,  
Что человека подчинил  
Желаньям, немощи, страстям и разрушенью  
И на творенье ополчил  
Все силы, данные творенью?

Здесь и грозовые тучи, и буря на море — все это происки «злобного духа», стремящегося причинить страдания «божьему творению» — человеку — и обратить все силы человека во вред ему же самому.

Огромным внутренним напряжением наполнено стихотворение М. А. Волошина «Облака». Поэт использует мрачный образ грозовых туч для олицетворения гнева и ярости, он как бы видит встающих среди туч грозных духов зла (именуемых в индусской мифологии Асурами):

И сбросил Гнев тяжелый гром с плеча,  
И ярость вод на доли расточа,  
Отходит прочь. Равнины медно-буры.  
В морях зари чернеет кровь богов.  
И дымные встают меж облаков  
Сыны огня и сумрака — Асуры.

Несмотря на извечный страх перед грозой, люди все же всегда понимали, что грозовая туча — это не только зло и не обязательно зло. Это еще и благодатный дождь, после которого наступает освежение, освобождение. Как писал А. Н. Майков,

Но прелесть есть и в шуме бури,  
И в пляске ледяных градин!

Многие поэты описывали грозу, используя не мрачные, а, наоборот, светлые краски. В их стихотворениях, посвященных грозе, есть оптимистический настрой, спокойная уверенность в благополучном исходе. Так, А. С. Пушкин, обращаясь к «последней туче рассеянной бури», заканчивает свое стихотворение словами:

Довольно, сокройся! Пора миновалась,  
Земля освежилась, и буря промчалась,  
И ветер, лаская листочки деревьев,  
Тебя с успокоенных гонит небес.

И конечно, здесь нельзя не вспомнить прекрасное стихотворение Ф. И. Тютчева «Люблю грозу в начале мая...». Поэт радуется грозе, даже любит ее:

Люблю грозу в начале мая,  
Когда весенний, первый гром,  
Как бы резвяся и играя,  
Грохочет в небе голубом.  
Гремят раскаты молодые,  
Вот дождик брызнул, пыль летит,  
Повисли перлы дождевые,  
И солнце нити золотит.  
С горы бежит поток проворный,  
В лесу не молкнет птичий гам,  
И гам лесной и шум нагорный —  
Все вторит весело громам.  
Ты скажешь: ветреная Геба,  
Кормя Зевесова орла,  
Громокипящий кубок с неба,  
Смеясь, на землю пролила.

**Гроза глазами внимательного наблюдателя.** Оставим теперь в стороне настроения, которые вызывает гроза. Понаблюдаем внимательнее, как она развивается. В ее развитии достаточно четко выделяются четыре последовательных этапа.

*Первый этап* — предгрозье. С утра жарко и душно, стоит пол-

ная тишина. «Пáрит! Быть грозе», — уверенно предсказывают бывалые люди. На данном этапе происходит зарождение грозовой тучи. Оно хорошо описано в стихотворении В. С. Шефнера:

На кустиках нежных синеет черника,  
Ни шороха ветра, ни птичьего крика.  
Над гладкой рекой, над лесными местами  
Легла тишина голубыми пластами.  
Шагаю — а зной над лесными холмами  
Прозрачными к небу восходит волнами,  
И зреет зерно неминуемой бури  
В дремучем покое, в недвижной лазури.

*Второй этап* — начальное развитие грозовой тучи, ее формирование. Воздух становится влажным, в нем как бы разливается слабый туман. В вышине возникает, растет, постепенно темнеет кучево-дождевое облако, превращаясь в грозовую тучу. Увеличивающаяся туча закрывает солнце, и все вокруг сразу становится мрачным, устрашающим. Возникает теплый ветер, поднимающий вверх сухие листья и травинки. Замолкли птицы, вся природа словно бы затаилась в ожидании. Этот этап очень точно описан в стихотворении И. С. Тургенева:

Уже давно вдали толпились тучи  
Тяжелые — росли, темнели грозно.  
Вот сорвалась и двинулась громада.  
Шумя, плывет и солнце закрывает  
Передовое облако. Внезапный  
Туман разлился в воздухе. Кружатся  
Сухие листья. Птицы притаились...  
Из-под ворот выглядывают люди,  
Спускают окна, запирают двери...

*Третий этап* — зрелая грозовая туча. Сверху из тучи устремляются к земле мощные потоки холодного воздуха.

Вдруг полнеба потемнело,  
Тучи громовой громада  
Сильным холодом дохнула.



Так говорится об этом в эстонском эпосе «Калевипоэг». Потoki холодного воздуха ударяются о поверхность земли и порождают пылевые вихри. И тут же начинается сильный дождь, а иногда и град. Сверкают молнии, гремит гром. Продолжая цитировавшееся выше стихотворение И. С. Тургенева, мы находим описание данного этапа:

Большие капли падают... и вдруг  
Помчалась пыль столбами по дорогам;  
Поднялся вихрь и по стенам и крышам  
Ударил злобно. Хлынули потоки  
Дождя... Запрыгал угловатый град...  
Крутятся, бьются, мечутся деревья...  
Смешались тучи... молнья!.. ждешь удара...  
Загрохотал и прокатился гром.  
Сильнее дождь... Широкими струями,  
Волнуясь, льет и хлещет он — и ветер  
С воды срывает брызги... вновь удар!

*Четвертый этап* — разрушение грозовой тучи. Туча заметно уменьшилась (разрушилась). Ее верхушка вытянулась горизонтально. Дождь ослабел, ветер заметно стих. Еще немного, и в просветах туч появляется солнце. Вся природа оживает. Остатки тучи уходят вдаль. В воздухе необычайная свежесть.

**Восходящие и нисходящие воздушные потоки в грозовой туче.** Грозовая туча образуется в жаркий день, когда воздух у поверхности земли сильно прогрет и хорошо насыщен водяными парами. Происходит *мощная конвекция*: потоки нагретого влажного воздуха устремляются вверх. Подъем теплых воздушных масс еще более усилится, если ветер пригонит холодный воздух. Массы пришедшего холодного воздуха, стелющегося у самой поверхности зем-

ли, проникают под нагретую воздушную массу и приподнимают ее вверх. Недаром именно на холодных фронтах наиболее часто образуются кучево-дождевые облака, перерастающие в грозовые тучи (о холодном фронте и о кучево-дождевых облаках мы рассказывали в предыдущей главе).

Рассмотрим же, что происходит внутри грозовой тучи на разных этапах ее «жизни» — от зарождения до разрушения. Ранее мы говорили о следующих этапах: этапе формирования тучи (этапе ее начального развития), этапе зрелости, этапе разрушения. Именно эти этапы мы и будем теперь иметь в виду, анализируя происходящие в туче физические процессы.

Предварительно заметим, что рассматривается изолированная (одиночная) грозовая туча; ее горизонтальная протяженность 5...10 км. Такое рассмотрение годится и тогда, когда в действительности образуется целая гряда грозовых туч. В этом случае тучи можно представить состоящими из отдельных *грозовых ячеек*, которые, хотя и примыкают друг к другу своими боками, однако могут считаться взаимно независимыми. Все процессы, происходящие в одной грозовой ячейке, совершаются и в других — разве лишь со сдвигом во времени. Наша одиночная грозовая туча — это, по сути дела, одна из грозовых ячеек.

Рассматриваемые три этапа «жизни» грозовой тучи схематически показаны на рисунке 5.1. Стрелками изображены воздушные потоки, причем длина каждой стрелки примерно пропорциональна скорости соответствующего потока. Красным цветом закрашен объем тучи, в котором имеются только водяные капли,

оранжевым — объем, в котором наряду с каплями присутствует снег, желтым — объем, содержащий только ледяные кристаллики.

На этапе начального развития (рис. 5.1,а) наблюдаются мощные восходящие потоки воздуха. Содержащиеся в них водяные пары, начиная с некоторой высоты  $H$ , конденсируются. Процесс конденсации паров продолжается при дальнейшем подъеме воздушных масс, вследствие чего облако быстро растет в высоту, постепенно превращаясь в грозовую тучу. Из рисунка 5.1,а видно, что по мере подъема скорость восходящих воздушных потоков внутри зарождающейся тучи возрастает. Обратим внимание также на приток с боков

более холодного воздуха, окружающего тучу (рассматривая в предыдущей главе кучевое облако, мы пренебрегли боковым притоком воздуха).

Впрочем, все это совершается в вышине, а земной наблюдатель видит лишь постепенно разрастающееся, приобретающее все более темный цвет облако, и, кроме того, ощущает горизонтальные потоки ветра. Это приповерхностный воздух устремляется под тучу — в область пониженного давления, образовавшуюся благодаря подъему воздушных масс. Если под тучу проникает откуда-нибудь с водоема сравнительно холодный воздух, то будет происходить некоторое охлаждение поднимающихся





вверх теплых и влажных воздушных масс; в результате может возникнуть легкая туманная дымка. Все это как раз и отмечалось в приводившемся ранее стихотворении Тургенева:

...Внезапный

Туман разлился в воздухе. Кружатся  
Сухие листья...

Мощные восходящие потоки теплого влажного воздуха (значительно более мощные, чем в случае обычного кучевого облака) обуславливают сильный рост грозовой тучи в высоту. Верхняя граница тучи оказывается на высоте 10...15 км, она может достигать даже 20 км. На таких высотах восходящие воздушные потоки затухают. Там образуются большие скопления ледяных кристалликов, которые начинают падать сквозь тучу вниз, увлекая за собой некоторое количество холодного воздуха. Важно отметить, что возникший у вершины тучи нисходящий поток холодного воздуха, попадая в нижние «этажи» тучи, не затухает, а, напротив, усиливается. Таким образом, наблюдается довольно сложная картина — наряду с восходящими потоками воздуха, нагретого у поверхности земли, возникают нисходящие потоки воздуха, охлажденного в верхней части тучи. Такая ситуация соответствует созревшей грозовой туче (рис. 5.1, б).

Нисходящий холодный воздушный поток, выходя из тучи, мощно ударяет по поверхности земли — появляется сильный порывистый ветер, возникают пылевые вихри. Одновременно из тучи начинаются интенсивные осадки — ливень, иногда град. В приводившемся ранее стихотворении Тургенева все это описано весьма точно:

...Помчалась пыль столбами по дорогам;  
Поднялся вихрь и по стенам и крышам  
Ударил злобно. Хлынули потоки  
Дождя... Запрыгал угловатый град...  
Крутятся, бьются, мечутся деревья...

Падающие вниз сквозь тучу холодные воздушные массы, вызывая ливень и град, в то же время гасят встречные восходящие потоки воздуха. А это означает, что туча начинает разрушаться — за этапом созревания очень быстро следует *этап разрушения тучи* (рис. 5.1, в). Теперь внутри тучи существуют лишь нисходящие воздушные потоки. Постепенно деятельность ветра прекращается, дождь стихает. Туча буквально на глазах «худеет», ее вершина вытягивается по направлению ветра, образуя «наковальню». Недолгая жизнь грозовой тучи подошла к концу.

Подчеркнем, что разделение жизни тучи на отдельные этапы является вполне четким. *На этапе начального развития, когда туча еще только формируется, в ней наблюдаются лишь восходящие воздушные потоки, притом весьма мощные. На этапе зрелости, наряду с восходящими, возникают также нисходящие потоки, вызывающие бурное выпадение осадков. Наконец, на этапе разрушения восходящие потоки прекращаются, остаются только нисходящие.*

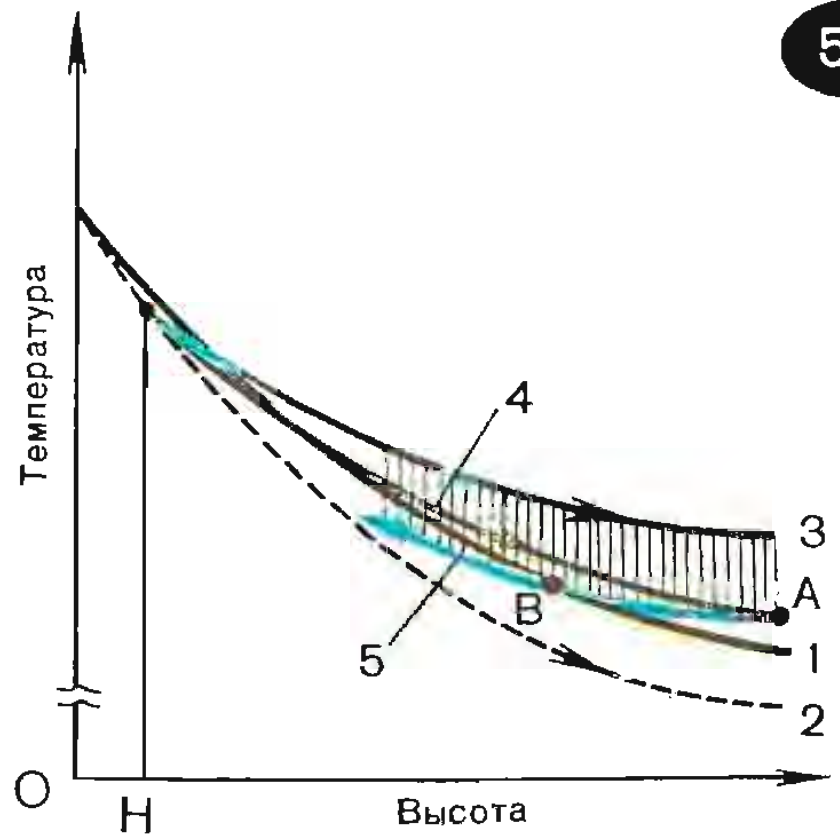
**Два вопроса, касающиеся физики процессов в туче.** Почему в формирующейся туче возникают мощные восходящие потоки? Почему нисходящие потоки в зрелой туче, возникнув, далее уже не прекращаются?

Первый вопрос мы уже рассматривали на примере кучевого облака (см. предыдущую главу).



Напомним, в чем тут дело. При подъеме воздуха от нагретой земной поверхности он адиабатно расширяется и потому охлаждается. Охлаждение приводит к конденсации водяных паров, которая начинается с некоторой высоты  $H$ , определяющей нижнюю границу облака или тучи. За счет выделяющейся при конденсации паров теплоты парообразования происходит разогревание воздуха, поэтому в облаке или туче он оказывается более теплым, а значит, и более легким, чем воздух на данной высоте вокруг облака (тучи). В результате и возникают восходящие воздушные потоки, обуславливающие вертикальное развитие облака (тучи). В туче конденсация паров идет более интенсивно, чем в облаке, так как при поверхностный воздух был сильнее нагрет и сильнее насыщен влагой. Поэтому восходящие потоки в туче оказываются более мощными, и высота тучи в несколько раз превышает высоту обычного кучевого облака.

По мере увеличения высоты тучи все более важным становится приток в тучу бокового холодного воздуха. Этот воздух перемещается с поднимающимся сравнительно теплым воздухом, охлаждает его и тем самым затормаживает дальнейший рост тучи. При рассмотрении кучевого облака мы пренебрегали притоком холодного воздуха. В случае же с тучей учет этого притока принципиально важен. Он приводит не только к прекращению (на больших высотах) восходящих потоков, но и обеспечивает существование нисходящих потоков, зарождающихся в вершине тучи. Иными словами, именно в учете притока бокового холодного воздуха со-



держится, в конечном счете, ответ на второй из поставленных выше вопросов.

Сделанные замечания можно пояснить при помощи рисунка 5.2. Аналогичный рисунок для кучевого облака мы приводили в предыдущей главе. Температурные кривые 1, 2, 3 имеют здесь тот же смысл, что и соответствующие кривые на упомянутом рисунке: 1 — уменьшение с высотой температуры неподвижного воздуха, т. е. воздуха, окружающего тучу; 2 — уменьшение с высотой температуры поднимающегося сухого воздуха, т. е. воздуха, в котором нет водяных паров и, значит, нет конденсации; 3 — уменьшение с высотой температуры поднимающегося влажного воздуха с учетом конденсации паров (конденсация начинается с высоты  $H$ ). Кроме того, на рисунке 5.2 есть новые детали, которые отсутствовали на упомянутом рисунке из предыдущей главы. Речь идет о температурных кривых 4 и 5. Кривая 4 показывает, как изменяется с высотой температура под-

нимающегося влажного воздуха, в который все время добавляется холодный боковой воздух. Видно, что приток холодного воздуха существенно уменьшает температуру поднимающейся воздушной массы. На сравнительно малых высотах, где боковой приток воздуха не существен (особенно если есть много примыкающих друг к другу грозовых ячеек), поднимающийся воздух описывается кривой 3; скорость восходящих потоков увеличивается. На больших высотах, где боковой приток воздуха становится существенным, поднимающийся воздух описывается кривой 4; скорость восходящих потоков снижается. Теперь предположим, что на некоторой высоте (см. точку А на рисунке 5.2) зародился нисходящий воздушный поток; его температура будет возрастать по мере уменьшения высоты, следуя кривой 5. На всех высотах кривая 5 равноотстоит от кривой 3.

Как видно из рисунка, в некоторой точке В кривая 5 пересечется с кривой 1, после чего падающая вниз воздушная масса оказывается холоднее окружающего тучу воздуха, и дальнейшее падение становится неотвратимым.

**Электрические заряды в туче.** Картина восходящих и нисходящих воздушных потоков позволяет довольно четко выделить *основной этап жизни тучи — этап ее зрелости*. У него есть еще одна, и притом очень важная, особенность. Речь идет о молниях. Они наблюдаются именно в зрелой грозовой туче. *Молнии — характерная черта грозовой активности; их можно рассматривать в качестве определяющего признака грозы.*

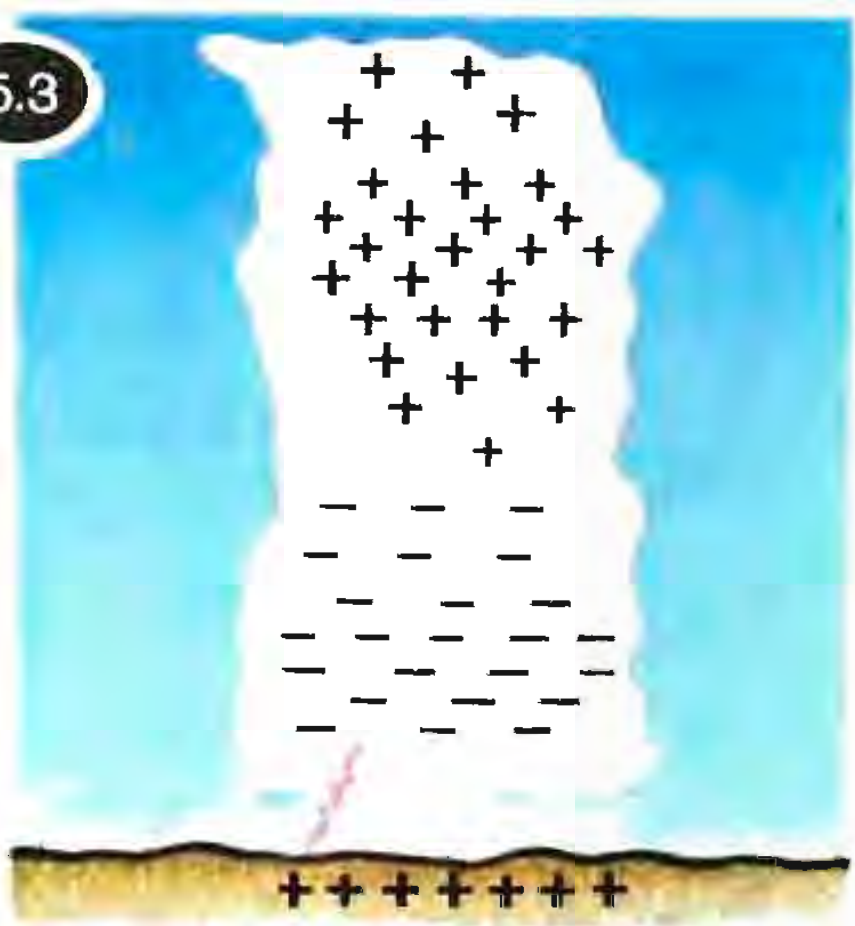
Возникновение молний говорит о том, что в тучах накапливаются значительные *электрические заряды*. Впрочем (и это важно подчеркнуть), отсутствие молний еще не означает, что зарядов нет. И в грозовых тучах, и в различных видах облаков, в частности в слоистых и слоисто-дождевых, накапливаются электрические заряды. Просто в грозовой туче этих зарядов намного больше, чем, например, в слоистом облаке. До сих пор мы не касались вопроса об *электризации туч и облаков*. Теперь пришло время поговорить об электрических процессах, происходящих в облачном покрове Земли, а также в самой земной атмосфере.

Прежде всего заметим, что уже в чистой атмосфере, где вообще нет никаких облаков, имеются свободные электрические заряды. В слоистых и слоисто-дождевых облаках объемная плотность зарядов примерно в 100 раз выше, чем в чистой атмосфере. Степень электризации облака увеличивается по мере укрупнения его частиц, роста толщины облака, усиления осадков из него. Наибольший заряд содержат грозовые тучи. Для возникновения молнии необходимы заряды 10...100 Кл, разнесенные друг от друга на расстояние от 1 км до 10 км.

На рисунке 5.3 упрощенно показано, как распределяются заряды в грозовой туче. *Верхняя часть тучи заряжена положительно, а нижняя отрицательно*. Центр положительных зарядов находится на высоте 7...10 км, где температура составляет  $-20...-30^{\circ}\text{C}$ . Центр отрицательных зарядов находится на высоте 3...4 км, где температура  $0...-10^{\circ}\text{C}$ . Вообще-то распределение зарядов в туче более



5.3



сложное. Например, в самом ее низу есть небольшой объем, заряженный положительно. Однако в общих чертах картина такова, как она показана на рисунке.

Нижнюю часть тучи и земную поверхность можно уподобить пластинам своеобразного конденсатора; верхняя пластина заряжена отрицательно, а нижняя положительно. Конденсатор разряжается, во-первых, за счет молний, проскакивающих между тучей и земной поверхностью, а во-вторых, за счет осадков. И в том и в другом случае положительные заряды переносятся с поверхности земли в тучу.

В древнеиндийском поэтическом сборнике «Семьсот стихотворений», создание которого определяют между III и VII вв., есть любопытное четверостишие:

Слышите, как надрываются  
Там грозовые могучие тучи,  
Землю веревками ливней  
Пытаясь поднять в поднебесье?

В нем очень интересна мысль о существовании сил притяжения меж-

ду тучей и землей. Такие силы действительно есть — это силы электрического притяжения, действующие между зарядами разных знаков. Конечно, автор стихотворения не мог и подумать об электрической природе этих сил (представления об электричестве сформировались много позднее), однако впечатляет сама догадка о каких-то силах, возникшая у поэта при виде дождевых струй.

Но вернемся к физической стороне дела. Главный вопрос, связанный с электризацией туч и облаков, состоит в том, каким именно образом происходит в них разделение электрических зарядов.

Каков тот физический механизм, который заставляет положительные заряды группироваться в верхней части тучи, а отрицательные в нижней?

Вопрос этот достаточно сложен; прежде чем перейти к нему, необходимо поговорить об атмосферном электричестве.

**Атмосферное электричество.** Представим себе ясный безветренный день, на чистом небе ни единого облачка. Кажется, что атмосфера совершенно спокойна, неподвижна. Но эта неподвижность обманчива: все воздушное пространство над земной поверхностью пронизывают электрические токи, текущие сверху вниз — от «небес» к Земле. Сила этих токов незначительна — всего около  $10^{-12}$  А на каждый квадратный метр земной поверхности (на каждый квадратный метр поверхности ежесекундно приходит положительный заряд, равный  $10^{-12}$  Кл). Однако земная поверхность велика, поэтому в расчете на всю поверхность нашей планеты получаем весьма



внутреннюю силу атмосферного тока — 1800 А.

Если через атмосферу течет электрический ток, то это означает, что, во-первых, в ней имеется электрическое поле, направленное по вертикали, и, во-вторых, атмосфера обладает электропроводностью (хотя и небольшой). Напомним в связи с этим формулу, представляющую собой не что иное, как закон Ома:

$$j = E / \rho, \quad (5.1)$$

где  $j$  — плотность силы тока,  $E$  — напряженность поля,  $\rho$  — удельное сопротивление среды (в данном случае атмосферы). Величина  $\sigma$ , обратная удельному сопротивлению, называется электропроводностью среды. Таким образом, формулу (5.1) можно переписать в виде

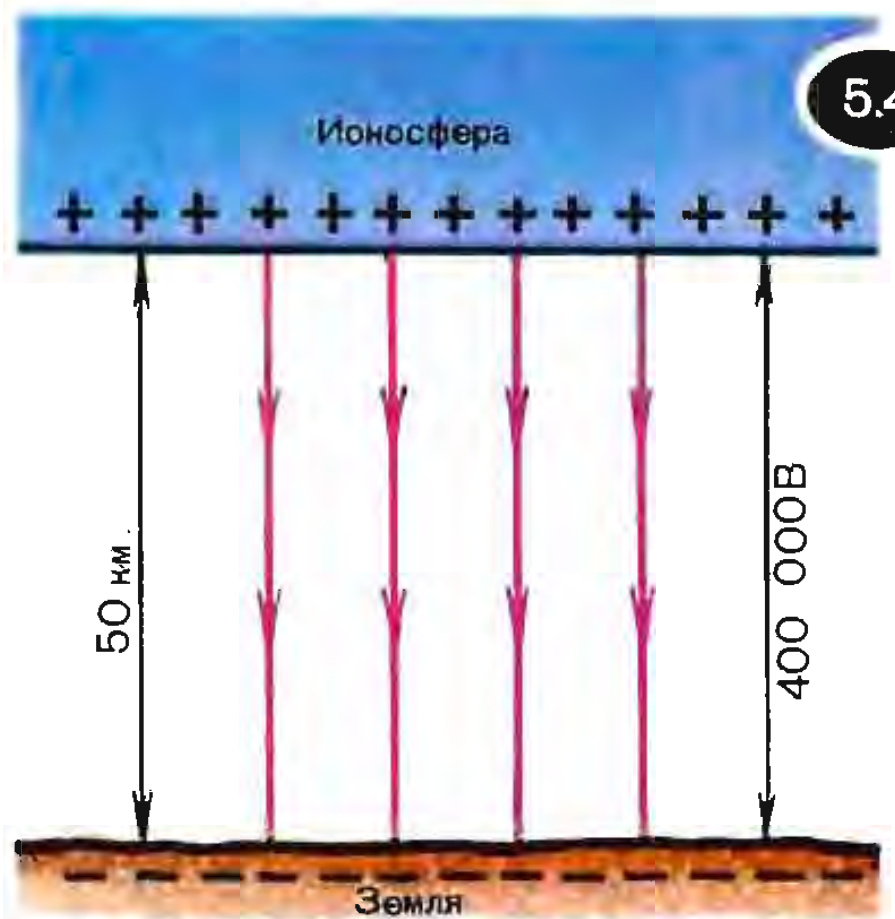
$$j = \sigma E. \quad (5.2)$$

Электропроводность атмосферы обусловлена ионами. В начале нашего века полагали, что ионы в атмосфере возникают благодаря радиоактивности Земли. Согласно этой гипотезе концентрация ионов в воздухе (а значит, и его электропроводность) должна была бы уменьшаться по мере подъема над земной поверхностью. Чтобы проверить гипотезу, В. Гесс поднимался на воздушном шаре и измерял степень ионизации атмосферы на разных высотах. В результате он установил: степень ионизации с высотой не уменьшается, а, напротив, *растет*. Это открытие привело к рождению нового направления в физике, названного впоследствии *физикой космических лучей*. Оказалось, что именно космические лучи (потoki заряженных частиц и жесткого электромагнитного излучения), приходящие к нам из мирового про-

странства и в частности, от Солнца, непрерывно снабжают земную атмосферу ионами.

Итак, вследствие ионизации воздуха космическими лучами электропроводность атмосферы быстро растет с высотой. Фактически уже на высоте 50 км воздух становится хорошим проводником, так что эта высота может рассматриваться как нижняя граница ионосферы. Между ионосферой (точнее говоря, ее нижней границей) и земной поверхностью имеется разность потенциалов около  $4 \cdot 10^5$  В, причем ионосфера заряжена положительно, а земная поверхность отрицательно. Полный отрицательный заряд Земли (как и положительный заряд ионосферы) составляет примерно  $10^5$  Кл. Упомянутая разность потенциалов как раз и обуславливает положительный ток, текущий через атмосферу от нижней границы ионосферы к Земле (рис. 5.4).

Выделим мысленно вертикальный столб воздуха высотой 50 км с основанием площадью  $1 \text{ м}^2$ . По этому столбу сверху вниз течет



ток силой около  $10^{-12}$  А. На всех высотах сила тока одна и та же, иначе говоря, величина  $j$  в формуле (5.2) с высотой не меняется. Что же касается множителей  $\sigma$  и  $E$ , стоящих в правой части формулы, то они, конечно, изменяются. Электропроводность  $\sigma$ , как мы уже знаем, с высотой растет; напряженность поля атмосферы  $E$  с высотой уменьшается. Наибольшее значение напряженность поля принимает вблизи земной поверхности; в условиях чистой атмосферы она равна примерно 100 В/м.

Возможно, у читателя уже возник вопрос: если от ионосферы к Земле все время течет ток, то почему же Земля, а заодно и ионосфера не разрядились давным-давно? Они действительно не разряжаются — Земля неизменно сохраняет свой отрицательный заряд  $10^5$  Кл. Дело в том, что наряду с токами, непрерывно разряжающими «конденсатор», образуемый нижней границей ионосферы и земной поверхностью, существуют встречные токи, которые непрерывно заряжают этот конденсатор. Токи разрядки существуют в тех областях Земли, где в данный момент стоит хорошая погода, а токи зарядки возникают в областях нарушенной погоды.

Области нарушенной погоды — понятие довольно широкое. Прежде всего к ним относятся области, где в данный момент происходят грозы, сверкают молнии. Выше мы уже отмечали, что осадки и молнии переносят положительный заряд с земной поверхности в нижнюю часть тучи, после чего он переходит в ее верхнюю часть и, в конечном счете, обуславливает появление положительных токов от тучи к нижней границе ионосферы. Это и есть те самые токи

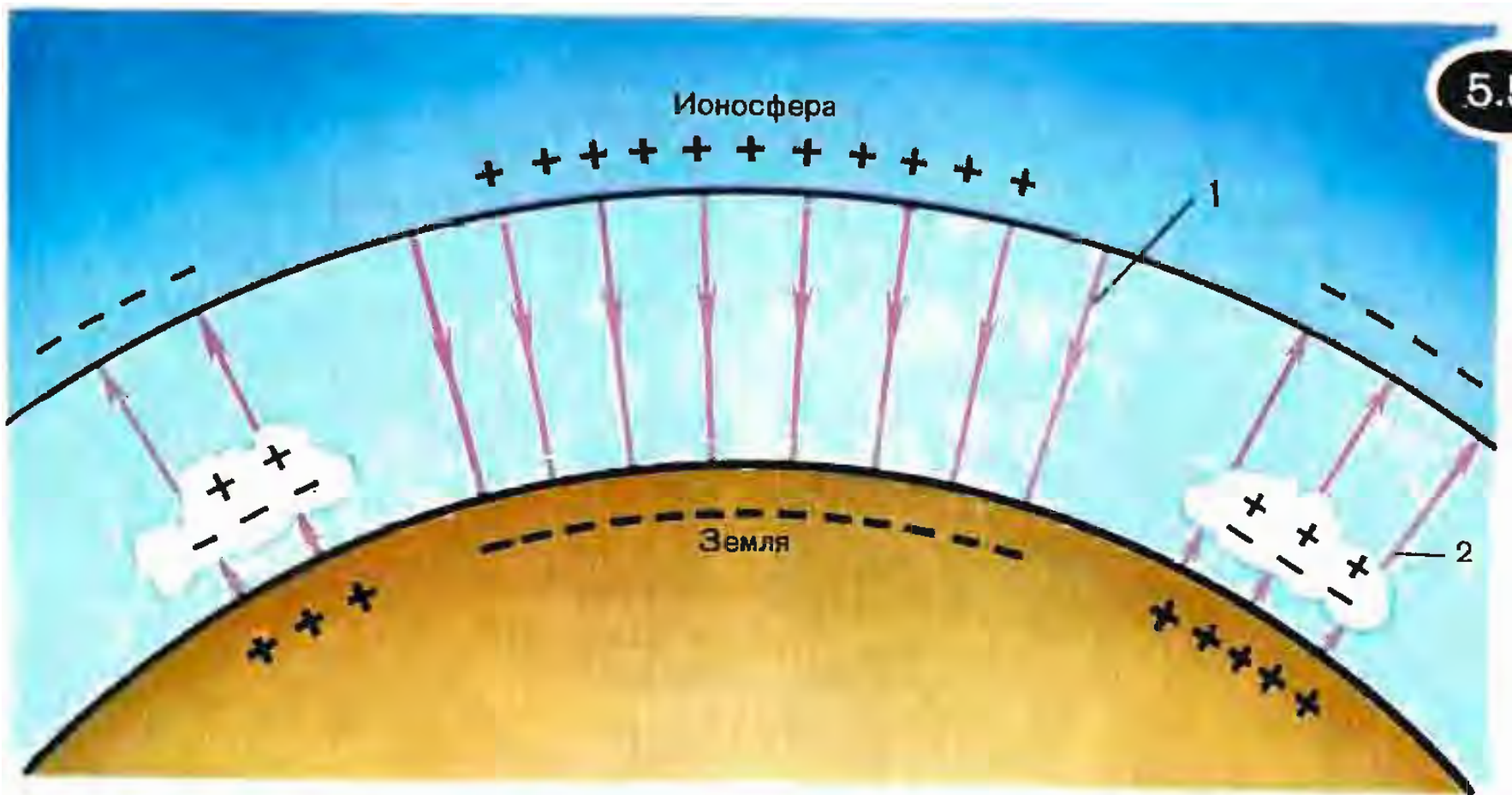
зарядки, о которых мы только что говорили. Заметим, что во время грозы напряженность поля вблизи земной поверхности превышает  $10^4$  В/м, причем направлено поле не вниз (как в случае хорошей погоды), а вверх.

Можно упрощенно рассматривать земную поверхность и нижнюю границу ионосферы как обкладки гигантского сферического конденсатора, который *разряжается в областях хорошей погоды и заряжается в областях грозовой активности*. Этот «конденсатор» схематически показан на рисунке 5.5. Здесь 1 — токи разрядки, 2 — токи зарядки.

Следует заметить, что молнии и осадки не единственный механизм токов зарядки. Таковую же роль выполняют пылевые бури и извержения вулканов (кстати говоря, тоже сопровождаемые иногда молниями). Кроме того, при приповерхностной напряженности около 500 В/м происходят почти бесшумные электрические разряды с различных «острых» предметов, находящихся на поверхности: деревьев, труб, мачт и даже травы. В этом случае заряды тихо стекают в атмосферу, внося вклад в токи зарядки.

**Как быстро могла бы разрядиться Земля?** Рассмотрим задачу, связанную с разрядкой конденсатора. Она интересна тем, что позволяет оценить время, в течение которого разрядился бы земной «конденсатор» за счет токов хорошей погоды, если бы вдруг в один прекрасный момент прекратилось действие всех физических факторов, обуславливающих токи зарядки. Оказывается, что хотя заряд Земли и огромен ( $10^5$  Кл), в дан-





ном случае понадобилось бы менее десяти минут, чтобы заряд на пластинах земного «конденсатора» уменьшился в  $10^4$  раз.

Убедимся же в этом, обратившись к следующей задаче. В начальный момент времени ( $t=0$ ) заряд пластин конденсатора равен  $Q_0=10^5$  Кл, разность потенциалов между пластинами  $U_0=4 \cdot 10^5$  В, сила текущего через конденсатор тока  $I_0=1800$  А. Через сколько времени заряд на пластинах конденсатора уменьшится в 10 000 раз?

Сначала решим задачу в общем виде. Пусть  $Q(t)$ ,  $U(t)$ ,  $I(t)$  — значения соответствующих величин в некоторый момент  $t$ . Воспользуемся известными соотношениями:  $R = \frac{U(t)}{I(t)}$ ,  $C = \frac{Q(t)}{U(t)}$ , где  $R$  и  $C$  — соответственно сопротивление и емкость конденсатора (эти величины не зависят от времени). Перемножив указанные равенства, получим

$$\frac{I(t)}{Q(t)} = \frac{1}{CR}. \quad (5.3)$$

Далее учтем, что

$$I = -\frac{dQ}{dt}. \quad (5.4)$$

Мы поставили здесь знак «минус», так как в левой части формулы (5.4) стоит абсолютное значение силы тока, а  $\frac{dQ}{dt} < 0$  (с течением времени заряд пластин конденсатора уменьшается). Подставляя (5.4) в (5.3), находим

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{CR}. \quad (5.5)$$

Нетрудно убедиться (для тех читателей, которые знакомы хотя бы с азами дифференцирования), что

$$Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{CR}}. \quad (5.6)$$

Здесь  $e$  — трансцендентное число, являющееся основанием натуральных логарифмов;  $e=2,718\dots$  График функции  $Q(t)$  приведен на рисунке 5.6. Положив  $\frac{Q_0}{Q(t)} = 10^4$ , получим из (5.6)

$$t = CR \ln 10^4 \quad (5.7)$$

(знак  $\ln$  служит для обозначения натуральных логарифмов). Чтобы найти  $\ln 10^4$ , можно воспользоваться соотношением  $\ln 10^4 = \frac{\lg 10^4}{\lg e} = \frac{4}{\lg e}$ . Так как  $\lg e = 0,43$ , то, следовательно,  $\ln 10^4 = 9,2$ . Итак, в резуль-



тате разрядки конденсатора заряд его пластин уменьшится в  $10^4$  раз за время

$$t = 9,2 CR. \quad (5.8)$$

Остается найти  $C$  и  $R$ . Их можно определить, воспользовавшись приведенными в условии задачи значениями величин

$$Q, U, I \text{ для } t=0: R = \frac{U_0}{I_0} = 220 \text{ Ом}, \quad C = \frac{Q_0}{U_0} = 0,25 \text{ Ф.}$$

Таким образом,  $CR = 55$  с и, значит,  $t = 506$  с = 8,8 мин.

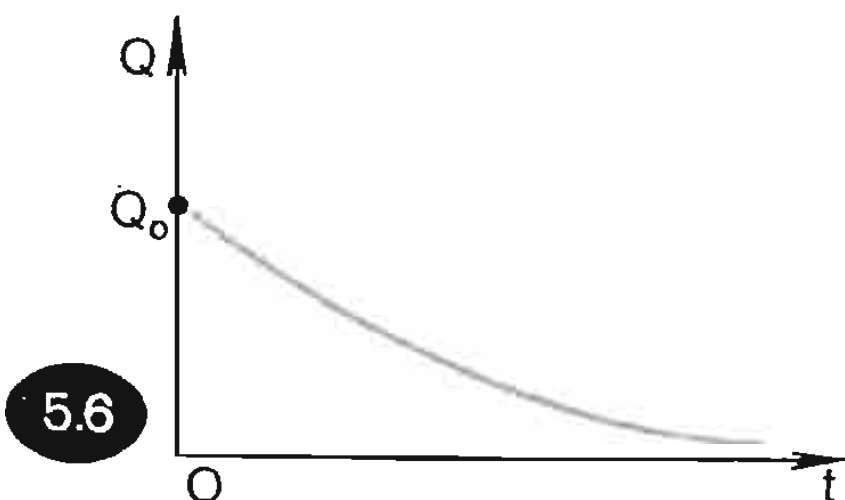
Обратим внимание, что изображенная на рисунке 5.6 функция очень быстро уменьшается со временем (так называемый экспоненциальный закон затухания). Нетрудно убедиться, что для уменьшения заряда пластин конденсатора, например, в миллион раз потребуется 13 мин, т. е. всего на 4 мин больше, чем потребовалось для уменьшения заряда в десять тысяч раз.

**Почему происходит разделение зарядов в туче или облаке.** Вернемся к поставленному ранее вопросу о физических механизмах разделения электрических зарядов в тучах и облаках. Иными словами, обсудим физику явлений, приводящих к электризации туч и облаков.

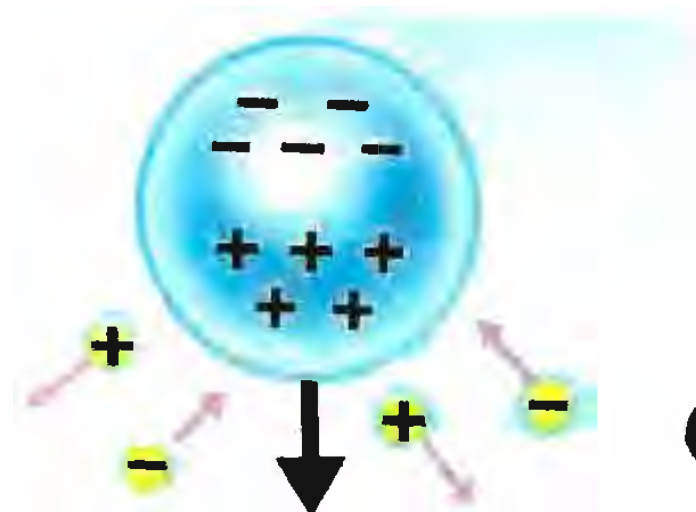
Вот один из таких механизмов. Представим себе крупную водяную каплю, которая начинает падать сквозь тучу. Напомним, что капля находится в электрическом поле

«конденсатора» Земля — ионосфера. Это поле направлено вниз; оно поляризует каплю так, что ее верхняя часть оказывается заряженной отрицательно, а нижняя положительно. И вот такая капля начинает падать вниз. Теперь представим, что на пути падающей капли встречаются тяжелые, а потому не слишком быстро движущиеся ионы — как положительные, так и отрицательные. Передняя (по движению) часть капли заряжена положительно, поэтому встретившиеся положительные ионы будут отброшены в сторону, тогда как отрицательные ионы, напротив, будут притянуты к капле (рис. 5.7).

Конечно, оказавшиеся позади падающей капли положительные ионы могут притянуться к ее отрицательно заряженной верхней части. Однако надо иметь в виду, что капля быстро падает, а ионы не очень подвижны, поэтому многие ионы попросту не успеют догнать удаляющуюся от них каплю. В результате в процессе падения капля будет приобретать все больший отрицательный заряд. Поэтому в нижней части тучи будет накапливаться отрицательный заряд. В то же время отброшенные в сторону положительные ионы будут снесены к верхушке тучи восходящими потоками и увеличат ее положительный заряд.



5.6



5.7

Рассмотренный механизм электризации тучи достаточно нагляден. Однако в туче не так уж много малоподвижных ионов. Даже если бы все отрицательные ионы были захвачены падающими каплями, а все положительные были отброшены, то и в этом случае возникающий в туче заряд был бы в десятки и даже сотни раз меньше заряда, наблюдаемого на самом деле. Более существенную роль в электризации тучи играет, по видимому, обледенение ее верхней части, происходящее в процессе формирования тучи. Наглядно объяснить этот механизм довольно трудно. Поэтому ограничимся некоторыми чисто качественными пояснениями, позволяющими понять его в общих чертах.

Известно, что над поверхностью любого вещества имеется «облако» электронов. Это электроны, у которых энергия теплового движения оказалась достаточно большой. Данное явление называют *термоэлектронной эмиссией*. Существует специальное понятие *работа выхода* — минимальная энергия электрона, при которой он может вылететь из вещества. Работа выхода различна для разных веществ. Предположим, что приведены во взаимный контакт два каких-нибудь разных вещества — *A* и *B*. Пусть из вещества *A* электронам легче вылететь, чем из вещества *B* (у ве-

щества *A* работа выхода меньше, чем у вещества *B*). Понятно, что термоэлектронная эмиссия из *A* будет проходить интенсивнее, чем из *B*. В результате часть электронов перейдет из *A* в *B*, так что вещество *B* зарядится отрицательно, а вещество *A* положительно. Между контактирующими веществами возникнет разность потенциалов; ее называют *контактной разностью потенциалов*. Возникнув, она, очевидно, начнет препятствовать дальнейшему переходу электронов из *A* в *B* — установится равновесие.

Теперь обратимся к тучам и облакам. Тучи и многие облака содержат как водяные капли, так и ледяные кристаллики. Вода и лед, таким образом, контактируют здесь друг с другом. За счет контактной разности потенциалов, возникающей между льдом и водой, как раз и происходит электризация тучи (облака).

Мы коснулись только двух физических механизмов разделения зарядов в тучах и облаках. Таких механизмов существует более десятка. Среди них дробление больших капель на более мелкие, столкновение водяных капелек с ледяными кристалликами, трение падающих капель о воздух и др. Все это говорит о сложности действительной картины процессов, происходящих в тучах и облаках.



# Глава

# 6

# МОЛНИЯ

...Молния, как бы созревши,

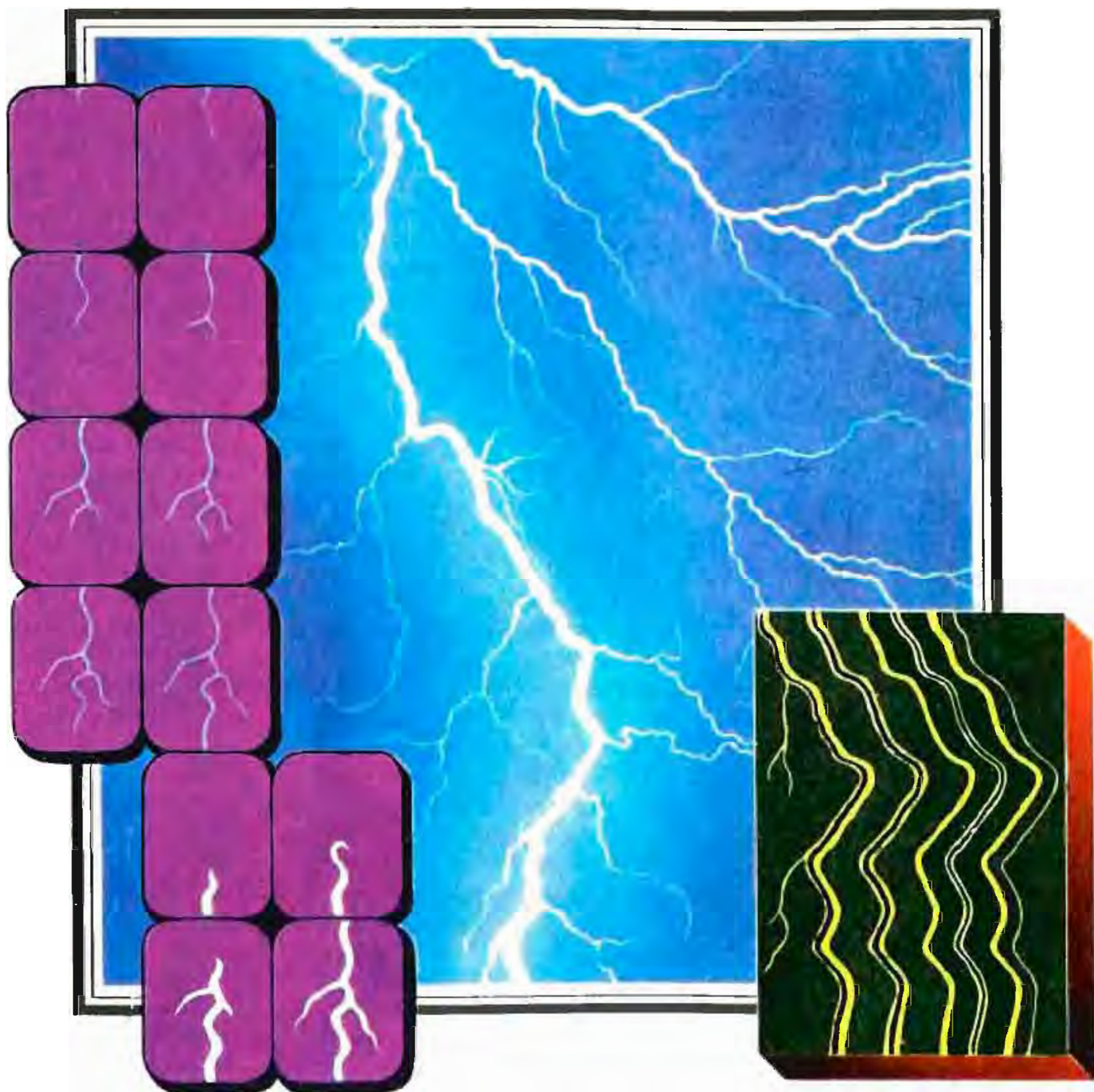
Вдруг разорвет облака и пронесится пламенем ярким.

Быстро сверканье ее, заливая окрестности светом.

Следует тяжкий удар, как будто бы, лопнув внезапно,

Рушится весь небосвод и грозит обвалиться на землю.

*Лукреций*









молния — это сильный электрический разряд. Ученый выполнил знаменитый опыт с воздушным змеем, который был запущен в воздух при приближении грозы. На крестовине змея была укреплена заостренная проволока, к концу бечевки привязаны ключ и шелковая лента. Ленту ученый удерживал рукой. В письме к одному из своих друзей Франклин писал: «Как только грозовая туча окажется над змеем, заостренная проволока станет извлекать из нее электрический огонь, и змей вместе с бечевой наэлектризуется... А когда дождь смочит змей вместе с бечевой, сделав их тем самым способными свободно проводить электрический огонь, Вы увидите, как он обильно стекает с ключа при приближении вашего пальца». Встречающееся в этом письме словосочетание «электрический огонь» мы сегодня переводим как «электрический заряд».

Опыт Франклина с некоторыми изменениями был немедленно повторен рядом ученых. Так, француз Далибар установил в саду на изолирующей подставке железный шест высотой 40 футов; во время грозы из шеста вылетали искры. Одновременно с Франклином исследованиями электрической природы молнии занимались М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман. Во время одного из опытов, проводившегося в грозу, Рихман был убит молнией. В следующей главе мы вернемся к гибели Рихмана, в которой, как полагают, была «повинна» шаровая молния. Пока же подчеркнем, что благодаря исследованиям Франклина, Ломоносова, Рихмана в середине XVIII в. была доказана электрическая природа молнии. С этого времени стало ясно, что молния представляет

собой мощный электрический разряд, возникающий при достаточной сильной электризации туч. В заключение отметим, что установление электрической природы молнии позволило Франклину создать *громоотвод*, который правильнее было бы называть «молниеотводом». Это был длинный металлический стержень, который предохранял постройки от поражения молнией.

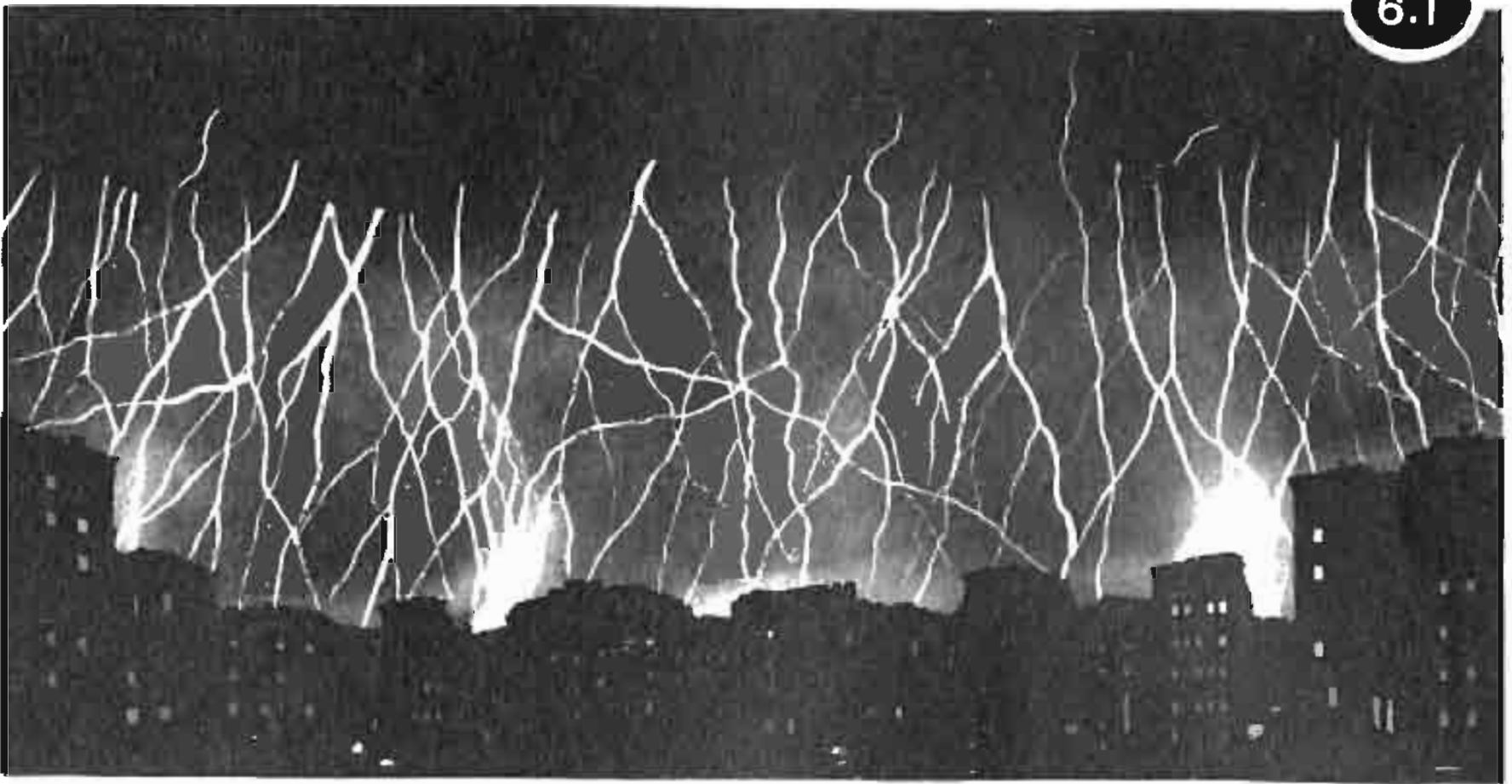
**Какие бывают молнии.** На рисунке 6.1 приведена любопытная фотография грозы. Она получена при большой выдержке, благодаря чему на одном и том же снимке оказались заснятыми сразу много молний. Большинство молний на снимке возникают между тучей и земной поверхностью, однако есть молнии, возникающие между тучами. Все эти молнии принято называть *линейными*. Длина отдельной линейной молнии может измеряться километрами.

Справа внизу на с. 91 показан довольно необычный вид молнии — так называемая *ленточная молния*. При этом наблюдается такая картина, как если бы возникли несколько почти одинаковых линейных молний, сдвинутых относительно друг друга.

Существует еще один вид молний, отличающийся своей загадочностью. Это так называемая *шаровая молния*. Она совершенно не похожа ни на линейную, ни на ленточную молнии. До сих пор природа этой молнии не разгадана, а главное, мы пока не умеем воспроизводить ее искусственно. Шаровой молнии будет посвящена следующая глава.

Линейную же молнию сравнительно нетрудно получить искус-





ственно. Для этого надо создать достаточно большую разность потенциалов между двумя электродами. Если, например, расстояние между электродами равно 1 м, то для возникновения электрического пробоя межэлектродного воздушного промежутка (для создания искусственной молнии) нужна разность потенциалов  $10^5 \dots 10^6$  В. На рисунке 6.2,а изображена такая искусственная молния. Надо заметить, что искусственные молнии весьма разнообразны, они могут иметь причудливую форму. В качестве примера укажем так называемый *скользящий разряд*, развивающийся (при определенной конструкции электродов) в плоскости от центра к периферии (рис.6.2,б).

**«Паспортные данные» линейной молнии.** Рассмотрим линейную молнию, возникающую между тучей и землей и имеющую длину, равную нескольким километрам. Разность потенциалов между тучей и землей достигает в данном случае  $10^9$  В. Это в тысячи раз пре-

вышает разность потенциалов между землей и нижней границей ионосферы, обеспечивающую атмосферные электрические токи хорошей погоды (см. предыдущую главу). Разряд молнии длится около 0,1 с. Средняя сила разряда составляет примерно  $10^3$  А, а общий заряд, переносимый молнией, достигает 100 Кл (в среднем около 20 Кл). Выделяющаяся в канале молнии энергия равна  $10^9 \dots 10^{10}$  Дж. Канал молнии очень узкий. Видимый канал имеет диаметр около 1 м; при этом основной ток протекает по еще более узкому «внутреннему» каналу диаметром всего 1 см.

Наблюдая разряд линейной молнии, мы не замечаем, что он состоит из *нескольких* (иногда до десятка) последовательных импульсов. Длительность каждого импульса составляет всего  $10^{-3}$  с. Промежутки между импульсами порядка  $10^{-2}$  с. Во время импульса канал молнии нагревается до  $2 \cdot 10^4$  К; в течение промежутка между импульсами он остывает до  $10^3$  К. Максимальная сила тока

В импульсе может превышать  $10^5$  А.

Предположим, что перпендикулярно к каналу молнии дует сильный ветер, который смещает канал на метр и более в секунду. В этом случае импульсы разряда оказываются пространственно смещенными относительно друг друга — возникает ленточная молния.

Рассмотрим задачу. Оценить энергию, выделяющуюся при разряде молнии, полагая, что электрическое поле между земной поверхностью и нижней границей тучи является однородным, т. е. подобно полю внутри плоского конденсатора. Горизонтальные размеры тучи  $4 \times 4$  км, расстояние от тучи до земли 1 км, разность потенциалов между тучей и землей  $10^9$  В.

Для оценки можно принять, что энергия молнии равна энергии плоского конденсатора, образуемого нижним краем тучи и земной поверхностью. Площадь  $S$  каждой пластины такого конденсатора определяется горизонтальными размерами тучи. В данном случае  $S = 16 \text{ км}^2 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ м}^2$ . Расстояние между пластинами конденсатора  $d = 10^3$  м, а разность потенциалов  $U = 10^9$  В. Сначала находим емкость  $C$  рассматриваемого природного конденсатора, используя формулу

$$C = \epsilon_0 S / d. \quad (6.1)$$

Здесь  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Подставляя числовые значения, получаем  $C = 1,5 \cdot 10^{-7}$  Ф = 0,15 мкФ. Хотя наш «конденсатор» имеет весьма внушительные размеры, его емкость оказывается довольно скром-



6.2



ной; в радиоприемниках применяются конденсаторы с электроемкостью в сто и тысячу раз большей. Правда, у нашего «конденсатора» очень велика разность потенциалов, поэтому и энергия оказывается большой. Энергию  $W$  находим по формуле

$$W = \frac{1}{2} CU^2. \quad (6.2)$$

Подставляя сюда численные значения, получаем  $W = 7,5 \cdot 10^{10}$  Дж. На самом деле энергия молнии по крайней мере на порядок меньше. Это вполне понятно, так как, во-первых, поле между тучей и землей лишь приближенно можно считать плоским и, во-вторых, одна молния не разряжает полностью «конденсатор» туча — земля.

### **Физика линейной молнии, проскакивающей между тучей и землей.**

Как уже говорилось, линейная молния представляет собой несколько импульсов, быстро следующих друг за другом. Каждый импульс — это пробой воздушного промежутка между тучей и землей, происходящий в виде искрового разряда. Начнем с рассмотрения первого (начального) импульса. В его развитии есть две стадии: сначала образуется канал разряда между тучей и землей, а затем по образовавшемуся каналу быстро проходит импульс основного тока.

Первая стадия (образование канала разряда) показана на рисунках 6.3, а, б, в. Все начинается с того, что в нижней части тучи формируется электростатическое поле очень большой напряженности —  $10^5 \dots 10^6$  В/м. Свободные электроны получают в таком поле огромные ускорения. Эти ускорения направлены вниз, поскольку нижняя часть тучи заряжена отрицательно, а поверхность земли положительно. На пути от одного

столкновения до другого электроны приобретают значительную кинетическую энергию. Поэтому, сталкиваясь с атомами или молекулами, они ионизируют их. В результате рождаются новые (вторичные) электроны, которые, в свою очередь, ускоряются в поле тучи и затем в столкновениях ионизируют новые атомы и молекулы. Возникают целые лавины быстрых электронов, образующие у самого «дна» тучи плазменные «нити» — так называемые *стримеры*.

Сливаясь друг с другом, стримеры дают начало *плазменному каналу*, по которому впоследствии пройдет импульс основного тока (рис. 6.3, а). Этот развивающийся от «дна» тучи к поверхности земли плазменный канал наполнен свободными электронами и ионами и поэтому может хорошо проводить электрический ток. Его называют *лидером* или, точнее, *ступенчатым лидером*. Дело в том, что канал формируется не плавно, а скачками — «ступенями».

Головка лидера выскакивает из тучи и движется к земле с огромной скоростью (порядка  $10^7$  м/с). Пройдя около 50 м, она внезапно останавливается. Остановка длится около 50 мкс. Лидер как бы «набирается сил», как бы «размышляет», в каком направлении ему двигаться далее. Затем следует бросок еще на 50 м, причем совсем не обязательно в направлении предыдущего броска, — и снова остановка на 50 мкс. Так отдельными бросками (ступенями) головка лидера постепенно приближается к земной поверхности, оставляя позади себя канал разряда в виде прихотливой ломаной линии (рис. 6.3, б). Заметим, что лидер светится относительно слабо, он почти не виден; при высоко-

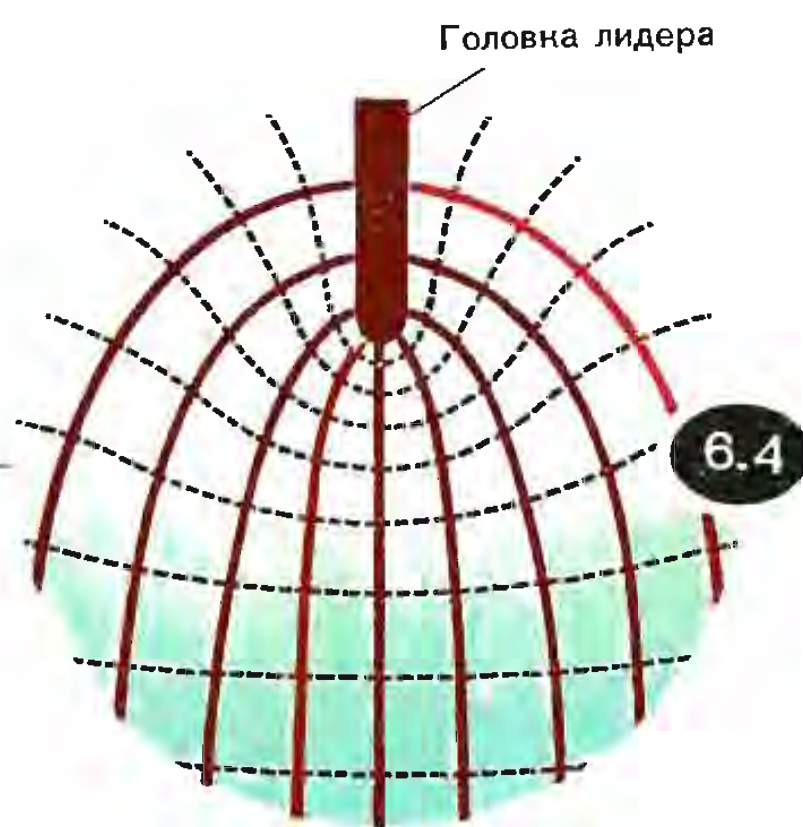




6.3

скоростной фотосъемке его головка выглядит небольшим светлым пятнышком, рывками перемещающимся к земле.

Почему в движении лидера наступают паузы и притом относительно регулярные — этого мы пока не знаем. Но сами физические процессы, происходящие вблизи головки лидера, вполне понятны.



6.4

Напряженность поля под тучей достаточно велика — она составляет  $10^3 \dots 10^4$  В/м; в области пространства непосредственно перед головкой лидера она еще больше. Увеличение напряженности поля в этой области хорошо объясняет рисунок 6.4, где штриховыми кривыми показаны сечения эквипотенциальных поверхностей, а сплошными кривыми — линии напряженности поля. В сильном электрическом поле вблизи головки лидера происходит интенсивная ионизация атомов и молекул воздуха. Она происходит за счет, во-первых, бомбардировки атомов и молекул быстрыми электронами, вылетающими из лидера (так называемая ударная ионизация), и, во-вторых, поглощения

атомами и молекулами фотонов ультрафиолетового излучения, испускаемого лидером (фотоионизация). Вследствие интенсивной ионизации встречающихся на пути лидера атомов и молекул воздуха плазменный канал растет, лидер движется к поверхности земли.

Но вот лидер, наконец, достиг земли (рис. 6.3, в). С учетом остановок по пути ему понадобилось на это время 10...20 мс при расстоянии 1 км между тучей и земной поверхностью. Теперь тучу соединяет с землей плазменный канал, прекрасно проводящий ток. Канал ионизованного газа как бы замкнул тучу с землей накоротко. На этом первая стадия развития начального импульса заканчивается.

Вторая стадия протекает быстро и мощно. По проложенному лидером пути устремляется основной ток (рис. 6.3, г). Импульс тока длится примерно 0,1 мс. Сила тока достигает значений порядка  $10^5$  А. Выделяется значительное количество энергии (до  $10^9$  Дж). Температура газа в канале достигает  $(1...2) \cdot 10^4$  К. Вот теперь как раз и рождается тот необычайно яркий свет, который мы наблюдаем при разряде молнии, и возникает гром, вызванный резким расширением внезапно нагретого газа.

Существенно, что и свечение, и разогрев плазменного канала развиваются в направлении от земли к туче, т. е. снизу вверх. Поясним это, разбив условно весь канал на несколько частей. Как только канал образовался (головка лидера достигла земли), вниз соскакивают прежде всего те электроны, которые находились в самой нижней его части; поэтому нижняя часть канала первой начинает светиться и разогреваться. Затем

к земле устремляются электроны из следующей (более высоко находящейся) части канала; начинаются свечение и разогрев этой части. И так постепенно — от низа до верха — в движение к земле включаются все новые и новые электроны; в результате свечение и разогрев канала распространяются в направлении снизу вверх.

Слева вверху на с. 91 даны последовательные снимки, демонстрирующие постепенное формирование канала разряда. Ниже представлены снимки, показывающие, как развивается импульс основного тока. Видно, что это развитие совершается в направлении снизу вверх.

Мы видим, таким образом, что молния бьет не из тучи в землю, как это обычно принято считать, а, наоборот, из земли в тучу. Зевсы, юпитеры, перуны и прочие боги-громовержцы метали свои «молнии», что называется, «от себя» — их молнии били сверху, из туч. Так это и изображалось на всевозможных картинах. Действительность оказалась иной — настоящие молнии бьют снизу вверх. И уже по одной лишь этой причине утрачивают даже подобие «божественного происхождения».

Но вернемся к физике молнии. После того как прошел импульс основного тока, наступает пауза длительностью от 10 до 50 мс. За это время канал практически гаснет, его температура падает примерно до  $10^3$  К, степень ионизации канала существенно уменьшается.

Однако в туче еще сохранился большой заряд, поэтому новый лидер устремляется из тучи к земле, готовя дорогу для нового импульса тока. Новый лидер идет по

пути, который был проторен начальным лидером,— ведь на этом пути сохранилось еще много **Ионов**. Поэтому новому лидеру, вообще говоря, не приходится «выбирать дороги», он без остановок, за время порядка 1 мс, пробегает весь путь сверху до низу. Его теперь называют не ступенчатым, а стреловидным лидером. И снова следует мощный импульс основного тока, распространяющийся по восстановленному каналу снизу вверх.

После очередной паузы, измеряемой десятками миллисекунд, все повторяется. В итоге высвечиваются несколько мощных импульсов, которые мы, естественно, воспринимаем как единый разряд молнии, как единую яркую вспышку.

Такова в общих чертах физика линейной молнии, возникающей между тучей и землей. Следует оговориться, что действительная картина физических процессов оказывается сложнее. Так, не всегда стреловидный лидер следует точно и полностью по пути, проложенному ступенчатым лидером. В какой-то точке этого пути он может вдруг «предпочесть» изменение дальнейшего маршрута. И тогда мы наблюдаем молнию в форме раздвоенной ломаной линии.

**Гром.** Гром возникает вследствие резкого расширения воздуха при быстром повышении температуры в канале разряда молнии.

Вспышку молнии мы видим практически как мгновенную

вспышку и в тот же момент, когда происходит разряд; ведь свет распространяется со скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/с. Что же касается звука, то он распространяется значительно медленнее. В воздухе его скорость равна 330 м/с. Поэтому мы слышим гром уже после того, как сверкнула молния. Чем дальше от нас молния, тем, очевидно, длиннее пауза между вспышкой света и громом и, кроме того, слабее гром. Измеряя длительность таких пауз, можно приблизительно оценить, как далеко от нас в данный момент гроза, насколько быстро она приближается к нам или, напротив, удаляется от нас. Гром от очень далеких молний вообще не доходит — звуковая энергия рассеивается и поглощается по пути. Такие молнии называют *зарницами*.

Почему мы слышим гром в течение нескольких секунд, тогда как разряд молнии (с учетом всей совокупности последовательных импульсов) длится всего 0,1...0,2 с? Причин тому две. Во-первых, молния имеет большую длину (она измеряется километрами); звук от разных ее участков доходит до нас в разные моменты времени. Во-вторых, происходит отражение звука от облаков и туч — возникает эхо. Эти две причины и приводят к тому, что вслед за короткой вспышкой молнии слышатся более или менее долгие раскаты грома.

Заметим, что отражением звука от облаков объясняется происходящее иногда усиление громкости звука в конце громовых раскатов.



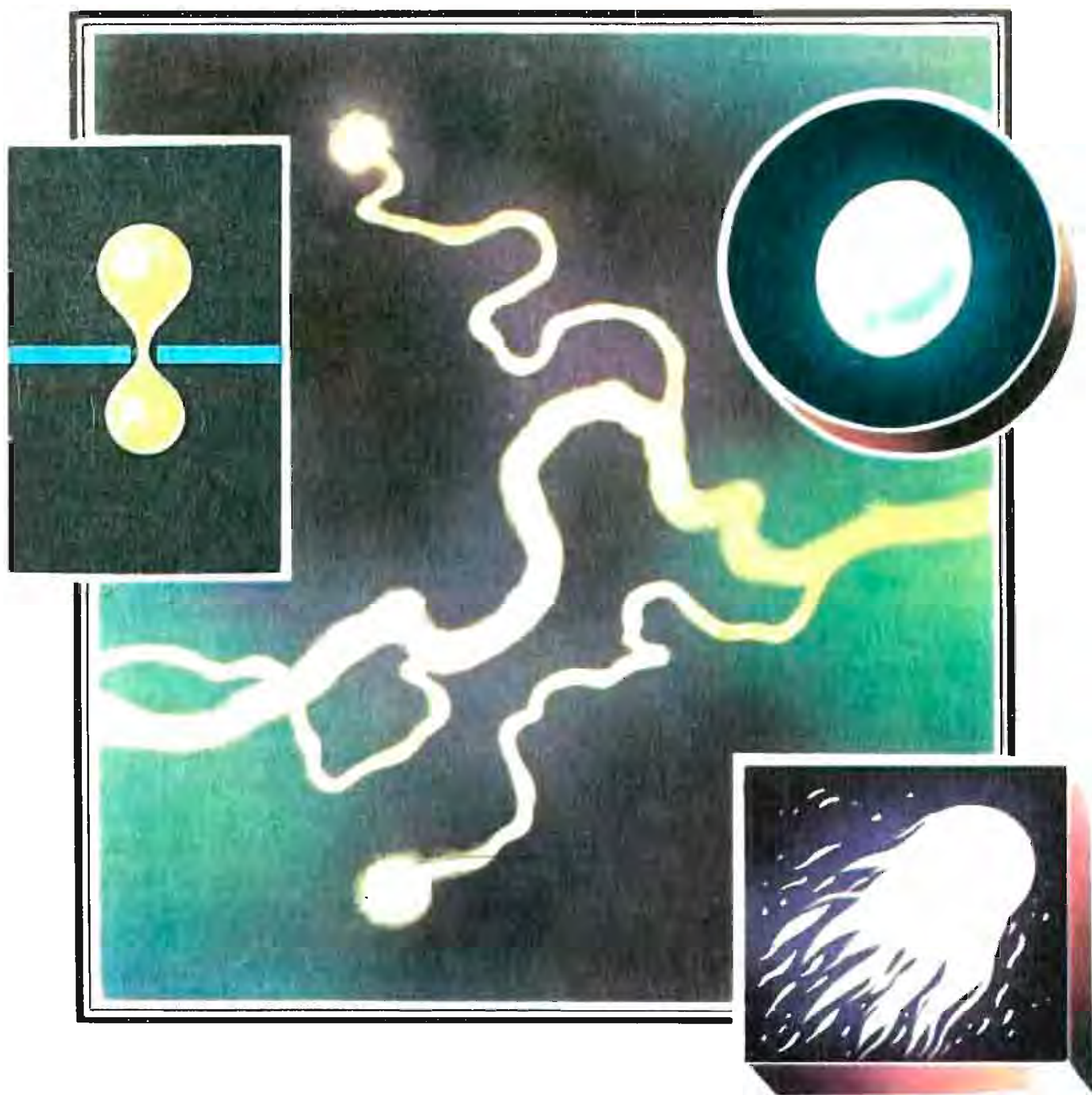
# Глава

# 7

Что об огненных шарах, по воздуху носящихся и часто с великим громом разрывающихся, упоминается, то их не за иное что почитать должны, как за огненную материю, молнии подобную. Ибо не можно доказать, чтоб они были твердые шары, из собравшихся горючих паров в атмосфере родившиеся.

*Из учебника физики середины XVIII в.*

## шаровая молния



Это случилось 26 июля 1752 г. С утра в Петербурге было душно, а к середине дня сгустились тучи, началась гроза. В это время в Физической лаборатории Петербургской Академии наук профессор Г. В. Рихман приступил к эксперименту. Он давно дожидался грозы, чтобы понаблюдать, как она подействует на изобретенное им устройство для измерения атмосферного электрического поля. Вместе с Рихманом в лаборатории находился его друг — гравер Академии наук. Люди, оказавшиеся на улице вблизи лаборатории, видели, как в металлический стержень на крыше попала молния. И тотчас они услышали громкие крики из лаборатории. Кричал гравер — на нем горела одежда. Что же произошло? Металлический стержень, выходящий на крышу, был соединен с измерительным устройством Рихмана. И вот, когда в стержень попала молния, от устройства вдруг отделился голубой светящийся шар величиной с кулак. Он ударил стоявшего в полушаге от устройства Рихмана прямо в лоб. Раздался громкий треск, похожий на выстрел. Рихман упал — он был мгновенно убит. Раскалившаяся проволока от устройства задела гравера, зажгла на нем одежду.

Сохранилось специальное описание этого прискорбного происшествия. Его составил М. В. Ломоносов, который сразу же посетил лабораторию и подробно исследовал на месте последствия происшедшего. Имеется также гравюра, сделанная очевидцем трагической смерти Рихмана. Все это позволяет сделать вывод, что Рихман был убит шаровой молнией, возникшей сразу после удара линейной молнии.

Шаровая молния... Так издавна называли светящиеся шаровидные образования, время от времени наблюдаемые во время грозы в воздухе, как правило, вблизи поверхности. Шаровая молния абсолютно не похожа на обычную (линейную) молнию ни по своему виду, ни по тому, как она себя ведет. Обычная молния кратковременна; шаровая живет десятки секунд, минуты. Обычная молния сопровождается громом; шаровая совсем или почти бесшумна. В поведении шаровой молнии много непредсказуемого: неизвестно, куда именно направится светящийся шар в следующее мгновение, как он прекратит свое существование (тихо или же со взрывом).

Шаровая молния задает нам множество загадок. При каких условиях она возникает? Как ей удастся сохранять свою форму столь долго? Почему она светится и в то же время почти не излучает тепла? Каким образом она проникает в закрытые помещения? На эти и ряд других вопросов у нас пока нет ясного ответа. В настоящее время мы можем лишь предполагать, делать гипотезы.

**Наблюдения шаровой молнии.** С точки зрения физики шаровая молния — интереснейшее явление природы. К сожалению, мы еще не умеем получать ее искусственно (ведь мы не знаем, при каких условиях она возникает). Поэтому единственный пока метод изучения шаровой молнии — это *систематизация и анализ случайных наблюдений ее*. Впервые такая систематизация была предпринята в первой половине XIX в. французским физиком Д. Араго, собравшим сведения о 30 случа-

ях наблюдения шаровой молнии.

Опросы случайных наблюдателей шаровой молнии проводились с тех пор неоднократно. В декабре 1975 г. журнал «Наука и жизнь» обратился к своим читателям с анкетой, содержащей вопросы, касающиеся этого удивительного явления природы. Журнал просил тех читателей, которые лично наблюдали шаровую молнию, ответить на вопросы анкеты, прислать письма с описанием обстоятельств наблюдения и различных подробностей. В течение 1976 г. было получено 1400 писем. Они интересны уже потому, что написаны очевидцами, в них содержится много фактических данных.

Познакомимся с выдержками из нескольких писем.

«Я видел с расстояния около 10 м, что шаровая молния светло-желтого цвета диаметром 30...40 см выскочила из земли в месте удара обычной молнии. Поднявшись на высоту 6...8 м, она начала двигаться горизонтально. При этом она пульсировала, принимая то шаровую, то эллипсоидальную форму. Пройдя за 1 мин расстояние около 50 м, она наткнулась на сосну и взорвалась».

«Шаровую молнию я встретил вечером перед грозой, когда шел на охоту. Она была около 25 см в диаметре, белая, двигалась горизонтально, повторяя рельеф местности».

«Я видел, как шаровая молния диаметром 10 см прошла через отверстие в окне диаметром 8 мм».

«После сильного удара грома в открытую дверь влетела бело-голубая шарообразная масса диаметром 40 см и начала быстро двигаться по комнате. Она подкатилась под табурет, на котором я сидел. И хотя она оказалась непосредственно у моих ног, тепла я не ощутил. Затем шаровая молния притянулась к батарее

центрального отопления и исчезла с резким шипением. Она оплавилла участок батареи диаметром 6 мм, оставив лунку глубиной 2 мм».

«В городе разразилась сильная гроза с ливнем. В открытую форточку окна кухни на втором этаже влетела шаровая молния. Это был однородный желтый шар 20 см в диаметре. Шар медленно двигался по горизонтали, чуть снижаясь; прошел расстояние около 1 м. Он плыл в воздухе, как плавает тело внутри жидкости. Внутри шара стали образовываться тонкие красноватые полоски. Затем он, не распадаясь на части и не падая, тихо, без звука исчез. Все наблюдение заняло около 30 с».

Собирание наблюдений шаровой молнии — это первый шаг в ее изучении. Второй шаг — систематизация и анализ собранного фактического материала. После этого можно переходить к третьему шагу — обобщениям и заключениям, касающимся физической природы шаровой молнии.

Посмотрим же, что дает систематизация многочисленных наблюдений этого интереснейшего явления природы.

### **Как выглядит шаровая молния?**

Уже из самого названия следует, что эта молния имеет форму шара и, следовательно, совершенно не похожа на обычную (линейную) молнию. Строго говоря, ее форма всего лишь близка к шару; молния может вытягиваться, принимая форму эллипсоида или груши, ее поверхность может колыхаться. Небольшое число наблюдателей (0,3%) утверждают, что встретившаяся им шаровая молния имела форму тора.

С учетом всех замечаний будем считать, что шаровая молния — это шар или почти шар. Он светит-



ся — иногда тускло, а иногда достаточно ярко. Яркость света шаровой молнии сравнивают с яркостью света 100-ваттной лампочки. Чаще всего (примерно в 60% случаев) шаровая молния имеет желтый, оранжевый или красноватый цвет. В 20% случаев — это белый шар, в 20% — синий, голубой. Иногда цвет молнии изменяется во время наблюдения. Перед угасанием молнии внутри нее могут возникать темные области в виде пятен, каналов, нитей.

Как правило, шаровая молния имеет *достаточно четкую поверхность*, отграничивающую вещество молнии от окружающей ее воздушной среды. Это типичная граница раздела двух *разных фаз*. Наличие такой границы говорит о том, что вещество молнии находится в особом фазовом состоянии. В отдельных случаях на поверхности молнии начинают плясать язычки пламени, из нее выбрасываются снопы искр. На с. 101 показаны две шаровые молнии: молния с четкой поверхностью и сильно искрящая («фейерверочная»). Там же приведен снимок перемещающейся в пространстве шаровой молнии, полученный при достаточно длительной экспозиции.

Диаметр шаровых молний находится в диапазоне от долей сантиметра до нескольких метров. Чаще всего встречаются молнии диаметром 15...30 см.

Обычно шаровая молния движется бесшумно. Но может издавать шипение или жужжание — особенно когда она искрит.

**Как она себя ведет?** Шаровая молния может двигаться по весьма причудливой траектории. Вмес-

те с тем в ее движении обнаруживаются определенные закономерности. Во-первых, возникнув где-то вверху, в тучах, она опускается поближе к поверхности земли. Во-вторых, оказавшись у поверхности земли, она движется далее *почти горизонтально*, обычно повторяя рельеф местности. В-третьих, молния, как правило, *обходит*, огибает проводящие ток объекты и, в частности, людей. В-четвертых, молния обнаруживает явное «желание» проникать *внутри помещений*.

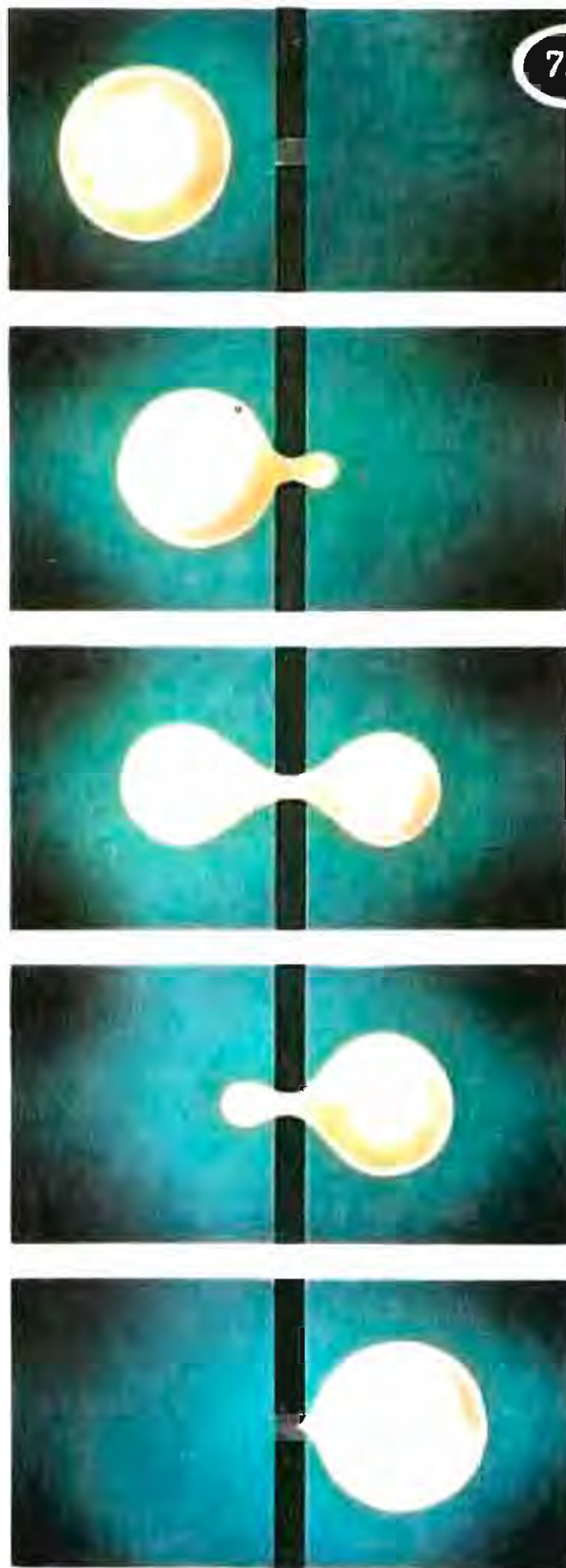
Когда молния плавает над поверхностью земли (обычно на высоте метра или несколько больше), она напоминает тело, находящееся в состоянии невесомости. По-видимому, вещество молнии имеет почти такую же плотность, что и воздух. Точнее, молния *немного тяжелее воздуха* — недаром она, в конечном счете, всегда стремится опуститься вниз. Ее плотность составляет  $(1...2) \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. Разницу между силой тяжести и выталкивающей (архимедовой) силой компенсируют конвекционные воздушные потоки, а также сила, с какой действует на молнию атмосферное электрическое поле. Последнее обстоятельство является весьма важным. Как известно, человек не имеет органов, реагирующих на напряженность электрического поля. Иное дело шаровая молния. Вот она обходит железный вагончик по периметру, огибает наблюдателя или груды металла, копирует в своем движении рельеф местности — во всех этих случаях она перемещается вдоль эквипотенциальной поверхности. Во время грозы земля и объекты на ней заряжаются положительно, значит, шаровая молния, обходящая объекты и ко-

пирующая рельеф, также заряжена положительно. Если, однако, встречается предмет, заряженный отрицательно, молния притянется к нему и скорее всего взорвется. С течением времени заряд в молнии может изменяться, и тогда меняется характер ее движения. Одним словом, шаровая молния очень чутко реагирует на электрическое поле вблизи поверхности земли, на заряд, имеющийся на объектах, которые оказываются на ее пути. Так, молния стремится переместиться в те области пространства, где напряженность поля меньше; этим можно объяснить частое появление шаровых молний внутри помещений.

Вызывает удивление способность шаровой молнии проникать в помещение сквозь щели и отверстия, размеры которых много меньше размеров самой молнии. Так, молния диаметром 40 см может пройти сквозь отверстие диаметром всего в несколько миллиметров. Проходя сквозь малое отверстие, молния очень сильно деформируется, ее вещество как бы переливается через отверстие. Еще более удивительна способность молнии после прохождения сквозь отверстие восстанавливать свою шаровую форму (рис. 7.1). Следует обратить внимание на способность шаровой молнии сохранять форму шара, так как это явно указывает на наличие поверхностного натяжения у вещества молнии.

Скорость движения шаровой молнии невелика: 1...10 м/с. За ней нетрудно следить. Внутри помещений молния может на некоторое время даже останавливаться, зависая над полом.

Живет шаровая молния примерно от 10 с до 1 мин. Меньше живут очень маленькие молнии



(диаметром порядка сантиметра и меньше) и очень большие (диаметром около метра и больше). Наиболее долго живут молнии диаметром 10...40 см. Существуют три разных способа прекращения существования молнии. Чаще всего (в 55% случаев) молния взрывается. В 30% случаев молния спокойно угасает (из-за нехватки запаса энергии, накопленной в ней). В 15% случаев внутри молнии развиваются неустойчивости, и она распадается на части. Маленькие молнии обычно угасают («сгорают»); большие «предпочитают» распадаться на части.

Вообще надо сказать, что в поведении шаровой молнии немало коварства. Мы не знаем, обойдет она тот или иной объект или, напротив, притянется к нему. Неизвестно, взорвется она или спокойно угаснет. Наконец, можно лишь гадать, в какой именно момент произойдет взрыв.

Ну а если взрыв все же происходит, то, спрашивается, насколько он разрушителен? Это определяется, очевидно, запасом энергии молнии.

**Сколько энергии содержится в шаровой молнии?** Оценить минимальное количество энергии в шаровой молнии можно по тем последствиям, которые она оставляет после своего исчезновения. Воспользуемся сообщением одного из наблюдателей: «Она оплавилась участок батареи диаметром 6 мм, оставив лунку глубиной 2 мм». Значит, молния испарила около 0,45 г железа. Для этого требуется энергия, равная 4 кДж. Естественно, что не вся (и наверное, далеко не вся) энергия шаровой молнии была израсходована на испарение

небольшого участка батареи, так что полученный результат можно рассматривать всего лишь как оценку нижней границы энергии молнии: эта энергия оказывается не меньше нескольких килоджоулей.

Вот еще одно из наблюдений шаровой молнии: «Молния диаметром 30 см взорвалась около водопроводного крана. Этот кран представлял собой трубу диаметром 3 см и высотой 80 см. После взрыва труба оказалась скрученной и была покрыта окалиной, хотя и не накалилась докрасна». Чтобы скрутить железную трубу, надо разогреть некоторый ее участок до достаточно высокой температуры. В то же время, как указывает наблюдатель, труба не накалилась докрасна. Поэтому можно предположить, что молния нагрела участок трубы, скажем, на 600 К. Длину этого участка будем полагать приблизительно равной диаметру трубы.

Решим в связи с этим следующую задачу. Сколько энергии требуется для нагревания на  $\Delta T=600$  К участка железной трубы длиной  $l=5$  см? Наружный радиус трубы  $R=1,5$  см, внутренний  $r=1,2$  см. Удельная теплоемкость железа  $c=0,71$  Дж/(г·К), плотность железа  $\rho=7,8$  г/см<sup>3</sup>.

Согласно условию задачи, надо нагреть участок трубы длиной  $l$ , т. е. нагреть массу железа:

$$m = \rho(\pi R^2 - \pi r^2)l.$$

Используя числовые значения величин, получаем  $m=100$  г. Отсюда находим искомую энергию:  $W = cm\Delta T = 4,2 \cdot 10^4$  Дж = 42 кДж.

В одном из писем сообщалось, что шаровая молния диаметром 30 см расщепила торчащую из воды деревянную причальную сваю диа-



метром 30 см вдоль волокон на длинные щепки. Воспользуемся этим сообщением для оценки энергии молнии.

Рассмотрим задачу. Сколько энергии необходимо для того, чтобы пар, образовавшийся в результате нагрева и испарения воды, разорвал деревянную сваю вдоль волокон? Радиус сваи  $r=0,15$  м; длина участка сваи, в пределах которого образуется пар,  $l=0,2$  м; предел прочности дерева, соответствующий его расщеплению вдоль волокон,  $p_0=3 \cdot 10^6$  Па; начальная температура воды  $T_1=20^\circ\text{C}$ ; удельная теплоемкость воды  $c=4,19$  Дж/(г · К), удельная теплота парообразования  $\lambda=2,26$  кДж/г. Коэффициент пористости дерева принять равным 0,1.

Под коэффициентом пористости  $\alpha$  понимают долю объема древесины, приходящегося на поры. Разрывающий сваю пар занимает объем пор

$$V = \alpha \pi r^2 l.$$

В этом объеме при температуре кипения воды  $T=380$  К необходимо обеспечить давление водяных паров, равное  $p_0$ . Для чего надо нагреть до температуры кипения и испарить некоторое количество молей воды. Обозначим это количество молей через  $x$ . Чтобы найти его, воспользуемся уравнением Менделеева — Клапейрона для идеального газа:

$$p_0 V = x R T, \quad (7.1)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $R=8,31$  Дж/(моль · К). Учитывая, что  $V=\alpha \pi r^2 l$ , получаем

$$x = \alpha \pi r^2 l \frac{p_0}{R T}. \quad (7.2)$$

Используя числовые значения величин, находим  $x=1,35$  моль. Молекулярный вес воды равен 18; значит, один моль воды имеет массу 18 г. Искомую энергию  $W$  рассчитываем по формуле:

$$W = \mu x (\lambda + c \Delta T), \quad (7.3)$$

где  $\mu=18$  г/моль,  $\Delta T=100-20=80$  К. Подставляя в (7.3) числовые значения, находим  $W=63$  кДж.

Принимая во внимание результаты рассмотренных задач, можно заключить, что энергия, запасенная в шаровой молнии диаметром 25 см, находится в пределах примерно 100 кДж. Такая оценка представляется вполне правдоподобной; она согласуется с результатами, получаемыми на основе большого количества наблюдений шаровой молнии. Если энергия молнии 100 кДж, а ее диаметр 25 см, то, следовательно, плотность энергии оказывается порядка 10 Дж/см<sup>3</sup>. В общем случае (с учетом молний разных диаметров) можно считать, что энергия шаровой молнии принимает значения от нескольких килоджоулей до нескольких сотен килоджоулей, а плотность энергии лежит в пределах примерно от 1 до 10 Дж/см<sup>3</sup>.

**Опасна ли шаровая молния?** В принципе, конечно, она опасна. Вспомним хотя бы смерть Рихмана. Впрочем, следует принять во внимание, что Рихман экспериментировал во время грозы со специальным устройством, исследуя атмосферное электричество. Возможно, что, сам того не желая, он искусственно создал шаровую молнию, которая и поразила его.

Вообще же встречи с естественной шаровой молнией, как правило, заканчиваются без трагических последствий. Из проведенного журналом «Наука и жизнь» опроса выяснилось, что из полутора тысяч писем лишь в пяти сообщалось о смертельном исходе. При этом несколько смертей про-

изошло не от самого взрыва шаровой молнии, а от его последствий (например, человек был убит осколком стекла после взрыва молнии). Как отмечалось, энергия, выделяющаяся при взрыве шаровой молнии, не превышает приблизительно 100 кДж. Этого достаточно, чтобы оплавить небольшой участок металла, согнуть не слишком толстую трубу, расщепить бревно, пробить деревянную перегородку, отломить уголок каменной кладки, устроить пожар. Однако каких-либо действительно серьезных разрушений шаровая молния произвести, по-видимому, не в состоянии.

Чаще всего шаровая молния обходит человека стороной. Многих наблюдателей удивляет тот факт, что даже на близком расстоянии они не ощущали тепла от молнии. В отдельных случаях даже прямое прикосновение молнии не причиняло никакого вреда; в других случаях такое прикосновение давало ожоги, хотя и болезненные, но отнюдь не смертельные. Следовательно, температура на поверхности молнии невысока — она либо соответствует обычной температуре, либо немного превышает ее (по-видимому, не более чем на 100 К). Внутри шаровой молнии температура выше, чем на ее поверхности, однако вряд ли она превышает 300...400 °С.

Можно утверждать, что опасность шаровой молнии явно преувеличена. Как показывает практика, куда более опасна линейная молния. Наш страх перед шаровой молнией основан не на действительной опасности, а на невозможности предвидеть, как она поведет себя через секунду, две, три. Мы не знаем, как надо защищать-

ся от нее. В книге С. Сингера «Природа шаровой молнии» рассказывается, как один профессор вспоминал, что «в дни его детства окна их дома во время грозы всегда оставались открытыми, чтобы шаровая молния, если она вдруг появится, могла вылететь беспрепятственно». Другой профессор утверждал, что «в их доме окна во время грозы закрывались, чтобы сквозняки не втянули огненный шар в комнату».

**Как она возникает?** В подавляющем большинстве случаев (более 90%) шаровая молния возникает в период грозовой активности, когда наблюдаются обычные молнии и когда напряженность атмосферного электрического поля особенно велика. Но есть отдельные сообщения о появлении шаровой молнии и в ясную погоду.

Вопрос о том, как возникает шаровая молния, является, пожалуй, наиболее сложным и неясным. К сожалению, не так уж много людей оказались свидетелями ее возникновения. В большинстве своем наблюдатели утверждают, что шаровая молния возникла либо сразу после разряда, либо перед разрядом обычной молнии, что бывает реже.

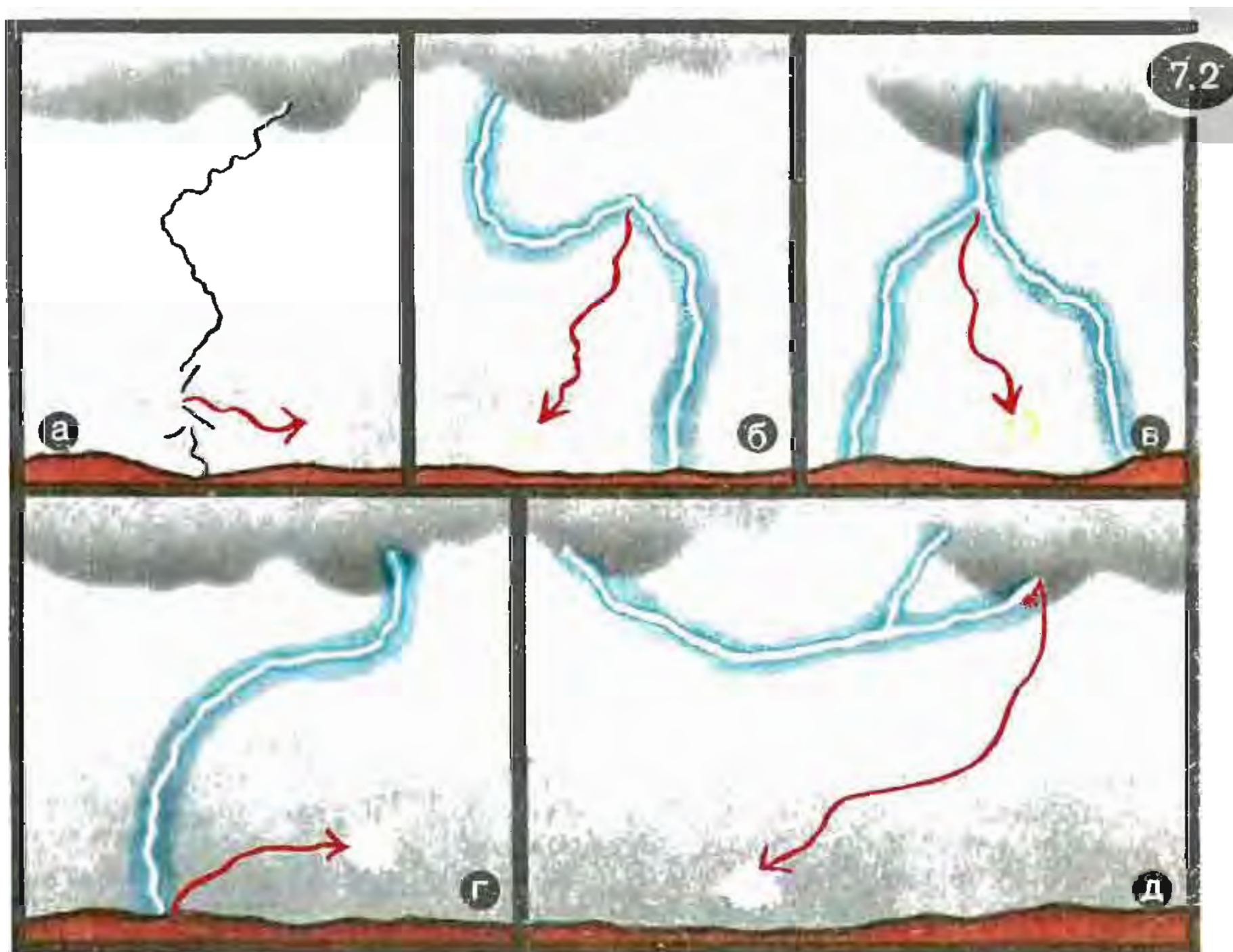
Как именно рождается шаровая молния при разряде обычной молнии? На этот счет ничего определенного сказать пока нельзя. Имеются лишь разные предположения. Можно, например, предположить, что шаровая молния возникает в момент, когда спускающийся из тучи ступенчатый лидер встречается в нескольких десятках метров над землей со встречным лидером (рис. 7.2,а). Напомним, что о лидерах мы рас-

сказывали в предыдущей главе. Возможно также, что шаровая молния возникает в месте особенно резкого излома обычной молнии (рис.7.2,б) или в том месте, где произошло ее раздвоение (рис.7.2,в). Нельзя не принимать во внимание и сообщения, что шаровая молния возникла из земли или воды в том месте, которое было только что поражено обычной молнией (рис.7.2,г). Наконец, шаровая молния может родиться при электрическом разряде между тучами (рис.7.2,д). Понятно, что во всех этих случаях шаровая молния образуется за счет энергии разряда обычной молнии.

А как быть с теми случаями (о них пишут некоторые очевид-

цы), когда шаровая молния выскакивает из телефонных аппаратов, электрических розеток и т. д.? Можно предположить, что она возникает за счет энергии разряда обычной молнии, которая подводится к телефонному аппарату или розетке по подключенным к ним проводам.

**Как часто она появляется?** Шаровую молнию принято считать весьма редким явлением по той причине, что ее удается наблюдать крайне редко. Однако это еще не означает, что шаровая молния редко возникает. Не следует путать частоту ее наблюдений с частотой появлений. Суще-





ствуется гипотеза, согласно которой шаровая молния возникает *столь же часто*, как и обычная молния. Обычная молния ярко вспыхивает, хорошо видна за километры и даже десятки километров; к тому же она оповещает о своем возникновении раскатами грома. Что же касается шаровой молнии, то она, конечно, далеко не столь заметна. Чтобы обратить внимание на сравнительно небольшой шар, движущийся практически бесшумно и светящийся как 50-ваттная лампочка, необходимо, что называется, столкнуться с ним «нос к носу». Кроме того, надо учесть, что шаровую молнию наблюдают вблизи земной поверхности (на высоте от метра до десятков метров), так что она легко может скрыться за теми или иными объектами. Предположим, что шаровая молния действительно возникает в месте удара обычной молнии. Но разве часто удается наблюдать это место в непосредственной близости? Могут возразить, что шаровую молнию нетрудно опознать по ее взрыву. Однако не всегда она заканчивает свое существование взрывом. Могут сказать, что, как отмечалось, шаровая молния взрывается в большинстве случаев (приводилось число — 55% случаев). Но ведь эти 55% относятся к случаям наблюдения, а не к случаям появления. Может быть, значительно чаще молния заканчивает свое существование спокойно, без взрыва; просто мы ее не замечаем.

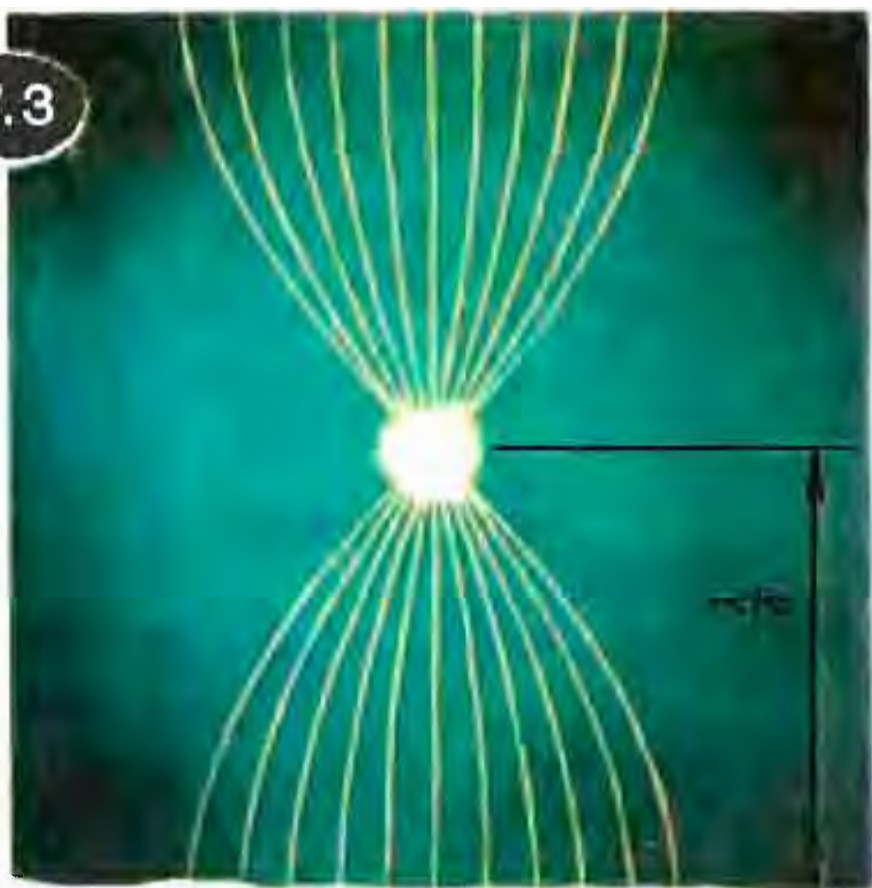
Итак, вполне возможно, что шаровая молния — не такое уж редкое явление. Все дело в том, что наблюдатель в состоянии заметить лишь те шаровые молнии, которые либо случайно возникли вблизи него, либо приблизились

к нему; во всяком случае, вряд ли кто заметит небольшой светящийся шарик на расстоянии в несколько километров. Конечно, это только предположение, гипотеза. В настоящее время мы не можем ее подтвердить, как, впрочем, и не имеем оснований отбросить.

**О физической природе шаровой молнии.** Если физическая природа линейной молнии была установлена более двухсот лет тому назад, то природа шаровой молнии до сих пор остается неразгаданной. Строго говоря, пока у нас даже нет твердого основания утверждать: то, что мы сегодня называем «шаровой молнией», есть некое *единое* явление, а не несколько явлений, имеющих разную физическую природу. Можно напомнить, что в прошлые века шаровую молнию нередко путали с метеоритами и огнями святого Эльма. Может быть, и сегодня мы совершаем аналогичную ошибку, объединяя единым термином физически разные явления? Поскольку, однако, в настоящее время мы не имеем каких-либо веских доводов, подкрепляющих это сомнение, то естественно считать, что в основе всех «шаровых молний» лежит общий физический механизм.

Все гипотезы, касающиеся физической природы шаровой молнии, можно разделить на две группы. В одну группу входят гипотезы, согласно которым шаровая молния *непрерывно получает энергию извне*. Предполагается, что молния каким-то образом (по какому-то каналу) получает энергию, накапливающуюся в облаках и тучах, причем тепловыделение в самом канале оказывается не-

7.3



значительным, так что вся передаваемая энергия сосредоточивается в объеме шаровой молнии, вызывая его свечение. К другой группе относятся гипотезы, согласно которым шаровая молния после своего возникновения становится *самостоятельно существующим объектом*. Этот объект состоит из некоего вещества, внутри которого происходят процессы, приводящие к выделению энергии.

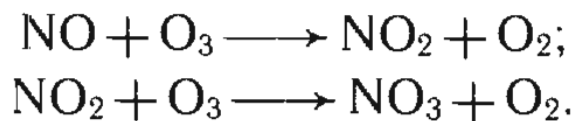
Среди гипотез первой группы отметим гипотезу, предложенную в 1955 г. академиком П. Л. Капицей. Предполагается, что энергия подводится к шаровой молнии при помощи электромагнитного излучения диапазона сверхвысоких частот (точнее говоря, диапазона дециметровых и метровых волн). Сама шаровая молния рассматривается как пучность электрического поля стоячей электромагнитной волны, находящаяся на расстоянии четверти длины волны от поверхности земли или какого-либо проводящего объекта (рис.7.3). В области этой пучности

напряженность поля очень высока, и поэтому здесь образуется сильно ионизованная плазма, которая и является веществом молнии. Несмотря на многие привлекательные стороны данной гипотезы, она все же представляется несостоятельной. Дело в том, что она не может объяснить характера перемещений шаровой молнии, ее причудливого блуждания и, в частности, зависимости ее поведения от воздушных потоков. В рамках данной гипотезы трудно объяснить хорошо наблюдаемую четкую поверхность молнии. К тому же взрыв такой шаровой молнии вообще не должен сопровождаться выделением энергии. Если по каким-то причинам поступление энергии электромагнитного излучения вдруг прекращается, нагретый в пучности волны воздух быстро остывает и, сжимаясь, воспроизводит громкий хлопок.

Следует признать, что такими недостатками страдают все гипотезы первой группы. Учитывая накопленный фактический материал, можно вполне уверенно утверждать, что *шаровая молния — это самостоятельно существующее тело*. Иными словами, следует, по-видимому, отдать предпочтение гипотезам второй группы.

Остановимся на двух таких гипотезах. Одна из них предполагает *химическую природу* шаровой молнии. Эту гипотезу детально разрабатывал в середине 70-х годов Б. М. Смирнов. Предполагается, что шаровая молния состоит из обычного воздуха (имеющего температуру примерно на  $100^\circ$  выше температуры окружающей атмосферы), небольшой примеси озона  $O_3$  и оксидов азота  $NO$  и  $NO_2$ . Принципиально важную роль играет здесь озон, образу-

щийся при разряде обычной молнии; его концентрация около 3%. Внутри шаровой молнии происходят химические реакции:



Они сопровождаются выделением энергии. При этом в объеме диаметром 20 см выделяется примерно 1 кДж энергии. Это мало, как мы уже знаем, запас энергии шаровой молнии таких размеров должен составлять примерно 100 кДж. Недостатком рассматриваемой физической модели является также невозможность объяснения устойчивости формы шаровой молнии, существования поверхностного натяжения. Непонятно, каким образом у нагретого воздушного пузыря, обогащенного озоном, может возникнуть четкая поверхность, отделяющая его от окружающей атмосферы.

Поэтому сосредоточим внимание на гипотезе, согласно которой шаровая молния состоит из положительных и отрицательных ионов. Ионы образуются за счет энергии разряда линейной молнии. Затраченная на их образование энергия как раз и определяет запас энергии шаровой молнии. Она высвобождается при рекомбинации ионов (т. е. при столкновениях ионов, сопровождающихся переходом электронов от отрицательных ионов к положительным, в результате чего ионы превращаются в нейтральные атомы или молекулы). Благодаря электростатическим (кулоновским) силам, действующим между ионами, объем, заполненный ионами, будет обладать поверхностным натяжением, что и определяет устойчивую шаровидную форму молнии.

Рассмотрим задачу. Ионы заполняют объем сферы радиусом  $r=10$  см, плотность ионного газа  $n=10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Оценить энергию, запасенную в таком объеме, если энергия ионизации есть  $u=8$  эВ (в расчете на один ион).

Единица энергии 1 эВ (электронвольт) широко применяется в атомной и молекулярной физике. Это есть энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов в один вольт; 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. В единице рассматриваемого объема запасена энергия  $nu$ . Умножив ее на объем шара  $\frac{4}{3} \pi r^3$ , находим искомую энергию:

$$W = \frac{4}{3} \pi r^3 n u. \quad (7.4)$$

Подставив в (7.4) числовые значения величин (учтем при этом, что  $u=1,28 \cdot 10^{-18}$  Дж), получим  $W=52$  кДж.

Эта энергия вполне согласуется со сделанными ранее оценками энергии шаровой молнии соответствующих размеров. В задаче была выбрана плотность ионного газа порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Именно такова плотность воздуха в условиях, близких к нормальным. В связи с этим напомним, что плотность вещества шаровой молнии должна быть примерно такой же, как и воздуха.

У рассматриваемой модели шаровой молнии есть одно уязвимое место. Дело в том, что если положительные и отрицательные ионы будут равномерно «перемешаны» по объему молнии, то они будут очень быстро рекомбинировать — за время порядка всего  $10^{-9}$  с. Следовательно, такая шаровая молния не может существовать в течение секунд, не говоря уже о десятках секунд. Надо каким-то образом существенно затормозить (задержать) процесс ре-



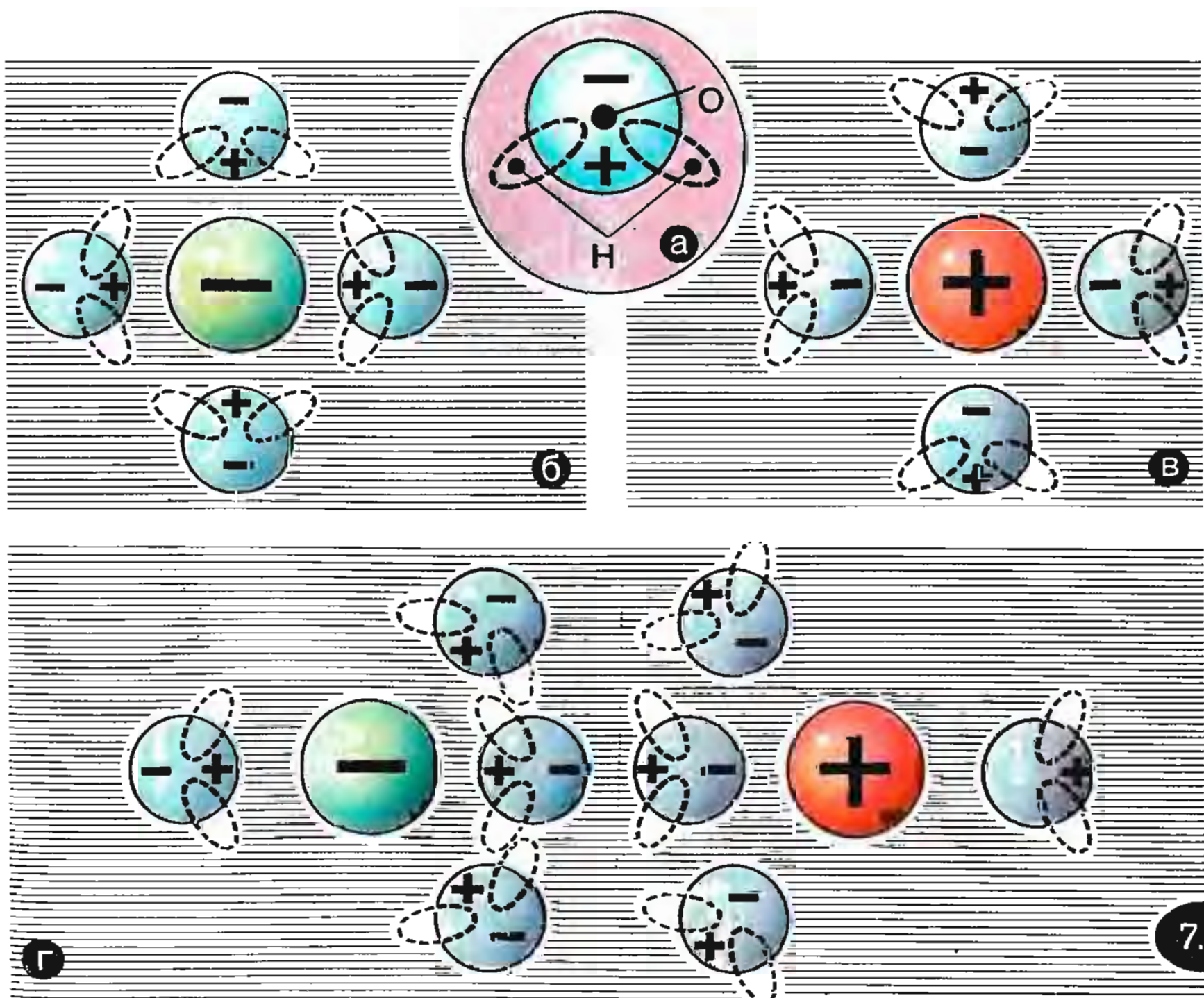
комбинации ионов. Задержка рекомбинации могла бы быть связана с разделением в пространстве ионов разного знака; например, можно было бы предположить, что положительные ионы сосредоточены в центре шара, а отрицательные вблизи его поверхности. Однако такое предположение следует сразу же исключить. Во-первых, отсутствует физический механизм, который мог бы заставить ионы именно так распределиться в пространстве. Во-вторых (и это главное), между разделенными зарядами возникли бы гигантские силы притяжения, которые никаким способом невозможно уравновесить.

Решим в связи с этим следующую задачу. Имеется сфера радиусом  $r=1$  см, заполненная газом из нейтральных атомов плотностью  $n=10^{19}$  см $^{-3}$ . Предположим, что из каждого атома ушел один электрон и поместился на поверхности сферы, а оставшиеся положительные ионы сосредоточились в центре сферы. Чему равна сила притяжения между электронами и ионами?

Обозначим через  $V$  объем сферы. После разделения зарядов на поверхности сферы и в ее центре сосредоточатся заряды разного знака, каждый из которых по модулю равен

$$q = Vne,$$

где  $e$  — абсолютное значение заряда электрона;  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Сферическая сим-



7.4

метрия совокупности разделенных зарядов позволяет для определения искомой силы  $F$  воспользоваться законом Кулона:

$$F = kq^2/r^2, \quad (7.5)$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$ . Поскольку  $V = \frac{4}{3} \pi r^3 = 4 \text{ см}^3$ , то, следовательно,  $q = 4 \cdot 10^{19} e$ . Подставляем числовые значения в (7.5), при этом надо взять  $r = 0,01 \text{ м}$ . В итоге получаем  $F = 4 \cdot 10^{15} \text{ Н}$ . Сила оказывается поистине гигантской.

Итак, предположение о возможном пространственном разделении ионов разного знака внутри шаровой молнии надо исключить. Как же быть? Что может затормозить рекомбинацию равномерно «перемешанных» по объему сферы ионов? Возможный ответ на этот вопрос дает так называемая *кластерная гипотеза*, предложенная в 1974 г. И. П. Стахановым.

*Кластер* — это положительный или отрицательный ион, окруженный своеобразной «шубой» из нейтральных молекул. Если ион окружен молекулами воды, его называют *гидратированным*. На рисунке 7.4,а изображена схематически молекула воды. Она является полярной молекулой: центры ее положительных и отрицательных зарядов не совпадают друг с другом. На рисунке 7.4,б показан кластер — гидратированный отрицательный ион, а на рисунке 7.4,в — еще один кластер — гидратированный положительный ион. Молекулы воды в силу своей полярности удерживаются вблизи ионов силами электростатического притяжения. Заметим, что гидратированные ионы известны давно; они имеются в растворах электролитов. В последние годы они найдены также в земной атмосфере.

На рисунке 7.4,г два гидратированных иона разных знаков объединились в нейтральный комплекс. Вот из таких комплексов и состоит, согласно гипотезе Стаханова, вещество шаровой молнии. Таким образом, предполагается, что в шаровой молнии каждый ион окружен «шубой» из молекул воды. Эта «шуба» мешает ионам сблизиться непосредственно друг с другом и тем самым существенно замедляет рекомбинацию ионов.

Если количество рекомбинаций ионов за единицу времени в единице объема не слишком велико, шаровая молния ведет себя спокойно. Выделяющаяся при рекомбинации энергия преобразуется в энергию светового излучения и частично передается окружающей среде через теплообмен. Когда же число рекомбинаций становится чрезмерно большим, выделяющаяся энергия не успевает отводиться из молнии — и тогда быстро растет температура, дружно рушатся оболочки ионов-кластеров, рекомбинация резко усиливается — происходит взрыв.

Итак, согласно кластерной гипотезе, шаровая молния представляет собой самостоятельно существующее тело (без непрерывного подвода энергии от внешних источников), состоящее из тяжелых положительных и отрицательных ионов, рекомбинация которых сильно заторможена вследствие гидратации ионов. Надо признать, что данная гипотеза (в отличие от остальных) вполне хорошо объясняет все свойства шаровой молнии, выявленные в результате многочисленных наблюдений. И все же пока это только гипотеза, хотя и довольно правдоподобная.



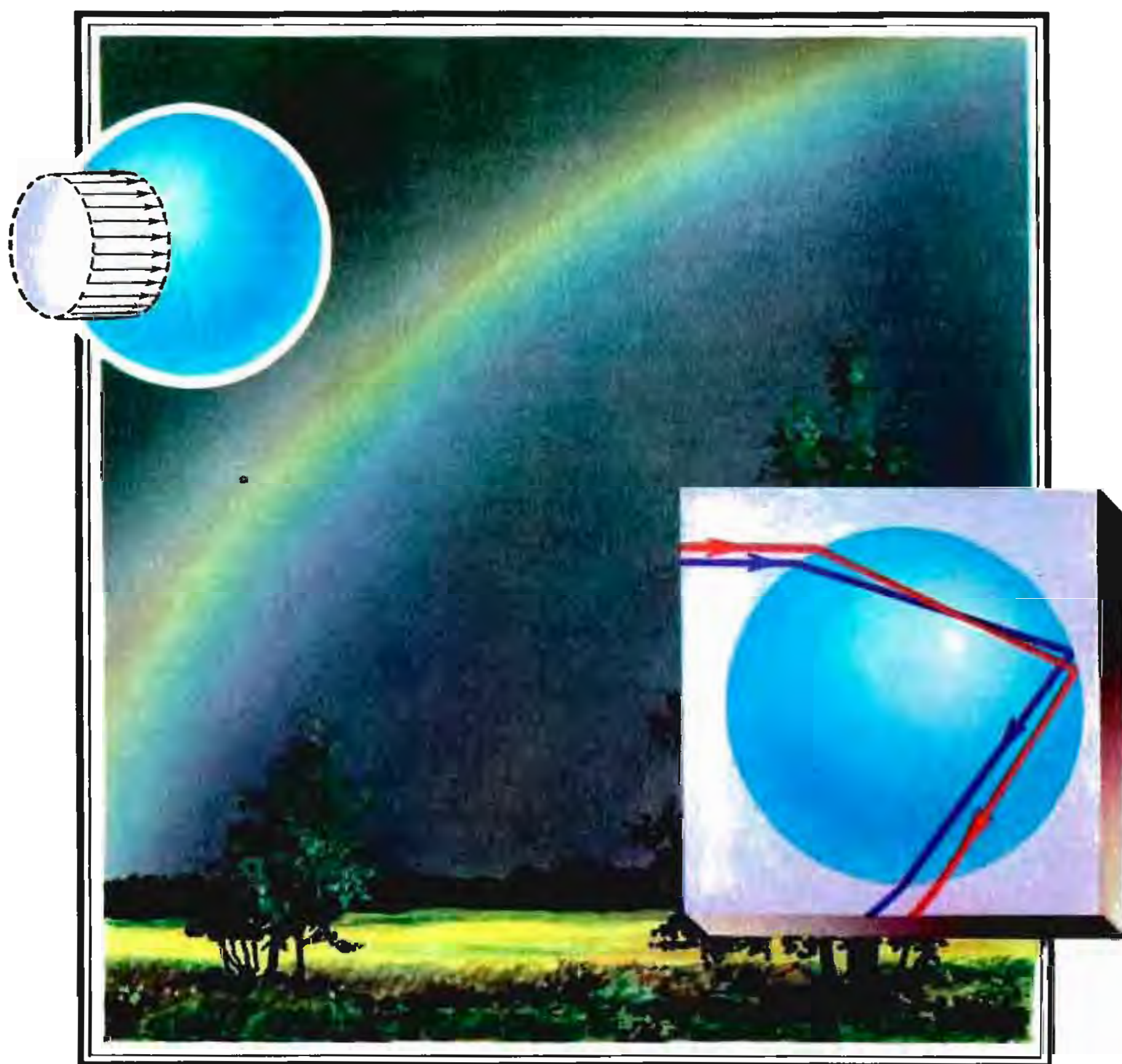
Глава

# 8

радуга

Тут, если солнце блеснет во мгле непогоды лучами  
Прямо против дождя, из тучи кропящего капли,  
Радуги яркой цвета появляются в облаке черном.

*Лукреций*





Наверное, нет человека, который бы не любовался радугой. Это великолепное красочное явление издавна поражало воображение людей. О радуге слагались легенды, ей приписывали удивительные свойства. У древних греков богиня радуги Ирида выступала как посредница между богами и людьми, передававшая людям волю богов. Глядя на радугу, древние греки верили, что она соединяет небо и землю. По мнению древних эстов, радуга наполняла водой истощенные после дождя облака; вода по радуге якобы поднималась из озера или реки в небеса. Любуясь радугой, древние индейцы думали о цветах, которые увяли на земле и вновь расцвели на небе.

Все цветы лесов зеленых,  
Все болотные кувшинки,  
На земле когда увянут,  
Расцветают снова в небе.

Эти строки взяты из знаменитой «Песни о Гайавате», написанной Г. Лонгфелло на основе легенд северо-американских индейцев.

С радугой всегда связывалось ощущение радости и освобождения. «Блещет солнышко на кровле, радуга отводит бурю», — читаем мы в эстонском эпосе «Калевипозг». По библейской легенде, бог Яхве после всемирного потопа повесил на небе радугу в знак того, что он больше не станет так жестоко карать людей: «Я полагаю радугу мою в облаке, чтобы она была знамением вечного согласия между мною и между землею». В древнеиндийском эпосе «Рамаяна» встречается «лук семицветный Громовника». Громовник — он же громовержец — это царь богов Индра, а его «семицветный лук» — это радуга. Такой же смысл приписывали радуге

и древние арабы; они считали ее луком бога света Кузаха. После победы над силами тьмы, не пускаясь солнцем на небо, Кузах вешал радугу-лук на облака. У славянских народов радуга, появлявшаяся на небе после благодатного дождя, олицетворяла победу бога-громовержца Перуна, поразившего молниями духа зла.

Радуга — добрая предвестница. Если она появилась, значит, проглянуло солнце; напоивший посева дождь, сделав доброе дело, теперь окончится, настанет хорошая погода. Слово «радуга» содержит старославянский корень «радь», что означает «веселый». В старославянском языке есть наречие «радоштами», означающее «радостно». И в наши дни в некоторых местностях на Украине радугу называют «веселкой». А многие люди «расшифровывают» слово «радуга» как «райская дуга». Вспомним следующие строки из «Дон-Жуана» Дж. Байрона:

Все ободрись: радугу они  
Считали добрым предзнаменованием:  
И римляне и греки искони  
Подобным доверяли указаньям.  
В тяжелые и горестные дни  
Полезно это всем; когда страданьем  
Измучен ум, — приятно допустить,  
Что радуга спасеньем может быть.

Поэты неоднократно обращались к радуге. Ощущение радости, вызываемое радугой, хорошо передано, например, в следующем стихотворении Гёте. Поэт любит радугу, возникшей на фоне струй водопада, и сравнивает красочность человеческой жизни с красочностью радуги:

К тебе я, солнце, обращусь спиною;  
На водопад сверкающий, могучий  
Теперь смотрю я с радостью живою, —  
Стремится он, дробящийся, гремучий,

На тысячи потоков разливаясь,  
Бросая к небу брызги светлой тучей.  
И между брызг, так дивно изгибаясь,  
Блестает пышной радуга дугою,  
То вся видна, то вновь во мгле теряясь,  
И всюду брызжет свежую росую!  
Всю нашу жизнь она воспроизводит:  
Всмотрись в нее — и ты поймешь душою,  
Что жизнь на отблеск красочный походит.

Конечно, не только о хорошей погоде думали люди, любуясь радугой. С радугой издавна связывались представления о благополучии, о счастье. Существовало поверье, будто в том месте, где радуга как бы уходит одним из своих концов в землю, можно откопать горшок с золотом. А чтобы до окончания жизни быть счастливым и удачливым во всех делах, достаточно хотя бы раз пройти под радугой босиком. Жаль вот только, что никому еще не удавалось пройти под радугой, никто не смог подойти к ее основанию. Восхищаясь «жемчужным, разноцветным мостом», Ф. Шиллер с грустью замечает:

Идешь к нему — он прочь стремится,  
И в то же время недвижим;  
С своим потоком он родится  
И вместе исчезает с ним.

Радуга действительно неуловима и недолговечна. Она дарит ощущение радости, но, увы, ощущение это мимолетно. Она дарит мечту о счастье, но счастье это оказывается недостижимым. Удивительное в своей красоте «мимолетное виденье» буквально тает на наших глазах, оставляя нам чувство светлой грусти. Об этом очень хорошо писал Ф. И. Тютчев:

Как неожиданно и ярко  
На влажной неба синеве  
Воздушная воздвиглась арка  
В своем минутном торжестве!

Один конец в леса вонзила,  
Другим за облака ушла —  
Она полнеба обхватила  
И в высоте изнемогла.  
О, в этом радужном виденье  
Какая нега для очей!  
Оно дано нам на мгновенье,  
Лови его — лови скорей!  
Смотри — оно уж побледнело, —  
Еще минута, две — и что ж?  
Ушло, как то уйдет всецело,  
Чем ты и дышишь и живешь.

**Радуга глазами внимательного наблюдателя.** Издавна заметили, что радуга наблюдается, только когда выглянуло из-за туч солнце и только в стороне, *противоположной солнцу*. Если встать лицом к солнцу, то радуги не увидать. Надо, чтобы солнце было сзади (помните у Гёте: «К тебе я, солнце, обращусь спиною...»). Радуга возникает, когда солнце освещает завесу дождя. Можно наблюдать также и близкую радугу, возникающую на фоне струй водопада или фонтана.

По мере того как дождь стихает, а затем прекращается, радуга блекнет и постепенно исчезает. Помните у Тютчева, писавшего о «радужном виденье»: «Смотри — оно уж побледнело, — еще минута, две...». Или у Шиллера, писавшего о «жемчужном мосте»: «С своим потоком он родится и вместе исчезает с ним».

Сколько у радуги цветов? Обычно говорят о *семи* цветах, чередующихся в следующем порядке: красный (внешний край радуги), оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый (внутренний край радуги, обращенный к земной поверхности). Впрочем, число цветов является условным понятием —

между соседними из указанных цветов нет четких границ. Аристотель называл, например, всего три цвета радуги: красный, зеленый, фиолетовый. Ньютон вначале выделял в радуге пять цветов: красный, желтый, зеленый, синий, фиолетовый (последний он называл пурпуровым). Позднее он говорил о десяти цветах: алом, киновари, лимонном, шафранном, желтоватой зелени, травянистом, лазурном, голубом, индиго, фиолетовом. В конечном счете Ньютон остановился на семи цветах — тех самых, которые и по сей день принято выделять в радуге. Выбор именно этого числа объясняется не физикой, а скорее тем, что число 7 издавна считалось «магическим» (семь чудес света, семь смертных грехов, семь дней недели и т. д.). Художник или поэт волен видеть в радуге иное число цветов. Завершим же разговор о цветах радуги стихотворением В. С. Шефнера:

Всего мне мало... Пусть в мгновенье это  
Все семь цветов я вижу без труда,—  
Но все ж невольно жду восьмого цвета,  
Который в детстве снился иногда.

Вернемся к описанию радуги. Нередко над основной радугой возникает еще одна (*дополнительная*) радуга — более широкая и размытая. Цвета в дополнительной радуге чередуются в *обратном порядке*: от фиолетового (внешний край) до красного (внутренний край). Явление двойной радуги так описывается у Данте:

Как средь прозрачных облачных пелён  
Над луком лук соцветный и сокружный  
Посланницей Юноны вознесен,  
И образован внутренним наружный.

Здесь «посланница Юноны» — это Ирида, богиня радуги. Что же ка-

сается последней строки, то в ней выразилось существовавшее в средние века мнение, будто наружная (дополнительная) радуга есть как бы отражение внутренней (основной). По-видимому, на эту мысль наводило людей наблюдаемое обратное чередование цветов в дополнительной радуге.

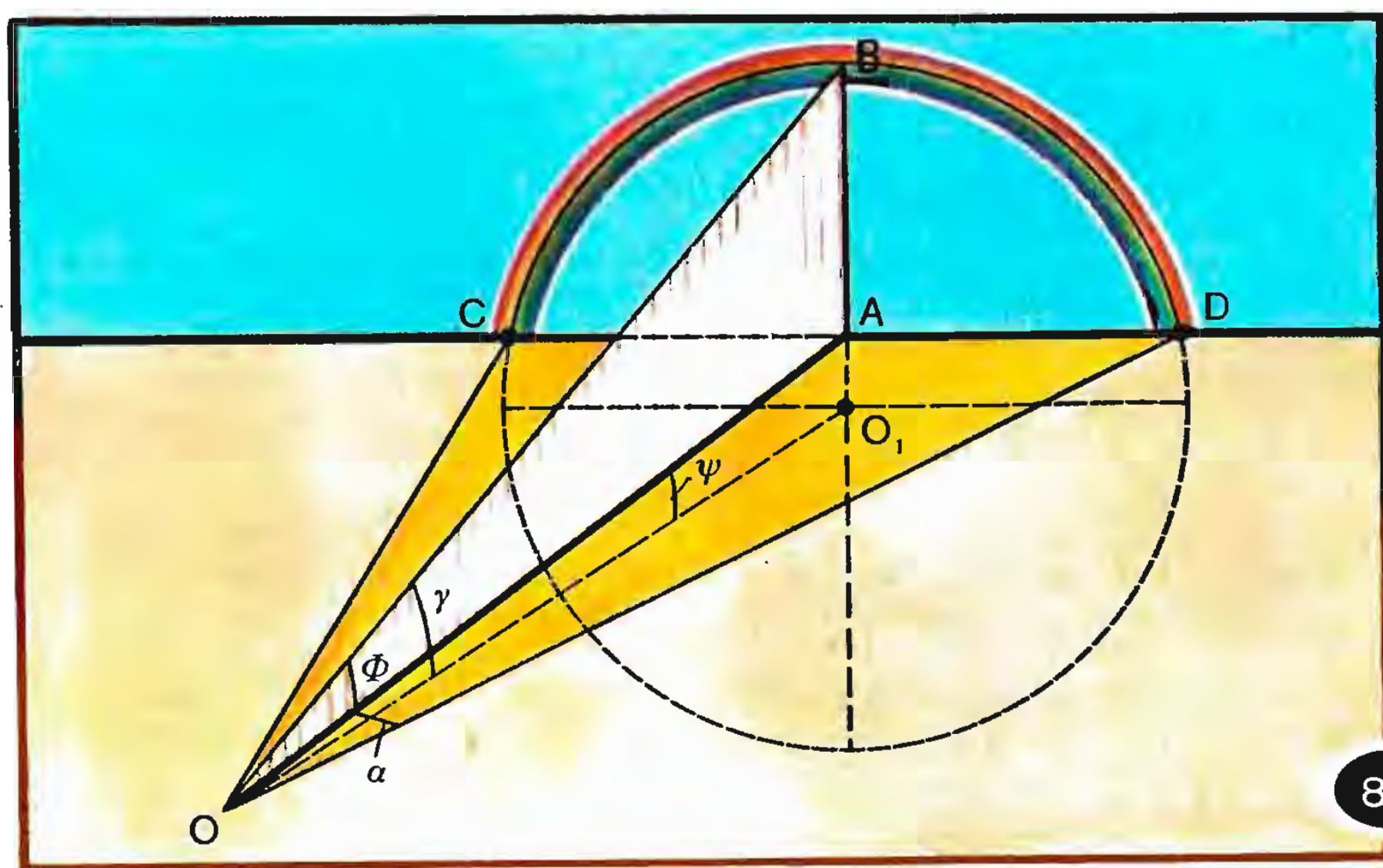
Между красными краями основной и дополнительной радуг находится темноватая полоса. Ее называют *александровой полосой* — по имени жившего во II в. греческого философа Александра, подметившего эту особенность двойной радуги.

Особенно яркая, праздничная радуга возникает после шумной летней грозы (или во время грозы). При морозящем дожде цветовая окраска радуги становится бледной. В этом случае радуга может превратиться в белесый полукруг.

Для наблюдателя, находящегося на относительно ровной земной поверхности, радуга появляется при условии, что угловая высота солнца над горизонтом *не превышает 42°*. Чем ниже солнце, тем больше угловая высота вершины радуги и тем, следовательно, больше наблюдаемый участок радуги. Дополнительная радуга может наблюдаться, если высота солнца над горизонтом не превышает 53°.

Радугу можно рассматривать как гигантское «колесо», которое, как на ось, «надето» на воображаемую прямую линию, проходящую через солнце и наблюдателя. На рисунке 8.1 эта прямая обозначена как прямая  $OO_1$ ;  $O$  — наблюдатель,  $OCD$  — плоскость земной поверхности,  $\angle AOO_1 = \Psi$  — угловая высота солнца над горизонтом. Чтобы найти  $\text{tg}\Psi$ , надо разделить





рост наблюдателя на длину отбрасываемой им тени. Точка  $O_1$  называется противосолнечной точкой; она находится ниже линии горизонта  $CD$ . Из рисунка видно, что радуга представляет собой окружность конуса, ось которого есть  $OO_1$ ,  $\gamma$  — угол между осью конуса и любой из его образующих (угол раствора конуса). Разумеется, наблюдатель видит не всю указанную окружность, а только ту часть ее (на рисунке участок  $CBD$ ), которая находится над линией горизонта. Заметим, что  $\angle AOB = \Phi$  есть угол, под которым наблюдатель видит вершину радуги, а  $\angle AOD = \alpha$  — угол, под которым он видит основание радуги (где, по поверью, закопан горшок с золотом). Очевидно, что

$$\Phi + \Psi = \gamma. \quad (8.1)$$

Таким образом, положение радуги по отношению к ландшафту зависит от положения наблюда-

теля по отношению к солнцу, а угловые размеры радуги определяются высотой солнца над горизонтом. Наблюдатель есть вершина конуса, ось которого направлена по линии, соединяющей наблюдателя с солнцем; радуга есть находящаяся над линией горизонта часть окружности основания этого конуса. При передвижениях наблюдателя указанный конус, а значит, и радуга соответствующим образом перемещаются (помните у Шиллера: «Идешь к нему — он прочь стремится»). Поэтому бесполезно охотиться за обещанным горшком с золотом, равно как и бесполезно пытаться пройти под радугой.

Из формулы (8.1) следует, что  $\Phi = \gamma - \Psi$ . Для основной радуги угол  $\gamma$  равен  $42^\circ$  (для желтого участка радуги), а для дополнительной этот угол составляет  $53^\circ$ . Отсюда ясно, почему земной наблюдатель не может любоваться основной ра-



дугой, если высота солнца над горизонтом превышает  $42^\circ$ , и не увидит дополнительной радуги при высоте солнца больше  $53^\circ$ . Иное дело, если наблюдатель находится в самолете: в этом случае он может увидеть радугу в виде полной окружности. Но где бы ни находился наблюдатель (на земной поверхности или над нею), он всегда есть центр ориентированного на солнце конуса с углом раствора около  $42^\circ$  для основной радуги и  $53^\circ$  для дополнительной. Почему именно  $42^\circ$  и  $53^\circ$ ? На этот вопрос мы ответим позднее.

Решим задачу. Найти углы, под которыми видны вершина и основание радуги, если высота солнца  $\Psi = 20^\circ$  (рассматривается желтый участок радуги).

Угловая высота вершины радуги определяется сразу из (8.1):  $\Phi = \gamma - \Psi = 42^\circ - 20^\circ = 22^\circ$ . Чтобы найти угол  $\alpha$ , под которым видно основание радуги, обратимся к рисунку 8.1. Из треугольника  $BOO_1$ :  $OO_1/OB = \cos \gamma$ . Из треугольника  $AOO_1$ :  $OO_1/OA = \cos \Psi$ . Из треугольника  $AOD$ :  $OA/OD = \cos \alpha$ . Так как

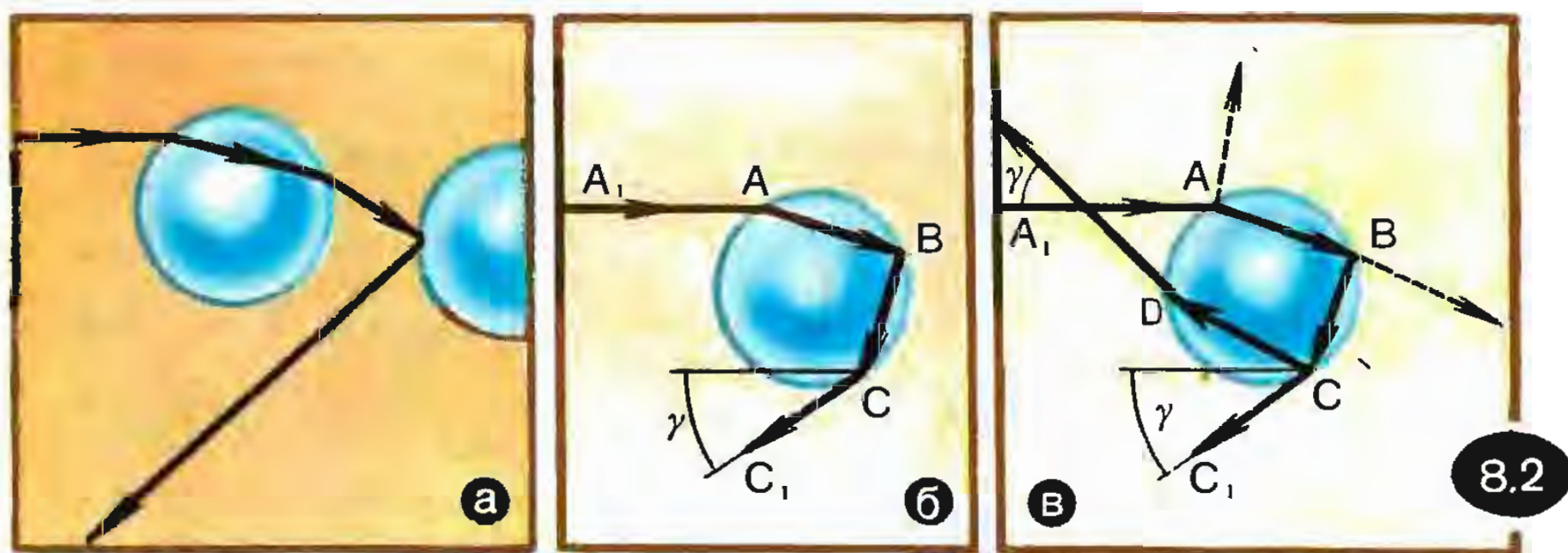
$$\frac{OO_1}{OB} = \frac{OO_1}{OA} \cdot \frac{OA}{OB} = \frac{OO_1}{OA} \cdot \frac{OA}{OD},$$

то, следовательно,  $\cos \gamma = \cos \Psi \cos \alpha$ . Таким образом,

$$\cos \alpha = \frac{\cos \gamma}{\cos \Psi} = \frac{\cos 42^\circ}{\cos 20^\circ} = 0,79.$$

Отсюда следует, что  $\alpha = 38^\circ$ .

**Развитие представлений о физике возникновения радуги.** Многократно наблюдая радугу, люди, естественно, давно пытались понять физику ее возникновения. В 1571 г. Флетчер из Бреслау опубликовал работу, где утверждал, что наблюдатель видит радугу в результате попадания в его глаз световых лучей, каждый из которых испытал двукратное преломление в одной капле дождя и последующее отражение от другой капли дождя (рис. 8.2, а). В начале XVII в. итальянец Антонио Доминико предложил иной (и, заметим, правильный) вариант прохождения светового луча к наблюдателю. Он утверждал, что достаточно рассмотреть одну каплю дождя. Изображение радуги формируется в результате того, что световой луч испытывает в капле дождя двукратное преломление и одно отражение (рис. 8.2, б). Исходный световой луч  $A_1A$ , входя в каплю, преломляется в точке  $A$ , затем испытывает отражение в точке  $B$  и, наконец, преломляясь,



выходит из капли в точке  $C$ . В глаз наблюдателя попадает луч  $CC_1$ . Он образует с исходным лучом  $A_1A$  угол  $\gamma$  (точнее, угол  $180^\circ - \gamma$ ); в результате наблюдатель видит радугу под углом  $\gamma$  к направлению падающих солнечных лучей.

Рене Декарт, развивая представления Доминико, показал, почему упомянутый выше угол  $\gamma$  близок к  $42^\circ$ . Кроме того, он объяснил возникновение дополнительной радуги. Декарт исходил при этом из схемы лучей, показанной на рисунке 8.2, в. В каждой из точек  $A$ ,  $B$  и  $C$  световой луч испытывает как преломление, так и отражение. Правда, луч, отраженный в  $A$ , а также луч, преломленный в  $B$ , не участвуют в формировании изображения радуги и в данном случае интереса не представляют (эти лучи показаны на рисунке штриховыми линиями). Луч, преломленный в точке  $C$ , участвует в формировании изображения основной радуги; луч, отраженный в  $C$ , выходит после преломления в точке  $D$  из капли и формирует изображение дополнительной радуги. Основную радугу наблюдатель видит под углом  $\gamma = 42^\circ$ , а дополнительную под углом  $\gamma' = 53^\circ$ .

Однако ни Доминико, ни Декарт не сумели объяснить возникновение цветов радуги. Доминико, например, полагал, что световые лучи, которые проходят внутри капли наименьший путь и потому в наименьшей степени «смешиваются с темнотой», дают красный цвет, тогда как лучи, проходящие наибольший путь внутри капли, в наибольшей степени «смешиваются с темнотой», порождая фиолетовый цвет. Подобные наивные (и, разумеется, совершенно оши-

бочные) представления о возникновении цветов при преломлении были характерны для доньютоновской оптики. Они основывались на теории цвета Аристотеля, который утверждал, что различие в цвете связано с различием в количестве темноты, «примешиваемой» к солнечному (белому) цвету. Фиолетовый цвет, по Аристотелю, возникает при наибольшем добавлении темноты к свету, а красный — при наименьшем.

Исаак Ньютон доказал ложность представлений о возникновении цветов из смешения темноты и белого света. Выполнив целый комплекс блестящих оптических опытов с призмами, Ньютон пришел к выводу, что «никакого цвета не возникает из белизны и черноты, смешанных вместе, кроме промежуточных темных», что «количество света не меняет цвета», что «свет состоит из лучей всех цветов не только по выходе из призмы, но даже тогда, когда он еще не дошел до призмы, до всякого преломления». Ньютонова теория цветов позволила полностью объяснить физический механизм образования радуги.

В «Лекциях по оптике» Ньютона обобщены полученные ранее результаты и дано следующее исчерпывающее объяснение возникновения радуги: «Из лучей, входящих в шар, некоторые выходят после одного отражения, другие после двух отражений; есть лучи, выходящие после трех и даже большего числа отражений. Поскольку дождевые капли очень малы относительно расстояния до глаза наблюдателя, так что физически могут считаться за точки, то не стоит совсем рассматривать их величины, а только





на поверхность капли. Так как треугольники  $AOB$  и  $BOC$  равнобедренные, то  $\angle OAB = \angle ABO$  и  $\angle OBC = \angle BCO$ . Угол падения равен углу отражения, поэтому  $\angle ABO = \angle OBC$ . Обозначим все эти углы через  $\beta$  (см. рисунок). Картина хода луча симметрична относительно прямой  $OO'$ . В точках  $A$  и  $C$  световой луч, преломляясь, поворачивается на угол  $\alpha - \beta$  (в каждой из этих точек). В точке  $B$  световой луч поворачивается на угол  $180^\circ - 2\beta$ . Таким образом, выходящий из капли луч  $CC_1$  оказывается повернутым относительно исходного направления на угол  $2(\alpha - \beta) + (180^\circ - 2\beta) = 180^\circ + 2\alpha - 4\beta$ . Это есть угол  $180^\circ - \gamma$ . Отсюда следует, что

$$\gamma = 4\beta - 2\alpha. \quad (8.2)$$

Заметим, что на рисунке 8.4 не показаны лучи, отраженные в  $A$  и  $C$ , а также луч, преломленный в  $B$ . Эти лучи не представляют интереса в данном случае.

Выразим угол  $\gamma$  через прицельный параметр луча, падающего на каплю. Закон преломления в точке  $A$  имеет вид:  $\sin \alpha / \sin \beta = n$ , где  $n$  — показатель преломления воды. Используя (8.2), получаем

$$\sin \frac{\gamma + 2\alpha}{4} = \frac{\sin \alpha}{n} \quad (8.3)$$

или, иначе,

$$\frac{\gamma + 2\alpha}{4} = \arcsin \left( \frac{\sin \alpha}{n} \right).$$

Итак,

$$\gamma = 4 \arcsin \left( \frac{\sin \alpha}{n} \right) - 2\alpha \quad (8.4)$$

или, с учетом того, что  $\sin \alpha = \frac{R}{R} = \xi$ ,

$$\gamma = 4 \arcsin \left( \frac{\xi}{n} \right) - 2 \arcsin \xi. \quad (8.5)$$

Вспоминая замечание Ньютона, что размеры капли несущественны и она может «считаться за точку», отметим: соотношения (8.3) и (8.4), являющиеся основными для дальнейшего рассмотрения, содержат только углы (углы  $\gamma$  и  $\alpha$ ) и, разумеется, показатель преломления  $n$ .

Рассмотрим задачу. При каких значениях прицельного параметра световой луч выйдет из капли строго назад?

Итак, требуется найти значения параметра  $\xi$ , при которых  $\gamma = 0$ . Полагая в (8.5)

$$\gamma = 0, \text{ получаем } 2 \arcsin \left( \frac{\xi}{n} \right) = \arcsin \xi$$

$$\text{или, иначе, } \sin \left[ 2 \arcsin \left( \frac{\xi}{n} \right) \right] = \xi.$$

Учитывая, что  $\sin 2v = 2 \sin v \sqrt{1 - \sin^2 v}$ , находим отсюда

$$2 \frac{\xi}{n} \sqrt{1 - \left( \frac{\xi}{n} \right)^2} = \xi. \quad (8.6)$$

Уравнение (8.6) имеет два корня. Первый корень очевиден:  $\xi_1 = 0$ ; второй корень есть

$$\xi_2 = \frac{1}{2} n \sqrt{4 - n^2}. \quad (8.7)$$

Подставляя в (8.7)  $n = 4/3$ , получаем  $\xi_2 = 0,994$ . Заметим, что обычно используемое для воды значение показателя преломления  $4/3$  соответствует лучам, попадающим в желтую часть спектра.

**Наибольший угол между падающим на каплю и выходящим из нее лучами.** Из рассмотренной выше задачи следует, что по мере увеличения прицельных параметров лучей от нуля до единицы угол  $\gamma$  растет от нуля до некоторого максимального значения, а затем уменьшается, снова обращаясь в нуль при  $\xi = 0,994$  (для желтых лучей). Важно найти максимальное значение угла  $\gamma$ ,

поскольку, как отмечал Ньютон, «там, где эти углы наибольшие или наименьшие, выходящие лучи более сгущены».

Решим в связи с этим задачу. *Найти максимальное значение угла между падающим на каплю и выходящим из нее лучами. При каком прицельном параметре реализуется этот угол? Показатель преломления принять равным 4/3.*

Сразу оговоримся: эта задача под силу лишь тем, кто знаком с началами математического анализа. Остальным придется принять «на веру» получаемый в задаче численный результат и ограничиться рассмотрением приводимых ниже рисунков 8.5 и 8.6. Итак, надо найти максимум функции  $\gamma(\xi)$ , определяемой выражением (8.5). Для этого функцию  $\gamma(\xi)$  дифференцируют и затем приравнивают производную нулю. Производная функция  $\gamma(\xi)$  есть

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = \frac{4}{n\sqrt{1-(\xi/n)^2}} - \frac{2}{\sqrt{1-\xi^2}}.$$

Приравняв ее нулю, получим уравнение:

$$n\sqrt{1-(\xi/n)^2} = 2\sqrt{1-\xi^2}.$$

Решая это уравнение, находим значение  $\xi'$ , при котором функция  $\gamma(\xi)$  принимает максимальное значение. Нетрудно найти, что

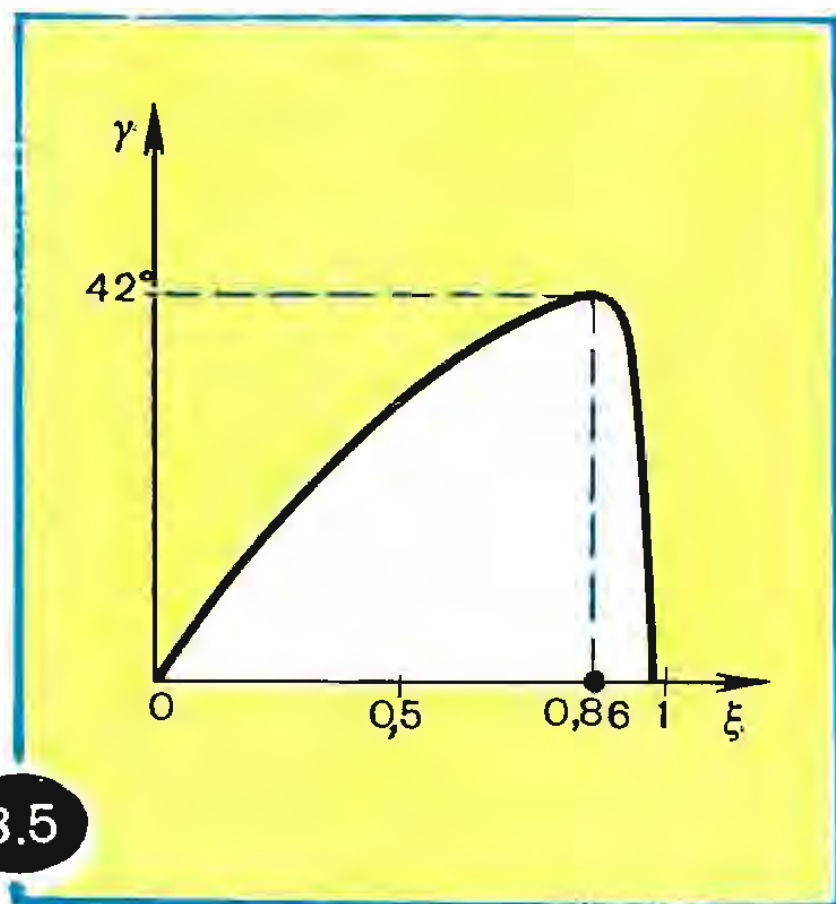
$$\xi' = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}. \quad (8.8)$$

При  $n=4/3$  имеем  $\xi'=0,861$ . Подставляя (8.8) в (8.5), получаем выражение для максимального угла между падающим на каплю и выходящим из нее лучами:

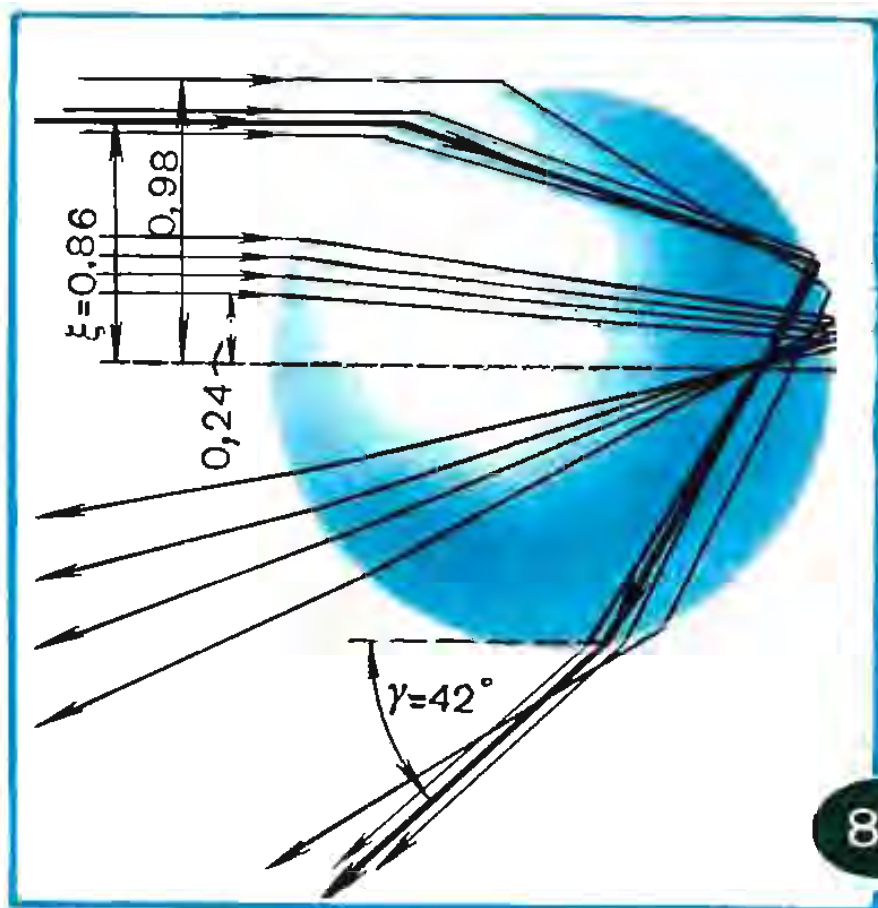
$$\gamma_{\max} = 4 \arcsin\left(\frac{1}{n} \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}\right) - 2 \arcsin \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}. \quad (8.9)$$

При  $n=4/3$  имеем  $\gamma_{\max}=42^\circ 02'$ .

На рисунке 8.5 представлена для желтых лучей зависимость угла  $\gamma$  от прицельного параметра  $\xi$ . На дождевую каплю падают лучи со всевозможными (от 0 до 1) прицельными параметрами. Они выходят из капли под разными углами  $\gamma$ . Естественно, что наблюдатель увидит более яркими те лучи, которые будут иметь меньшую расходимость. Такими являются лучи,



8.5



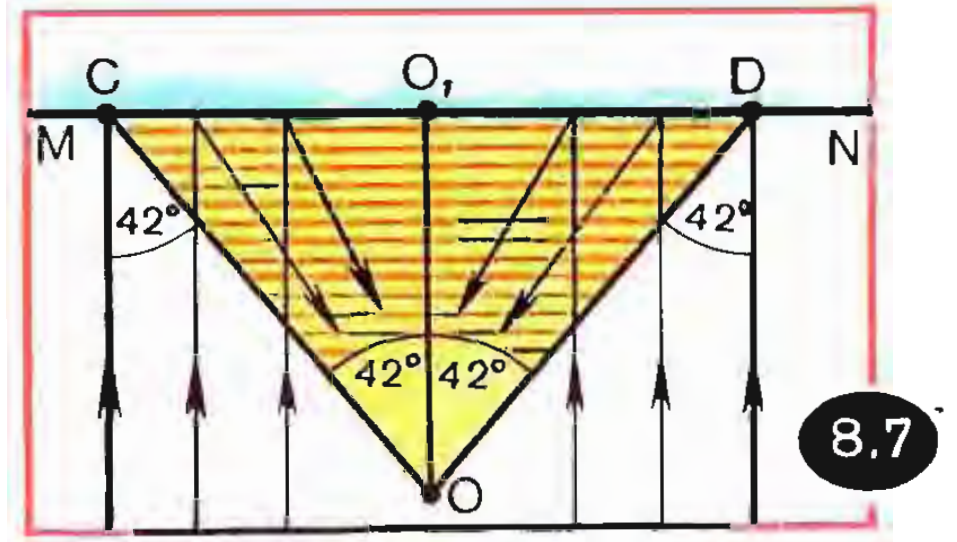
8.6



попадающие в район максимума кривой, изображенной на рисунке 8.5, т. е. лучи, для которых  $\gamma=42^\circ$ . По выражению Ньютона, именно эти лучи «более сгущены».

Сгущение выходящих из капли лучей вблизи угла  $\gamma=42^\circ$  хорошо демонстрирует рисунок 8.6, на котором показаны рассчитанные траектории световых лучей, характеризующихся разными прицельными параметрами (траектории получены для  $n=4/3$ ).

Теперь легко понять, почему радуга имеет вид дуги, наблюдаемой под углом  $42^\circ$  к прямой линии, проходящей через наблюдателя и солнце. Для простоты будем полагать, что солнце находится у самой линии горизонта и что завеса дождя имеет вид отвесной стены, плоскость которой перпендикулярна к направлению солнечных лучей. На рисунке 8.7 дан разрез плоскостью, совпадающей с плоскостью поверхности, на которой стоит наблюдатель:  $MN$  — завеса дождя,  $O$  — наблюдатель,  $O_1$  — противосолнечная точка. На рисунке заштрихована область, в пределах которой в глаз наблюдателя попадают лучи, каждый из которых испытал в какой-то капле дождя отражение и двукратное преломление; вне этой области такие лучи к данному наблюдателю не попадают. Лучи, приходящие к наблюдателю от дождевых капель, находящихся справа от  $C$  и слева от  $D$ , заметно ослаблены из-за относительно большой расходимости. Наиболее яркими будут лучи, приходящие к наблюдателю от границы заштрихованной области, т. е. от капель вблизи точек  $C$  и  $D$ , поскольку расходимость этих лучей минимальна. Итак, если бы в спектре солнца была представлена

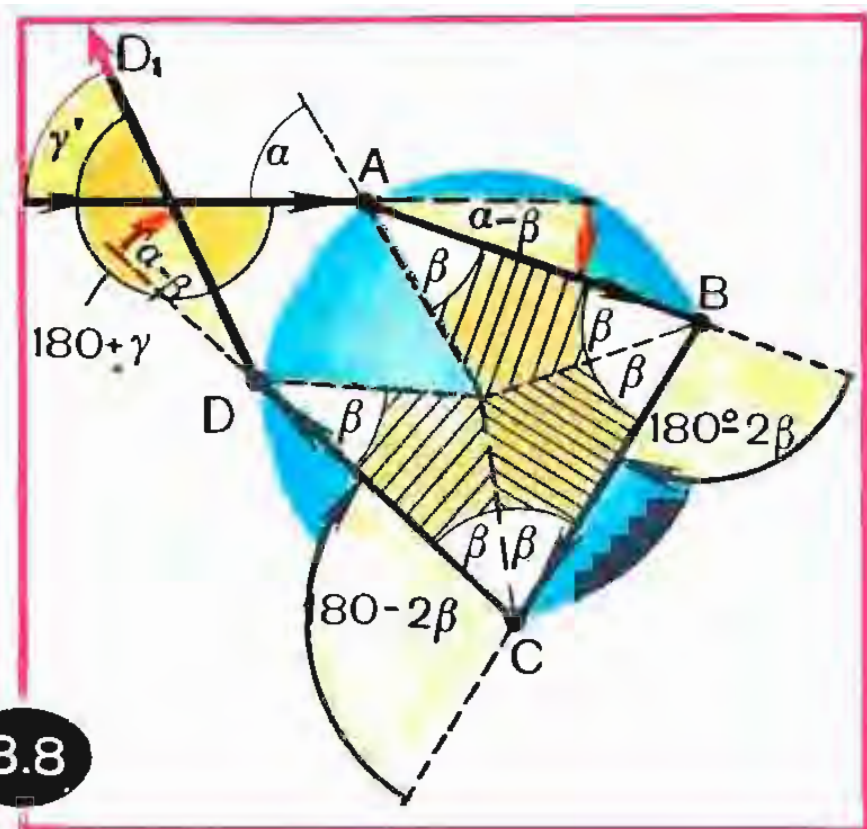


лишь одна длина волны, наблюдатель увидел бы радугу в образе узкой светящейся дуги. При этом небо под дугой будет представляться наблюдателю несколько более светлым, чем небо над дугой.

Капли дождя, конечно, не висят в воздухе неподвижно, а довольно быстро падают вниз. Поэтому та или иная капля участвует в формировании изображения радуги лишь в течение очень короткого промежутка времени — тогда, когда направление на нее от наблюдателя составляет с направлением  $OO_1$  угол, близкий к  $42^\circ$ . Затем капля выходит из игры, но на смену ей приходят новые и новые капли. Капли сменяют друг друга быстро, так что глаз наблюдателя не улавливает происходящей смены; в результате наблюдатель видит неподвижное изображение радуги. Аналогичным образом мы видим какое-либо неподвижное изображение на экране кино, несмотря на то, что каждую секунду совершается смена 24 кадров. В этом смысле радугу можно назвать своеобразным «небесным кино».

**Объяснение возникновения дополнительной радуги.** Мы рассмотрели ход лучей в дождевой





8.8

капле, объясняющий возникновение основной радуги. Теперь проведем аналогичное рассмотрение для дополнительной радуги. В этом случае, вместо рисунка 8.4, надо использовать рисунок 8.8. В точке  $A$  световой луч, преломляясь, поворачивается на угол  $\alpha - \beta$ ; в точках  $B$  и  $C$  он, отразившись, поворачивается на угол  $180^\circ - 2\beta$  (в каждой из этих точек); наконец, в точке  $D$  луч, преломившись, поворачивается на угол  $\alpha - \beta$ . Таким образом, выходящий из капли луч  $DD_1$ , участвующий в формировании изображения дополнительной радуги, оказывается повернутым относительно исходного направления на угол  $2(\alpha - \beta) + 2(180^\circ - 2\beta) = 360^\circ + 2\alpha - 6\beta$ . Это есть угол  $180^\circ + \gamma'$  (см. рисунок). Отсюда следует, что

$$\gamma' = 180^\circ + 2\alpha - 6\beta. \quad (8.10)$$

Заметим, что на рисунке 8.8 не показаны, как не представляющие в данном случае интереса, лучи, отраженные в  $A$  и  $D$ , а также лучи, преломленные в  $B$  и  $C$  (следует напомнить, что луч, преломленный в  $C$ , участвует в формиро-

вании изображения основной радуги).

Используя (8.10), выразим угол  $\beta$  через  $\gamma'$  и  $\alpha$ , после чего равенство  $\sin \alpha / \sin \beta = n$  примет вид

$$\sin \left( 30^\circ + \frac{2\alpha - \gamma'}{6} \right) = \frac{\sin \alpha}{n}.$$

Отсюда следует, что

$$\gamma' = 180^\circ + 2\alpha - 6 \arcsin \left( \frac{\sin \alpha}{n} \right),$$

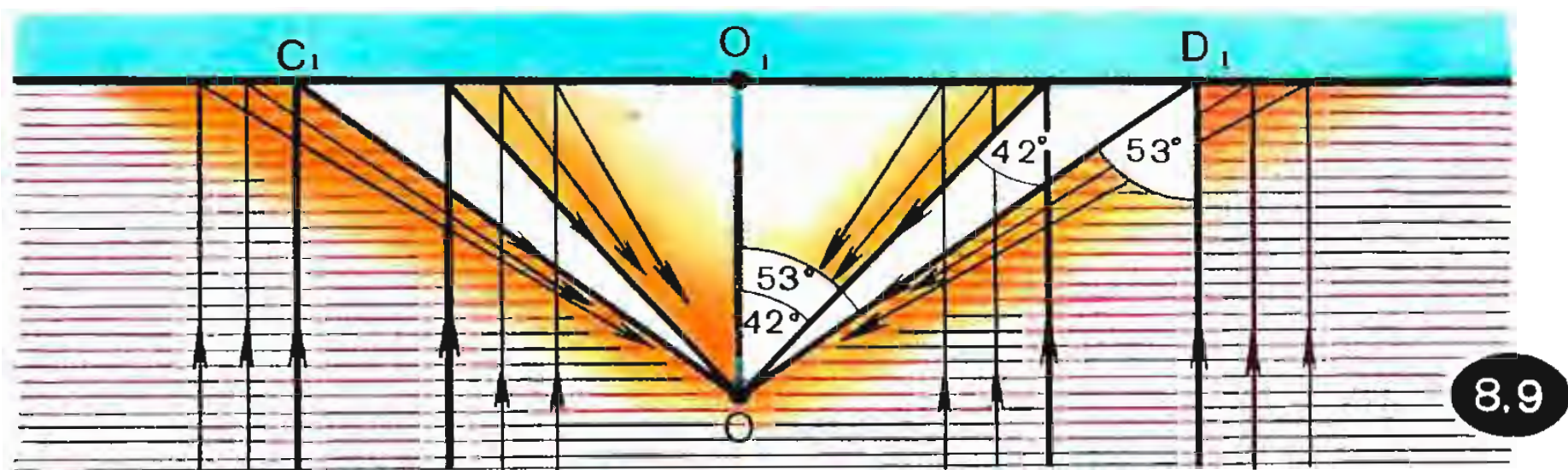
или, с учетом того, что  $\sin \alpha = \rho/R = \xi$ ,

$$\gamma' = 180^\circ + 2 \arcsin \xi - 6 \arcsin (\xi/n). \quad (8.11)$$

При нулевом прицельном параметре ( $\xi = 0$ ) получаем  $\gamma' = 180^\circ$ . По мере увеличения  $\xi$  (от 0 до 1) угол  $\gamma'$  уменьшается; при некотором значении  $\xi'$  он достигает минимума, а затем снова возрастает до  $180^\circ$ . Можно показать (см. задачу, рассматриваемую ниже), что для желтых лучей минимальное значение угла  $\gamma'$  составляет  $52^\circ 52'$ . Именно под этим углом к наблюдателю будут попадать наименее расходящиеся, а значит, и наиболее яркие лучи.

Изображение основной радуги формируется лучами, выходящими из капли под *наибольшим* углом, образуемым лучом  $CC_1$  с исходным направлением; этот угол близок к  $42^\circ$ . Что же касается дополнительной радуги, то она формируется лучами, выходящими из капли под *наименьшим* углом, образуемым лучом  $DD_1$  с исходным направлением; этот угол близок к  $53^\circ$ . Разумеется, речь идет о разных лучах; если в первом случае имеются в виду лучи, вышедшие из капли после двукратного преломления и одного отражения, то во втором случае рассматриваются лучи, испы-





8.9

тавшие два преломления и два отражения (сравните рисунки 8.4 и 8.8).

Решим задачу. Для желтых лучей найти минимальное значение угла  $\gamma'$  (рис. 8.8). При каком прицельном параметре реализуется этот угол?

Чтобы найти искомый прицельный параметр  $\xi'$ , надо продифференцировать функцию  $\gamma'(\xi)$ , определяемую выражением (8.11), и затем приравнять производную нулю. Производная функции  $\gamma'(\xi)$  есть

$$\frac{d\gamma'}{d\xi} = \frac{2}{\sqrt{1-\xi^2}} - \frac{6}{n\sqrt{1-(\xi/n)^2}}.$$

Приравняв ее нулю, получим уравнение:

$$n\sqrt{1-(\xi/n)^2} = 3\sqrt{1-\xi^2}.$$

Решая это уравнение, находим

$$\xi' = \sqrt{\frac{9-n^2}{8}}. \quad (8.12)$$

При  $n=4/3$  (желтые лучи) получаем  $\xi'=0,950$ . Подставляя этот результат в (8.11), находим  $\gamma'_{\min} = 52^\circ 52'$ .

Возникновение основной радуги пояснял рисунок 8.7. Возникновение дополнительной радуги поясняет рисунок 8.9. Здесь заштрихована область, в пределах которой в глаз наблюдателя попадают лучи, испытавшие в каплях дождя двукратное преломление и дву-

кратное отражение; вне этой области такие лучи к данному наблюдателю не попадают. Наиболее яркими будут лучи на границе заштрихованной области, т. е. лучи от капель вблизи точек  $C_1$  и  $D_1$ ; эти лучи «более сгущены». Указанные лучи как раз и образуют изображение светящейся дуги — дополнительной радуги. Небо над дугой будет представляться наблюдателю более светлым, чем под дугой. Учитывая последнее замечание, а также аналогичное замечание, сделанное ранее при рассмотрении основной радуги (там, наоборот, более светлым представлялось наблюдателю небо под дугой), заключаем, что в случае двойной радуги небо между основной и дополнительной дугами должно представляться наблюдателю менее светлым, чем над дополнительной дугой и под основной дугой. Тем самым получает объяснение темноватая александрова полоса — промежуток между основной и дополнительной радугами.

**Чередования цветов в основной и дополнительной радугах.** До сих пор мы полагали, что капли дождя освещаются монохроматическим светом (например, желтым). В действительности же в солнечном



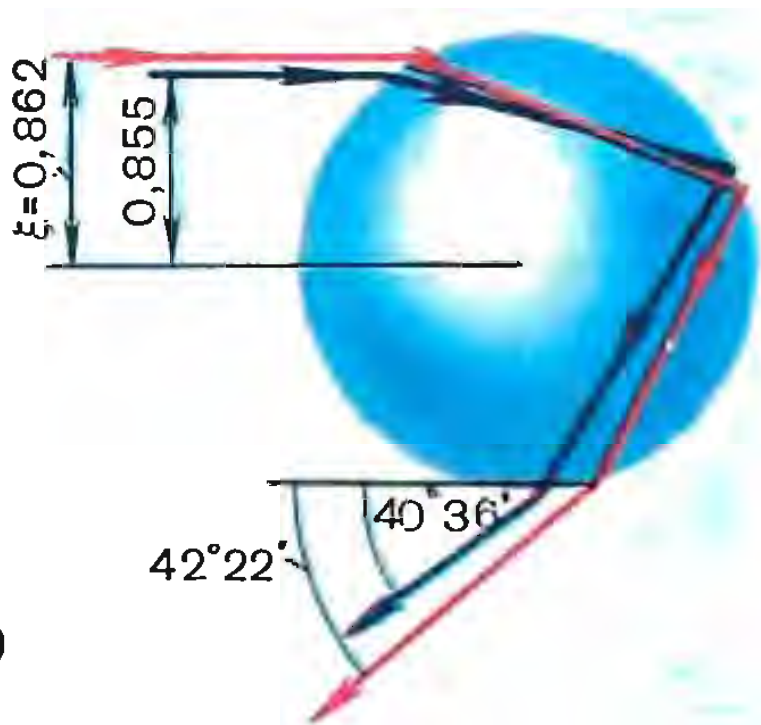
спектре представлены различные длины волн; именно поэтому реальная радуга оказывается не просто светлой дугой, а дугой красочной, разноцветной.

Сделаем следующий шаг: учтем *немонохроматичность* солнечного света.

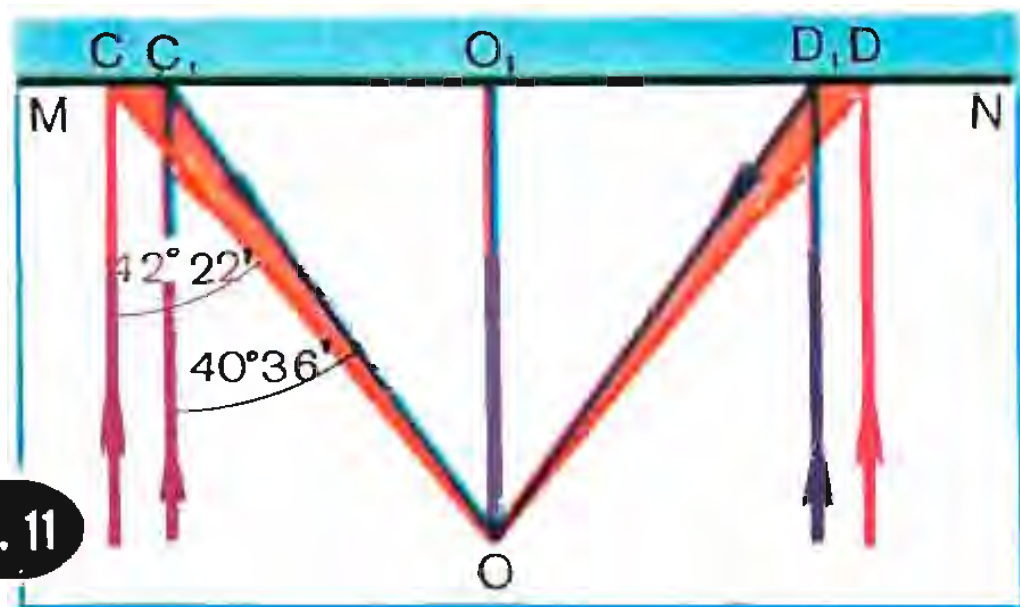
Будем для простоты рассматривать только две длины волны; пусть они характеризуются показателями преломления  $n_k=1,331$  (красный луч) и  $n_\phi=1,344$  (фиолетовый луч). Подставляя эти значения показателя преломления в формулы (8.8) и (8.9), получаем для основной радуги: красный луч —  $\xi_k=0,862$ ,  $\gamma_k=42^\circ 22'$ , фиолетовый луч —  $\xi_\phi=0,855$ ,  $\gamma_\phi=40^\circ 36'$ . На рисунке 8.10 изображены тра-

ектории красного и фиолетового лучей в случае, когда каждый из них по выходе из капли образует наибольший угол с первоначальным направлением.

Мы видим, что этот угол различен для лучей разного цвета ( $\gamma_k > \gamma_\phi$ ). Вспомним у Ньютона: «Так как различные роды лучей составляют различные наибольшие и наименьшие углы, то лучи, наиболее плотно собирающиеся у различных мест, имеют стремление к проявлению собственных цветов». Наблюдатель будет видеть красную дугу под углом  $42^\circ 22'$  и фиолетовую дугу под углом  $40^\circ 36'$ . Теперь понятно, почему радуга разноцветная и почему внешний край основной



8.10



8.11



8.12

радуги окрашен в красный цвет, а внутренний — в фиолетовый.

Говоря о цветах радуги, отметим еще одно обстоятельство. Ограничиваясь по-прежнему двумя цветами (красным и фиолетовым), воспроизведем на рисунке 8.11 ситуацию, аналогичную той, какая была изображена на рисунке 8.7. По направлениям  $CO$  и  $DO$  к наблюдателю приходят относительно яркие красные лучи; фиолетовые лучи по этим направлениям не распространяются. По направлениям  $C_1O$  и  $D_1O$  к наблюдателю приходят относительно яркие фиолетовые лучи и ослабленные вследствие расходимости красные лучи. В этих направлениях наблюдатель видит фиолетовый цвет, к которому в небольшой степени примешан красный. От капель между  $C_1$  и  $D_1$  к наблюдателю приходят ослабленные (расходящиеся) красные и фиолетовые лучи; они смешиваются друг с другом и дают в итоге (с учетом других цветов) белый свет.

Таким образом, возникновение цветной радуги объясняется не только тем, что для каждого цвета имеется свой наибольший угол  $\gamma$ , но и тем, что вблизи этого угла смешивание цветов происходит в наименьшей степени.

До сих пор разговор шел об основной радуге. Аналогичные рассуждения применимы и к дополнительной радуге. Не будем, однако, выполнять соответствующие расчеты. Приведем лишь рисунок 8.12, из которого хорошо видно, почему порядок чередования цветов в дополнительной радуге противоположен порядку чередования цветов в основной.

Цвета дополнительной радуги, разумеется, заметно бледнее цве-

тов основной. Ведь в каждой точке соприкосновения светового луча с поверхностью капли (в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  на рисунке 8.8) часть световой энергии «выходит из игры». Изображение основной радуги формируется за счет той световой энергии, которая остается в луче, преломленном в точке  $C$ . При этом часть световой энергии отражается в точке  $C$ ; та доля от этой энергии, которая затем не отражается, а преломляется в точке  $D$ , пойдет на формирование изображения дополнительной радуги.

**Влияние размеров капель на вид радуги.** Согласно Ньютону, при рассмотрении радуги дождевые капли «физически могут считаться за точки», так что «не стоит совсем рассматривать их величины». Строго говоря, это не так. Ньютон не принимал во внимание *дифракцию световых волн* на каплях, проявляющуюся тем сильнее, чем меньше диаметр капель. Во времена Ньютона дифракция света еще не была открыта.

Дифракция света на каплях влияет на степень яркости, и сам факт присутствия того или иного цвета в радуге приводит к появлению внутри радужной полосы вторичных цветовых дуг, искажающих первоначальные цвета. Мы не будем рассматривать здесь дифракционную теорию радуги, а приведем лишь данные из книги М. Миннарта «Свет и цвет в природе». Согласно этим данным, по виду радуги можно приближенно оценивать диаметр капель дождя. При диаметре капель 1...2 мм наблюдаются очень яркий фиолетовый и почти столь же яркий зеленый цвета. Хорошо видна

красная дуга. Едва заметна голубая дуга. При уменьшении диаметра капель до 0,5 мм наблюдается заметное ослабление красного цвета, который практически полностью исчезает при диаметре 0,2 мм. При диаметре 0,08...0,1 мм в радуге сохраняется ярким лишь фиолетовый цвет; в целом радуга уширяется и бледнеет. Когда диаметр капель становится меньше 0,05 мм, наблюдается белая радуга.

**Радуга на других планетах.** Читатель, внимательно проследивший за всеми нашими рассуждениями, может убедиться в том, какое большое расстояние лежит от обычно бытующего представления, что «радуга — это очень просто, это солнечные лучи, преломляющиеся в каплях дождя», до действительного понимания физического механизма возникновения радуги. Разобравшись в этом механизме, мы можем позволить себе немного пофантазировать.

Зададимся вопросом: как выглядела бы радуга, если бы показатель преломления вдруг увеличился для всех длин волн, скажем, в 1,25 раза? Вообразим, что мы очутились на неизвестной планете, где роль воды выполняет какая-то иная жидкость. Это означало бы, что теперь для красных лучей  $n_k=1,66$ , а для фиолетовых  $n_f=1,68$ . Используя формулу (8.9), получаем в данном случае  $\gamma_k=11^\circ$  и  $\gamma_f=10^\circ$ . Таким образом, по срав-

нению с земной радугой угловые размеры инопланетной радуги должны уменьшиться в 4 раза; при этом сама радуга будет примерно вдвое тоньше. Увидеть радугу, находясь на поверхности планеты, можно лишь при условии, что высота светила над горизонтом не превышает  $10^\circ$ . При наблюдении из кабины космического корабля это требование снимается. Если показатель преломления распыленной в атмосфере планеты жидкости окажется близким к  $n=2$ , радуга стянется в световое пятно, находящееся в направлении противосолнечной точки.

**Физика и красота.** Как уже говорилось в самом начале книги, английские поэты XVII в. упрекали Ньютона в том, что, объяснив возникновение радуги, он тем самым посягнул на ее красоту. Предоставляем читателю самому убедиться в несправедливости подобного упрека. Мы уверены, что теперь, когда он познакомился с физикой образования радуги, это удивительное явление природы покажется ему еще более прекрасным. Возможно, что умудренный знанием истинных причин он именно теперь особенно остро почувствует поэтическую прелесть лермонтовских строк:

Там разноцветною дугой,  
Развеселясь, нередко дивы  
На тучах строят мост красивый,  
Чтоб от одной скалы к другой  
Пройти воздушною тропой.



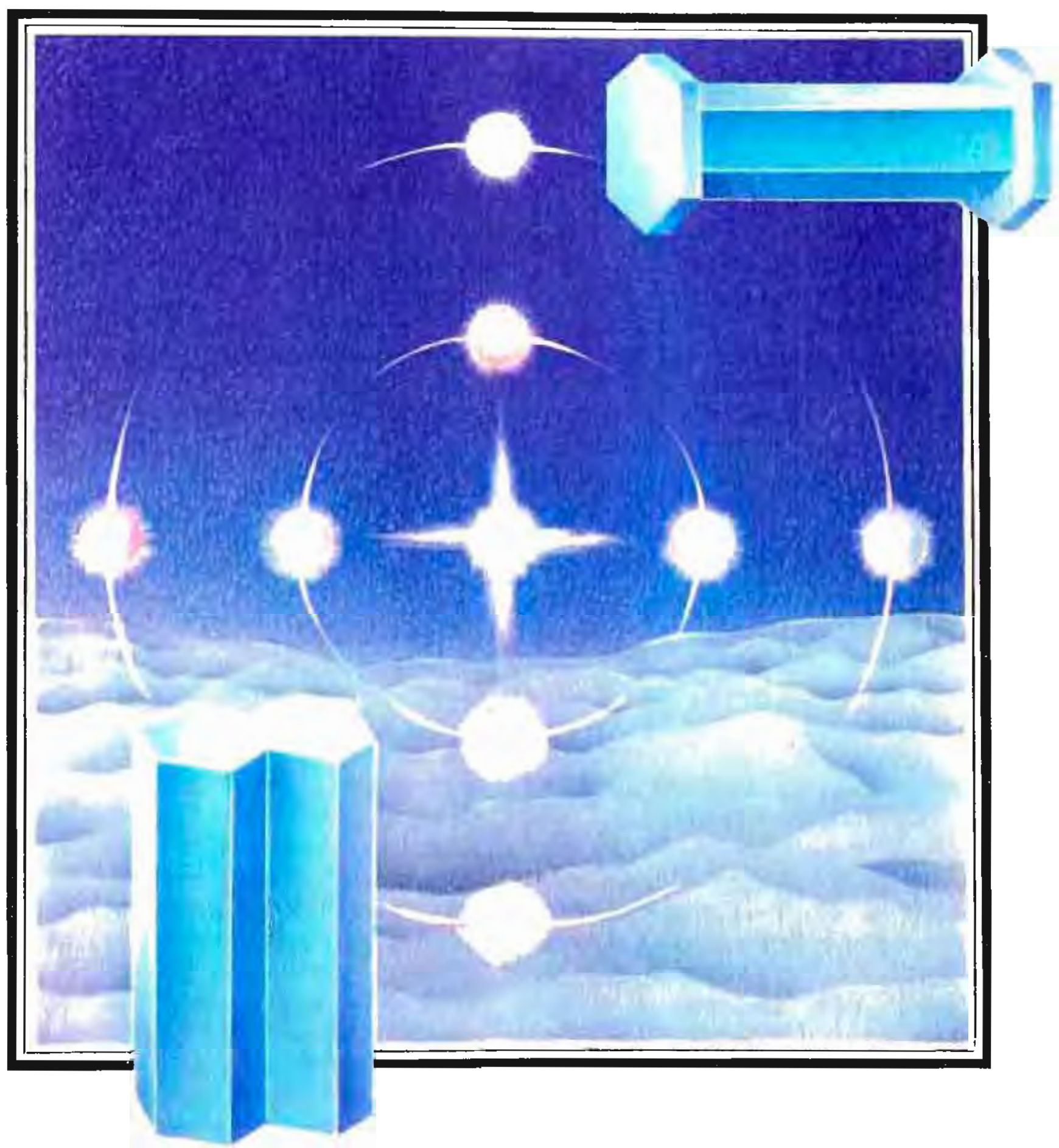
Глава

9

Гало

...Смотри, как солнечные ласки  
В лазури нежат строгий крест.

А. Блок



Когда мы рассказывали о радуге, не нужно было предварительно объяснять, о чем именно идет речь. Что такое радуга, знает каждый читатель, он не раз видел ее. Иное дело — гало́. По сравнению с радугой это оптическое явление значительно более редкое. Без сомнения, многим читателям не доводилось видеть его; более того, многие, наверное, даже не слышали о нем.

Это удивительное явление воспринималось в давние времена как «божье знамение»; оно повергало в трепет религиозно настроенных людей, порождало суеверия. Вот одна из древних записей: «Бысть знамение: стояще солнце в круге, а посреди круга крест, а посреди креста солнце, а вне круга два солнца, а над солнцем кроме круга дуга...» (запись относится к началу XII в.). Наблюдая на небосводе светящиеся кольца (они возникают вокруг солнца или луны), столбы, кресты, да к тому же имеющие подчас красноватый оттенок, люди усматривали в них «знамения свыше», воспринимали их как божественные ореолы, святые кресты, кровавые мечи и т. п. Они считали, что эти «знамения» предвещают несчастья — вóйны, голод, болезни, говорят о «божьей каре», о близкой смерти. Весьма характерен для тех времен эпизод, приведенный в романе В. И. Костылева «Иван Грозный»: «Дрожащей рукой царь Иван отодвинул занавес. Испуганными глазами посмотрел на небо. Лицо его перекопилось от страха: на небе, в темной вышине крестообразное небесное знамение... Долго молча, в оцепенении, смотрел он на небо и вдруг, зашатавшись от слабости, прошептал: «Вот знамение моей смерти! Вот оно!..»

И в приведенных выше древних записях, и в отрывке из романа об Иване Грозном мы встречаемся, разумеется, отнюдь не с «божьими знаменьями». Все эти «знамения» в действительности представляют собой оптическое явление — гало.

У Джека Лондона есть рассказ «Тропой ложных солнц». В нем мы читаем: «По обе стороны солнца стоят ложные солнца, так что в небе их сразу три. В воздухе от мороза алмазная пыль». Интересные описания ложных солнц и ложных лун можно найти в книге «Северный полюс», принадлежащей перу известного американского полярного исследователя Роберта Пири. В этой книге Пири рассказывает о своей экспедиции к Северному полюсу, состоявшейся в 1908 г. «Мы наблюдали гало,— пишет Пири,— два отчетливых кольца и восемь ложных лун в южной части неба. Это явление, объясняемое наличием в воздухе ледяных кристалликов, нередко можно наблюдать в Арктике. На этот раз внутреннее кольцо имело одну ложную луну в зените, одну в надире и по одной справа и слева. Четыре другие ложные луны размещались на внешнем кольце». На с. 131 изображено лунное гало, наблюдавшееся Робертом Пири. Поистине фантастическое зрелище посчастливилось увидеть ему во время путешествия к Северному полюсу!

Чаще удастся наблюдать куда более скромное гало — в виде одного кольца вокруг солнца (или луны). Обычно оно появляется, когда тихая и ясная погода сменяется ветреной, давление воздуха падает, небо делается слегка беловатым, так что солнце светит как бы сквозь матовое стекло. Очерта-

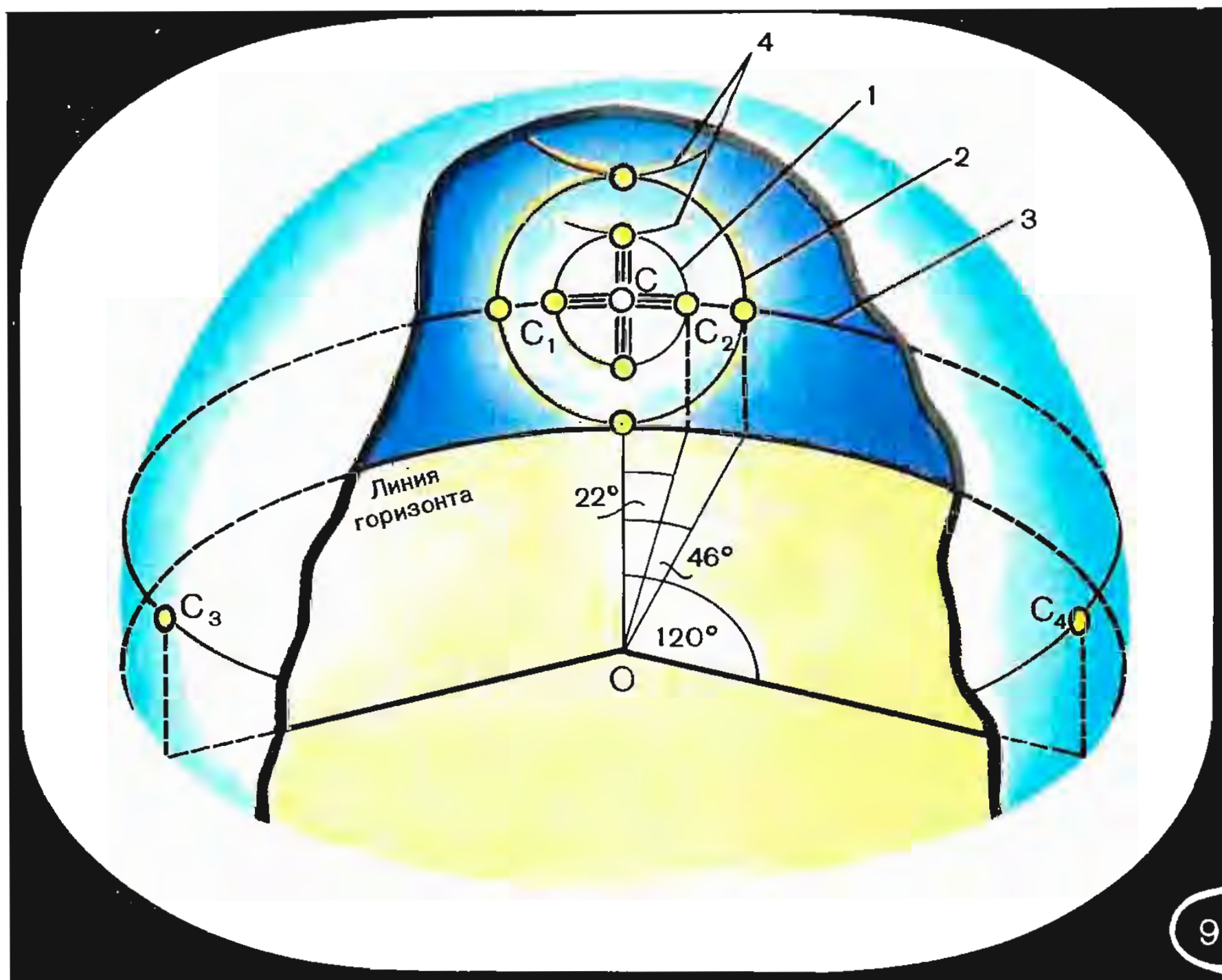


ния солнца при этом становятся расплывчатыми, все вокруг кажется освещенным особенным светом. В такие дни и возникает вокруг солнца достаточно яркое кольцо, радиус которого наблюдатель видит под углом  $22^\circ$ . Чтобы солнце не слепило глаза, надо стать в тень или держать против солнца руку.

Итак, мы видим, что наблюдаемые гало могут выглядеть весьма разнообразно — светящиеся кольца, кресты, столбы, ложные светила. Какова же структура гало в общем случае?

**Структура гало в общем случае.**  
«Галó» происходит от греческого

*halos* — «круг». Структура гало в общем случае показана на рисунке 9.1. Предполагаем, что наблюдатель находится на равнинной местности с ровной линией горизонта. На рисунке наблюдатель стоит в точке  $O$ , являющейся центром плоского круга, ограниченного линией горизонта. Солнце (луну) и все элементы гало наблюдатель видит как бы размещенными на небосводе — сфере, «опирающейся» на линию горизонта. Светило (пусть это будет солнце) обозначено на рисунке через  $C$ . Вокруг солнца видны два светящихся кольца — кольцо 1 с угловым радиусом  $22^\circ$  (его обычно называют «малым гало») и кольцо 2 с угловым радиусом  $46^\circ$  («боль-





шое гало»). Наблюдается также горизонтальный светящийся круг 3 (так называемый *парелический круг*); чтобы его увидеть целиком, наблюдатель должен повернуться вокруг своей оси на  $360^\circ$ . На рисунке показаны всевозможные ложные солнца. Через  $S_1$  и  $S_2$  обозначены два ложных солнца, которые наблюдаются чаще всего. Через  $S_3$  и  $S_4$  обозначены ложные солнца, отстоящие от настоящего на  $120^\circ$ ; их называют *парантелиями*. На рисунке показаны также дополнительные светящиеся дуги 4, входящие в общую структуру гало. Само солнце изображено в центре светящегося креста.

Различные элементы гало можно разбить на две группы — бесцветные (белые) и с цветовыми оттенками. Парелический круг является белым, тогда как малое и большое гало слегка окрашены. Их внутренние края имеют красноватый оттенок, а наружные — фиолетово-синеватый. Если солнце находится относительно высоко над горизонтом, то ложные солнца выглядят практически белыми; они могут иметь слабые цветовые оттенки, соответствующие окраске дуг малого и большого гало. Цвет светящегося креста совпадает с цветом солнечного диска; он может казаться красноватым, если солнце находится вблизи линии горизонта.

**Гало, наблюдаемые в действительности.** Полная структура гало в действительности никогда не наблюдается целиком. Всякий раз перед наблюдателем возникают лишь какие-то элементы этой структуры. Так, гало может быть представлено всего лишь кольцом с угловым радиусом  $22^\circ$ . В других

случаях малое гало дополняется находящимися на нем ложными солнцами или крестом, который как бы накладывается на солнечный диск. Парелический круг и большое гало обычно видны не полностью, а частично — в виде отдельных дуг. Чаще всего полностью видно малое гало, но и оно может быть представлено всего лишь отдельными дугами. Иногда никаких колец вообще нет, а видны лишь три солнца — настоящее и два ложных (ложные солнца  $S_1$  и  $S_2$  на рисунке 9.1). Появление перед наблюдателем тех или иных элементов гало зависит от состояния атмосферы, характера облачности в данном направлении в данный момент, о чем мы подробнее поговорим позднее.

На рисунке 9.2 показаны примеры обычно наблюдаемых гало. Правда, применять к гало слова «обычно, обычный» вряд ли можно — гало всегда исключительно редкое явление; его вид всякий раз неповторим. На рисунке 9.2,а воспроизведено малое лунное гало со светящимся крестом (со старинной акварели). На рисунке 9.2,б изображено солнечное гало, наблюдавшееся в Париже 21 декабря 1910 г. Видны части малого гало, верхняя часть большого гало, касательная дуга и два ложных солнца. На рисунке 9.2,в приведена фотография тройного солнца, помещенная в газете «Комсомольская правда» от 19 декабря 1964 г.

**Общие замечания о физике гало.** Гало наблюдаются на фоне перисто-слоистых или других облаков, состоящих из мелких ледяных кристалликов. В морозный день ледяные кристаллики могут находиться и в воздухе, окружа-



9.2

а



б



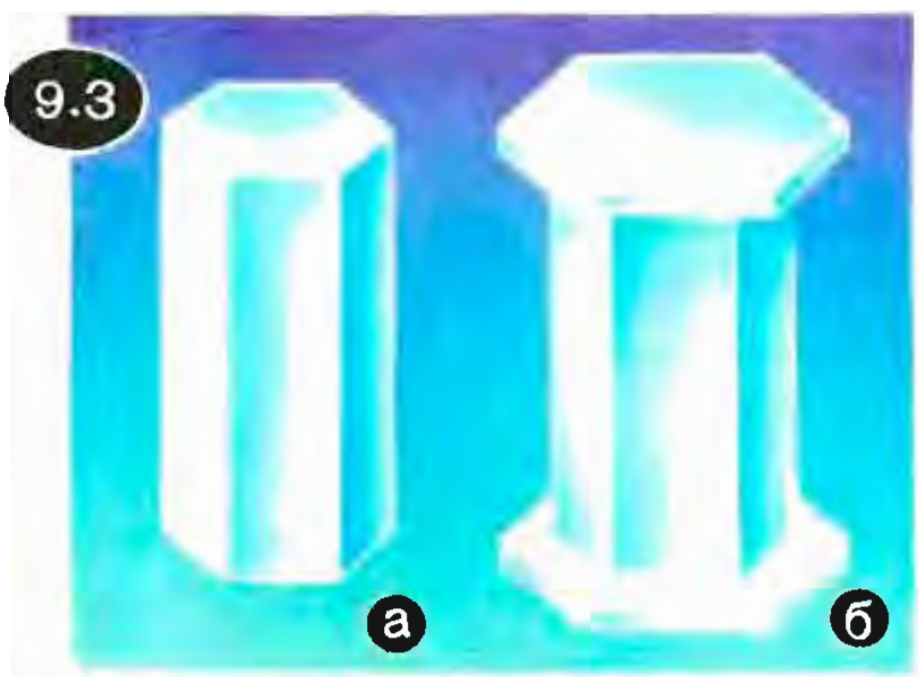
в

ющем наблюдателя. Помните у Джека Лондона: «В воздухе от мороза алмазная пыль».

Причина возникновения гало — преломление света в ледяных кристалликах и отражение от их граней. Преломление приводит к появлению слегка окрашенных в радужные цвета элементов гало. При отражении образуются белые элементы гало; цвет этих элементов совпадает с цветом солнечного (лунного) диска.

Ледяные кристаллики, как известно, имеются во многих облаках. Несмотря на это, гало наблюдаются относительно редко. Дело в том, что кристаллики в облаках имеют обычно неправильную форму. Для возникновения же гало важно, чтобы большинство кристалликов имело правильную форму, а именно форму *шестигранных призм*, которые в отдельных случаях могут иметь на торцах шестиугольные пластинки (рис. 9.3). Подчеркнем, что своей *замечательной симметрией* гало обязано *правильной форме ледяных кристалликов*. При этом существенную роль может играть упорядоченная ориентация в пространстве осей кристалликов. Нетрудно показать, как именно возникают те или иные элементы гало в результате преломления и отражения света на ледяных шестигранных призмах. Мы займемся этим позднее, а пока обратим внимание читателя на то, что гало по своей природе *родственно радуге*.

Радуга возникает в результате преломлений и отражений световых лучей в каплях дождя, а гало связано с преломлениями и отражениями света в ледяных кристалликах облаков. Радугу наблюдатель видит в стороне, противоположной солнцу, тогда как для на-



9.3

а

б



блюдения колец гало он должен повернуться к солнцу лицом. В главе, посвященной радуге, мы приводили замечание Ньютона, касающееся углов между падающими на каплю дождя и выходящими из нее световыми лучами: «Там, где эти углы наибольшие или наименьшие, выходящие лучи более сгущены». Напомним, что основную радугу наблюдатель видит под *наибольшими* для каждого цвета углами отклонения луча, а дополнительную — под *наименьшими*. Малое гало, как и большое, возникает в результате двукратного преломления лучей в кристалликах-призмах. Наблюдатель видит гало под *наименьшим* углом отклонения луча.

**Наименьший угол отклонения луча в призме.** Проследим прохождение светового луча определенной длины волны через трехгранную призму с преломляющим углом  $\Theta$  и показателем преломления  $n$  (рис. 9.4,а). Изображенный на рисунке луч падает на левую грань призмы под углом  $\alpha_1$ . Используя закон преломления в точках  $A$  и  $B$ , запишем:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = n. \quad (9.1)$$

В результате прохождения через призму световой луч отклоняется от первоначального направления на угол  $C_1CB$ ; обозначим его через  $\delta$  и будем в дальнейшем называть углом отклонения луча. Учитывая, что  $\angle C_1CB = \angle CAB + \angle CBA$  заключаем:

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2). \quad (9.2)$$

Далее заметим, что

$$\angle D_1DB = \angle DAB + \angle ABD = \beta_1 + \beta_2.$$

Поскольку  $\angle D_1DB = \angle AOB$ , то, следовательно,

$$\beta_1 + \beta_2 = \Theta. \quad (9.3)$$

С учетом (9.3) перепишем (9.1) и (9.2) в виде

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha_1 / \sin \beta_1 &= n, \\ \sin \alpha_2 / \sin (\Theta - \beta_1) &= n, \\ \delta &= \alpha_1 + \alpha_2 - \Theta. \end{aligned} \right\} (9.4)$$

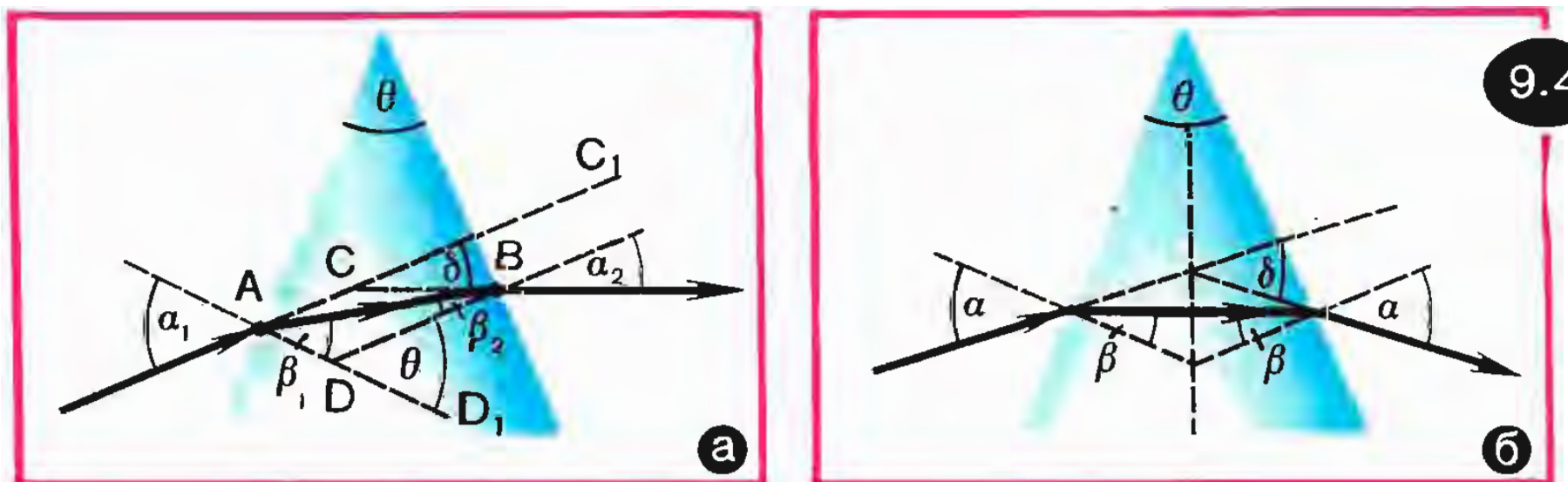
Рассмотрим случай с симметричным ходом луча в призме — когда траектория луча симметрична относительно биссектрисы преломляющего угла (рис. 9.4,б). В данном случае

$$\alpha_1 = \alpha_2 \equiv \alpha,$$

$$\delta = 2\alpha - \Theta,$$

$$\beta_1 = \beta_2 \equiv \beta = \Theta / 2$$

С учетом этих равенств пере-





пишем закон преломления  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$  в следующем виде:

$$\sin \frac{\delta + \Theta}{2} = n \sin \frac{\Theta}{2}. \quad (9.5)$$

Отсюда находим

$$\delta = 2 \arcsin \left( n \sin \frac{\Theta}{2} \right) - \Theta. \quad (9.6)$$

В «Лекциях по оптике» Ньютон с помощью геометрических рассуждений доказывает, что «при преломлении однородных лучей в призме угол, составляемый падающим и выходящим лучами, получается наибольшим тогда, когда тут и там преломление одинаково». Под однородными лучами Ньютон понимал монохроматические лучи, а под углом, «составляемым падающим и выходящим лучами», — угол  $ACB$  (рис. 9.4, а), т. е. угол, равный  $180^\circ - \delta$ . Итак, угол отклонения светового луча при прохождении через призму оказывается наименьшим при симметричном ходе луча.

Докажем это утверждение, применяя метод дифференцирования функции. Будем рассматривать угол  $\delta$  как функцию угла  $\beta_1$ , однозначно связанного с углом падения луча на входную грань призмы  $\alpha_1$ . Согласно третьему уравнению системы (9.4),

$$\delta(\beta_1) = \alpha_1(\beta_1) + \alpha_2(\beta_1) - \Theta.$$

Чтобы найти значение угла  $\beta_1$ , при котором угол  $\delta$  минимален, надо продифференцировать  $\delta$  по  $\beta_1$  и приравнять производную к нулю:

$$\frac{d\delta}{d\beta_1} = \frac{d\alpha_1}{d\beta_1} + \frac{d\alpha_2}{d\beta_1} = 0. \quad (9.7)$$

Из первого уравнения системы (9.4) следует, что

$$\alpha_1 = \arcsin(n \sin \beta_1),$$

а из второго следует, что

$$\alpha_2 = \arcsin(n \sin(\Theta - \beta_1)).$$

Напомним, что

$$\frac{d}{dx} \arcsin f(x) = \frac{1}{\sqrt{1-f^2(x)}} \frac{df}{dx}.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha_1}{d\beta_1} &= \frac{n \cos \beta_1}{\sqrt{1-n^2 \sin^2 \beta_1}}; \\ \frac{d\alpha_2}{d\beta_1} &= -\frac{n \cos(\Theta - \beta_1)}{\sqrt{1-n^2 \sin^2(\Theta - \beta_1)}}. \end{aligned}$$

Подставляя эти производные в (9.7), находим

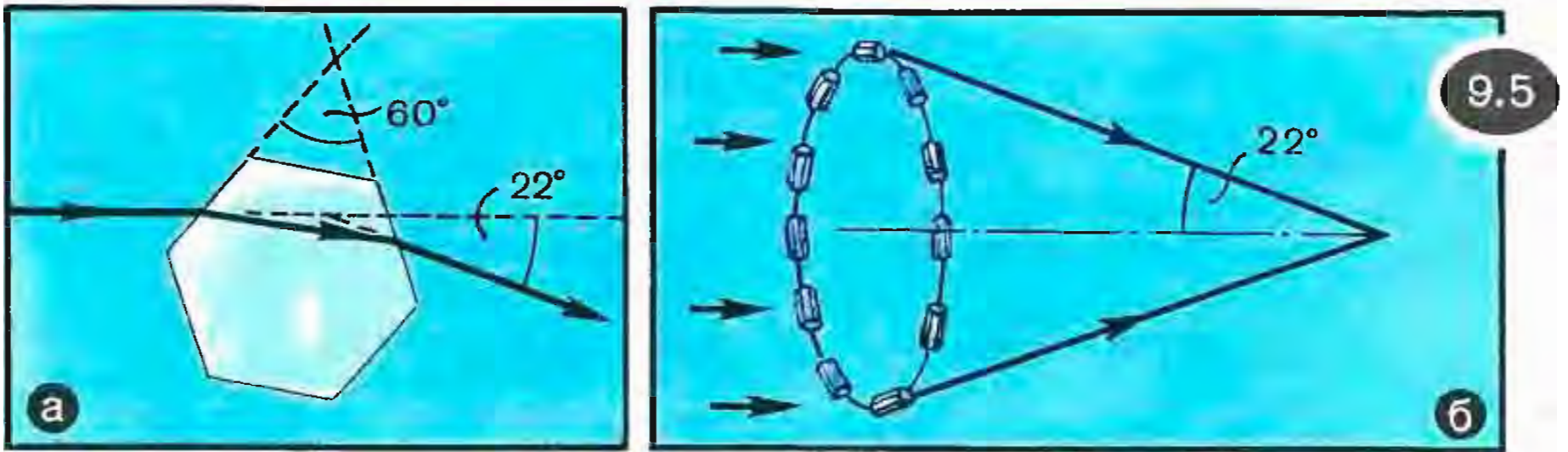
$$\begin{aligned} \cos \beta_1 \sqrt{1-n^2 \sin^2(\Theta - \beta_1)} &= \\ = \cos(\Theta - \beta_1) \sqrt{1-n^2 \sin^2 \beta_1} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \sqrt{(1-\sin^2 \beta_1)(1-n^2 \sin^2(\Theta - \beta_1))} &= \\ = \sqrt{(1-\sin^2(\Theta - \beta_1))(1-n^2 \sin^2 \beta_1)}. \end{aligned}$$

Отсюда получаем  $\beta_1 = \Theta/2$ , что как раз и соответствует симметричному ходу луча через призму.

**Объяснение возникновения малого гало.** Малое гало возникает вследствие показанного на рисунке 9.5, а двукратного преломления луча в шестигранной призме (ледяном кристаллике). Это соответствует прохождению луча сквозь трехгранную призму с преломляющим углом  $\Theta = 60^\circ$ . Выходящие из кристалликов лучи будут наиболее «сгущены» тогда, когда они испытают в призме наименьшее отклонение. Выше мы выяснили, что такая ситуация отвечает симметричному ходу лучей



в призме (именно эта ситуация и изображена на рисунке 9.5,а). Чтобы найти угол отклонения луча  $\delta$  в рассматриваемом случае, воспользуемся формулой (9.6), приняв  $\Theta=60^\circ$  и  $n=1,31$ . В результате получим  $\delta=22^\circ$ . Таким образом, наблюдатель будет видеть светящееся кольцо с угловым радиусом  $22^\circ$  (рис.9.5,б).

Нетрудно сообразить, что интенсивность свечения кольца будет одинаковой по всей его окружности лишь при условии, что оси шестигранных ледяных призм ориентированы беспорядочно. Если же есть какая-то преимущественная ориентация (ориентации) осей призм, то в этом случае отдельные участки кольца будут более яркими по сравнению с другими участками; возможно, что наблюдатель увидит не полное кольцо, а только некоторые его части. Последнюю ситуацию как раз иллюстрирует рисунок 9.2,б. Здесь оси шестигранных призм ориентированы преимущественно вертикально, поэтому наблюдаются только боковые части малого гало.

До сих пор мы полагали, что через призму проходят монохроматические лучи. Показатель преломления  $n=1,31$  соответствует желтым лучам. В действительности же в ледяных кристалликах преломляются лучи с разными

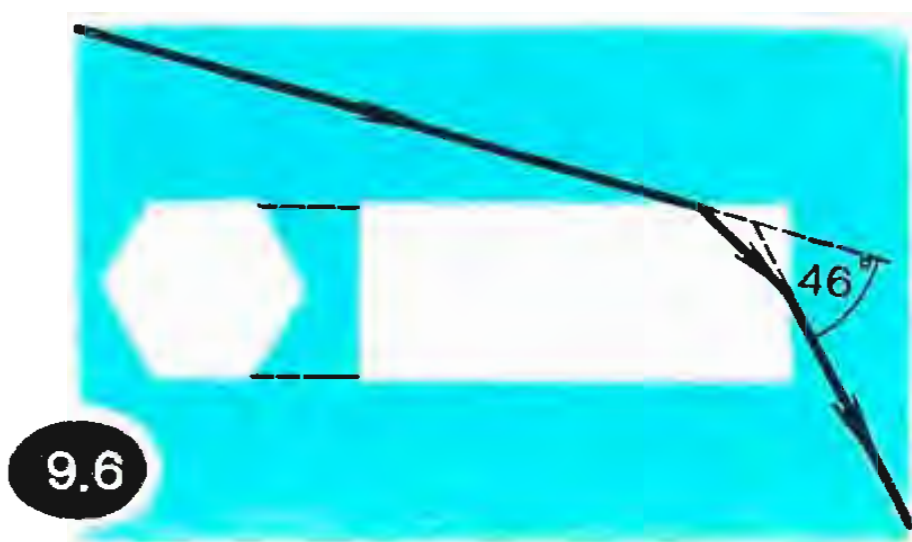
длинами волн. Вследствие дисперсии света кольцо гало оказывается окрашенным в цвета радуги. Наименьший угол отклонения для красных лучей равен  $21^\circ 30'$  ( $n=1,307$ ), а для фиолетовых лучей  $22^\circ 20'$  ( $n=1,317$ ), поэтому внутренний край кольца гало окрашен в красный цвет.

**Большое гало.** Большое гало возникает вследствие двукратного преломления луча в шестигранной ледяной призме (рис.9.6). Такое же преломление испытывал бы луч в трехгранной призме с преломляющим углом  $\Theta=90^\circ$ . Подставляя  $\Theta=90^\circ$  и  $n=1,31$  в формулу (9.6), находим  $\delta=46^\circ$ . В результате наблюдатель будет видеть светящееся кольцо с угловым радиусом в  $46^\circ$ .

Выше мы отмечали, что в случае вертикально ориентированных шестигранных ледяных призм наблюдаются лишь боковые части малого гало. Что же касается большого гало, то в данном случае будет наблюдаться лишь его верхняя часть (нижняя часть обычно оказывается ниже линии горизонта). Именно это мы и видим на рисунке 9.2,б.

Дисперсия света при преломлении приводит к тому, что большое гало, как и малое, окрашено





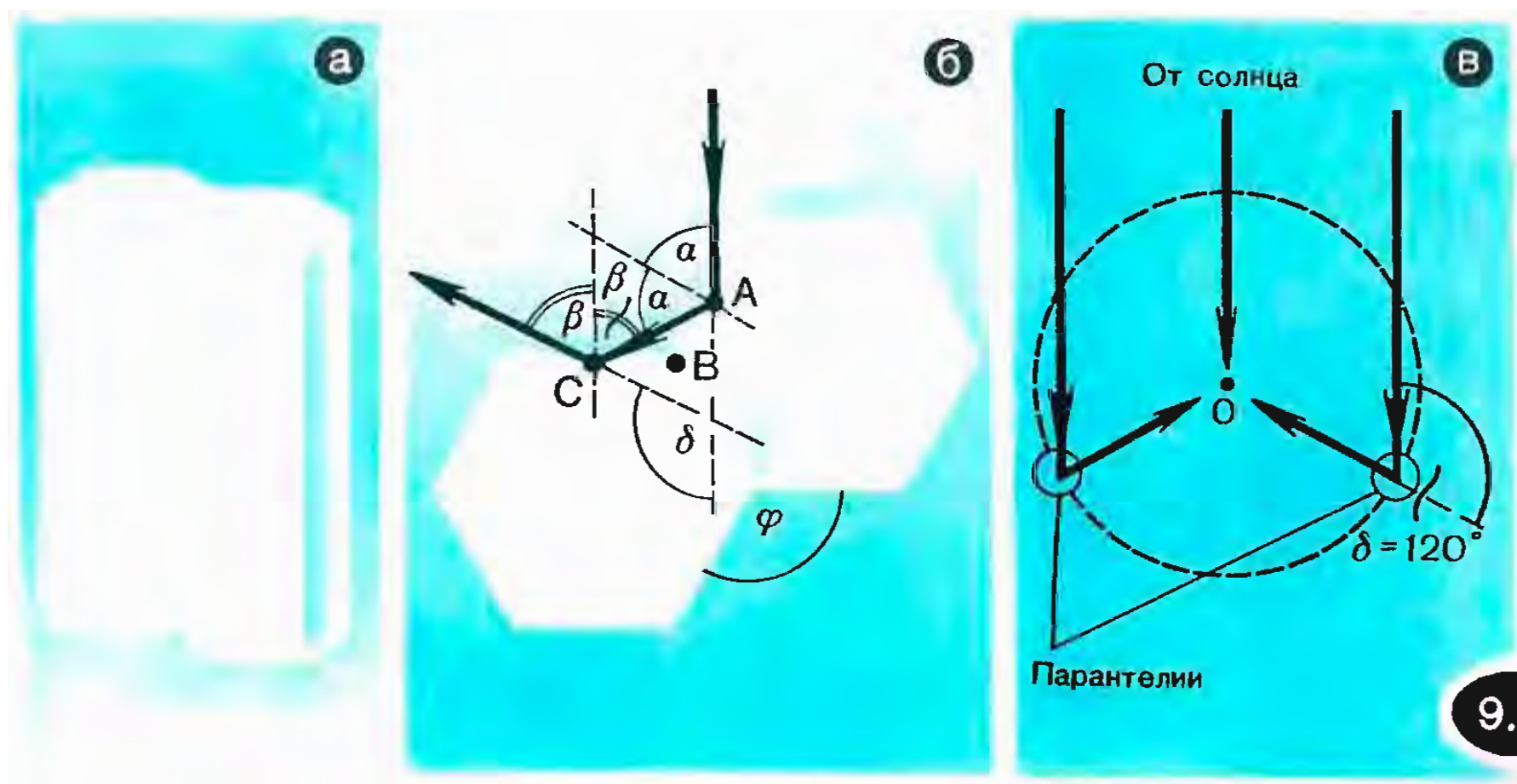
в радужные цвета. Чередование цветов в большом гало такое же, как и в малом. Красный (внутренний) край большого гало наблюдатель видит под углом  $45^{\circ}10'$ , а фиолетовый под углом  $48^{\circ}10'$ .

**Горизонтальный (парелический) круг, светящиеся столбы и кресты.** Предположим, что ледяные кристаллики и ледяные пластинки ориентированы в пространстве таким образом, что их основные отражающие грани оказываются *вертикальными*. В этом случае благодаря отражениям от указанных граней и возникает светя-

щаяся горизонтальная полоса шириной, равной ширине солнечного диска, и на одной высоте с последним. Естественно, что такая упорядоченная ориентация кристаллических призм и пластинок обычно происходит не во всех, а только в некоторых направлениях (от наблюдателя). Поэтому горизонтальный круг, как правило, наблюдается не полностью, а лишь в виде отдельных частей.

Если отражающие плоскости ледяных кристалликов ориентированы *почти горизонтально*, то может наблюдаться светящийся столб, проходящий через солнечный диск.

Предположим теперь, что в воздухе много ледяных кристалликов, имеющих форму, показанную на рисунке 9.3,б. Медленно падая на землю, эти кристаллики ведут себя как своеобразные парашютики; их оси будут ориентированы в основном *вертикально*. Отражение света от боковых поверхностей кристалликов приведет к появлению горизонтальной светящейся полосы, проходящей че-





рез солнечный диск. Отражение же от поверхностей шестиугольных пластинок на торцах кристалликов обусловит вертикальную светящуюся полосу. В результате наблюдатель увидит светящийся крест, в центре которого будет находиться солнце.

**Ложные солнца; парантелии.** Возникновение ложных солнц (ложных лун) на пересечениях малого и большого гало с горизонтальным кругом и вертикалью, проходящей через солнце (луну), можно объяснить, используя замечания, сделанные выше. Указанные элементы гало являются следствием преломлений и отражений света на ориентированных определенным образом в пространстве шестигранных ледяных призмах. Например, показанные на рисунке 9.1 ложные солнца  $S_1$  и  $S_2$  возникают, когда шестигранные ледяные призмы ориентированы вертикально.

Отдельно поговорим о возникновении ложных солнц, называемых парантелиями. Напомним, что они наблюдаются на парелическом круге на угловых расстояниях  $120^\circ$  от солнца (ложные солнца  $S_3$  и  $S_4$  на рисунке 9.1). Парантелии возникают вследствие двукратного отражения лучей от боковых граней сросшихся попарно шестигранных ледяных

призм, изображенных на рисунке 9.7,а. При этом необходимо, чтобы оси призм были ориентированы вертикально. Пусть  $\delta$  — угол отклонения луча в результате двукратного отражения, показанного на рисунке 9.7,б. Допустим, что ориентация призм по отношению к падающему лучу такова, что угол его падения на первую отражающую грань равен  $\alpha$ . Обозначим через  $\beta$  угол падения луча на вторую отражающую грань. В результате первого отражения световой луч повернется на угол  $180^\circ - 2\alpha$ , а в результате второго отражения — на угол  $180^\circ - 2\beta$ . Полный угол поворота есть

$$\delta = 360^\circ - 2(\alpha + \beta).$$

Рассматривая треугольник  $ABC$ , заключаем, что

$$\varphi + (90^\circ - \alpha) + (90^\circ - \beta) = 180^\circ,$$

следовательно,

$$\alpha + \beta = \varphi.$$

Таким образом, в результате двукратного отражения от произвольно ориентированных по отношению к падающим лучам призм (лишь бы оси призм были вертикальны) световой луч поворачивается на угол  $\delta = 360^\circ - 2\varphi$ . Так как  $\varphi = 120^\circ$ , то, значит, луч повернулся на угол  $\delta = 120^\circ$ . В итоге наблюдатель увидит парантелии на угловых расстояниях  $120^\circ$  от солнца (рис. 9.7,в).

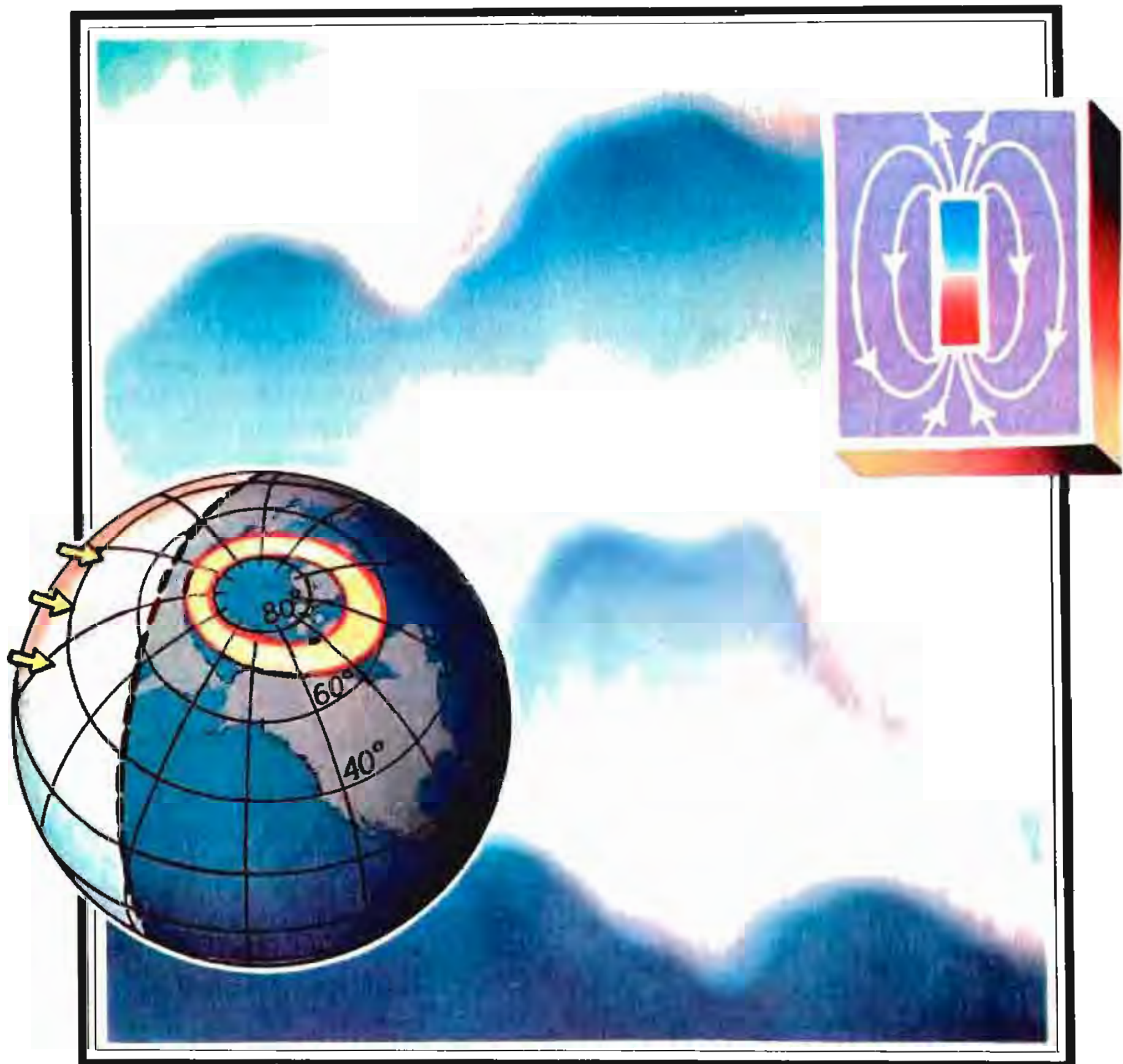
глава

# 10

## полярное сияние

Но где ж, натура, твой закон?  
С полных стран встает заря!  
Не солнце ль ставит там свой трон?  
Не льдисты ль мещут огонь моря?  
Се хладный пламень нас покрыл.  
Се в ночь на землю день вступил!

*М. В. Ломоносов*



«Ночь была безлунная, звездная, морозная и ясная. Темно, только на юго-востоке небо внизу слабо освещено, будто за холмом горят огни. Я любовался этим слабым светом, который вдруг превратился в сходящиеся снопы лучей, протянувшиеся кверху. От их прикосновения на юго-востоке зажглась медленно колеблющаяся завеса, свисающая складками с неба. Быть может, это было вознесенное в небеса покрывало Изольды, и там, где его касалось дыхание ее желания, оно становилось горячим и светлым. Дыхание Изольды пробегало по нему, оно трепетало и волновалось. Это было так похоже на ее крик: Он идет! Боже, он идет!— Завеса вспыхнула пламенем и зажгла небо».

Так поэтично описывает *полярное сияние* Рокуэлл Кент в автобиографической книге «Саламина», рассказывающей о Гренландии — ее природе и жителях.

Свисающие с небесных высот волнующиеся складки сияния писатель уподобляет покрывалу Изольды — героини одного из наиболее знаменитых произведений средневековой поэзии народов Западной Европы — повести о Тристане и Изольде.

С древнейших времен люди восхищались величественной картиной полярных сияний и задавались вопросом об их происхождении. Одно из наиболее ранних упоминаний о полярных сияниях встречается у Аристотеля. В его «Метеорологике», написанной 2300 лет назад, можно прочитать: «Иногда в ясные ночи наблюдается на небе множество явлений — зияния, провалы, кроваво-красная окраска... Кажется, будто полыхает пламя». Там, где жил

Аристотель, полярные сияния бывают довольно редко, но все же бывают. В подобных редкостных случаях они отличаются особенным богатством красок с преобладанием красных тонов — «полыханием пламени». А вот описание полярных сияний, сделанное в I в. н. э. римским философом Сенекой: «Некоторые из них выглядят как пустота, когда под светящейся короной свечение отсутствует и образуется как бы овальный вход в пещеру, другие — как бочки, когда видно большое закругленное пламя, перемещающееся с места на место... Среди них примечательны те, которые имеют вид огня на небе. Иногда они стоят высоко, сияя среди звезд, иногда так низко, что могут быть приняты за далеко горящую усадьбу или город».

Богиню утренней зари древние римляне называли Авророй. С ее именем они связывали и полярные сияния, изредка наблюдаемые на средних широтах. Ведь подобно утренней заре эти сияния были окрашены в розовые и красные цвета. С легкой руки римлян термин «аврора» стал впоследствии применяться к полярным сияниям. В настоящее время этот термин закрепился и в научной литературе; все явления, связанные с полярными сияниями, принято называть теперь *авроральными явлениями*.

Немало суеверий порождено полярными сияниями. В одних случаях они вызывали страх перед «божьем наказанием», в других, напротив, они представлялись «небесным воинством», спешающим на помощь. Летописцы повествуют, что во время битвы войск Александра Невского с немцами на льду Чудского озера



(1242 г.) вдруг появились на небе сполохи (в старину полярные сияния называли на Руси *сполохами* или *пáзорями*). Согласно легенде, русские воины увидели в этом добрый знак и с удвоенной силой обрушились на врага.

В эстонском эпосе «Калевипоэг» есть такие строки:

На ладьях широкодонных  
К нам подходят из-за моря  
Корабельщики лихие,  
Лютые головорезы...  
Так полярное сиянье,  
Так нам звезды предсказали!  
Душу нам гнетет тревога,  
Страхом сердце истомилось!

Древние эсты предсказывали по полярным сияниям не только войну, голод, болезни, но даже изменения погоды. Они верили, что полярное сияние отражает борьбу добрых и злых духов.

Тайна полярных сияний оставалась нераскрытой в течение многих веков. Относительно их природы и происхождения было высказано много гипотез, подчас весьма наивных.

Так, например, считали, что полярные сияния являются отблесками солнца, опустившегося за горизонт. Предполагали также, что это свет, который якобы испускают полярные льды во время особенно сильных морозов. Аристотель полагал, что «верхние слои воздуха, сгущаясь, могут воспламениться»; в этом он ошибочно усматривал причину полярных сияний. В учебнике физики XVIII в. в разделе, посвященном сияниям, утверждается, что «выскакивающие лучи не что иное суть, как зажженные горючие пары», и что «материя северного сияния и молнии одинаковая».

Все эти утверждения также являются ошибочными.

Много размышлял над природой полярных сияний М. В. Ломоносов. Очень интересны вопросы, которые у него при этом возникали:

Что зыблет ясный ночью луч?  
Что тонкий пламень в твердь разит?  
Как молния без грозных туч  
Стремится от земли в зенит?  
Как может быть, чтоб мерзлый пар  
Среди зимы рождал пожар?

Особенно интересен последний вопрос. В нем ухвачено главное: полярное сияние — это холодное свечение (напомним приводившуюся ранее строку из данного стихотворения: «Се хладный пламень нас покрыл»). Здесь уместно сказать об опытах Ломоносова со стеклянными шарами. Он откачивал из шаров часть воздуха и воспроизводил внутри них электрический разряд. Ученый полагал, что природа полярного сияния такая же, как и свечения газового разряда. Он писал: «Возбужденная электрическая сила в шаре, из которого воздух вытянут, внезапно лучи испускает, которые в мгновение ока исчезают, и в то же время новые на их места выскакивают, так что непрерывное блистание быть кажется. В северном сиянии сполохи или лучи вид подобный имеют». Отметим также опыты Ломоносова по наблюдению зеленого свечения ртутных паров в откачанной трубке с жидкой ртутью при резких встряхиваниях трубки. Это свечение в еще большей степени походило на холодное свечение полярных сияний.

Наблюдавшееся в опытах Ломоносова свечение в самом деле

сродни свечению сияний. Забегая вперед, заметим, что во всех этих случаях наблюдается так называемое люминесцентное свечение. Правда, причины, вызывающие свечение паров ртути во встряхиваемой трубке, свечение в газовом разряде, полярное сияние, различны; здесь мы имеем дело с разными видами явления люминесценции.

Таким образом, хотя Ломоносову и не удалось установить природу полярного сияния, он все же довольно близко подошел к ее пониманию. Независимо от него вывод о близости физической природы газового разряда и полярного сияния сделали Бенджамин Франклин и англичанин Ж. Кэнтон.

По-настоящему загадку полярных сияний удалось разгадать лишь в наше время. И хотя здесь еще осталось немало невыясненных вопросов, все же картина в целом вполне ясна. Это стало возможным благодаря развитию современной физики и успехам в области космических исследований.

**Формы полярных сияний.** Полярное сияние — всегда необычайно величественное зрелище. Это неплохо демонстрирует рисунок 10.1,а-з, где приведены в качестве примера несколько конкретных сияний. Из рисунка видно, что наблюдаемые полярные сияния отличаются большим разнообразием. Но при всем разнообразии можно выделить несколько определенных их форм.

Обычно выделяют четыре основные формы.

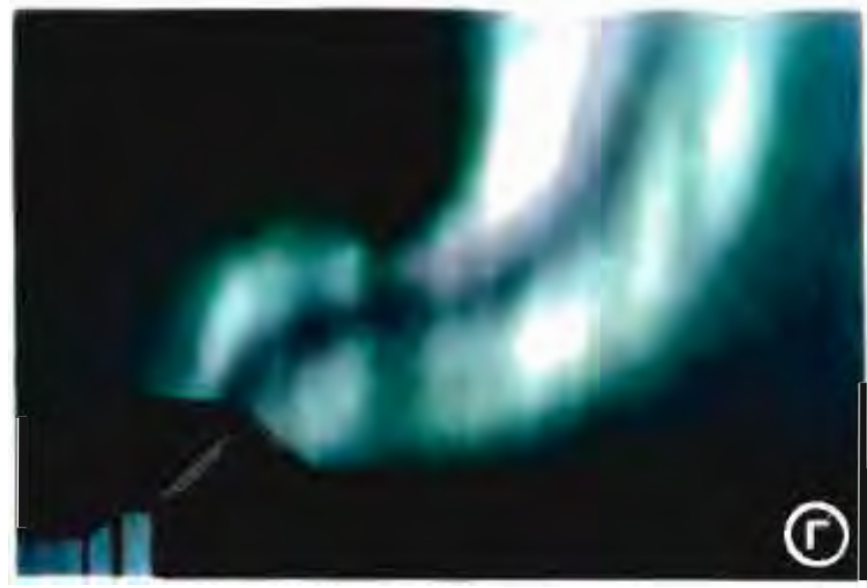
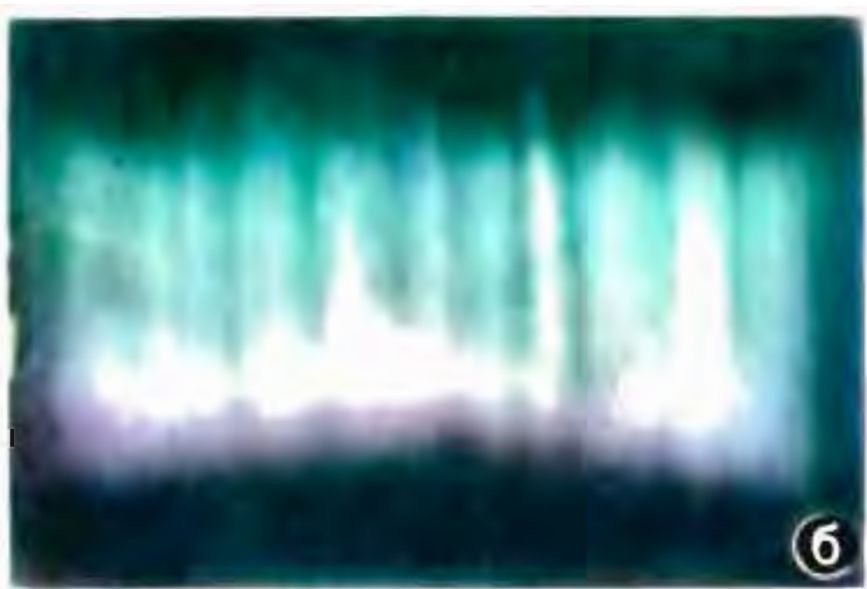
Наиболее простая форма — *однородная дуга* (*однородная по-*

*лоса*). Она имеет довольно ровное свечение, более яркое в нижней части дуги и постепенно исчезающее вверху (рис.10.2,а). Дуга простирается обычно через весь небосвод в направлении восток — запад; ее протяженность достигает тысяч километров, тогда как толщина составляет всего несколько километров. Протяженность светящейся полосы в вертикальном направлении измеряется сотнями километров; нижний край полосы находится, как правило, на высотах 100—150 км. Однородные дуги (полосы) бывают беловато-зеленого, а также красноватого или лилового цвета.

Следующая форма сияний — *лучи*. На небе видны тесно выстроившиеся друг за другом узкие вертикальные светящиеся линии, как будто множество поставленных в ряд мощных прожекторов светят вверх (рис.10.2,б). Для наблюдателя, который смотрит на сияние не сбоку, а непосредственно снизу, лучи представляются сходящимися в вышине (эффект перспективы); вспомним у Рокуэлла Кента: «сходящиеся снопы лучей». Начинаясь с высоты примерно 100 км, лучи уходят вверх на сотни и даже тысячи километров. Все вместе они образуют лучистую полосу. Обычно она зеленоватого цвета; внизу полоса часто имеет розовато-оранжевую кайму.

Особенно сильное впечатление производят свечения, имеющие форму *лент*, которые могут образовывать складки (рис.10.2,в) или закручиваться в своеобразные спирали (рис.10.2,г). Высоко в небе повисают гигантские занавеси, они колышутся, волнуются, меняют очертания и яркость. Их-то и называл Рокуэлл Кент «покрывалом

10.1





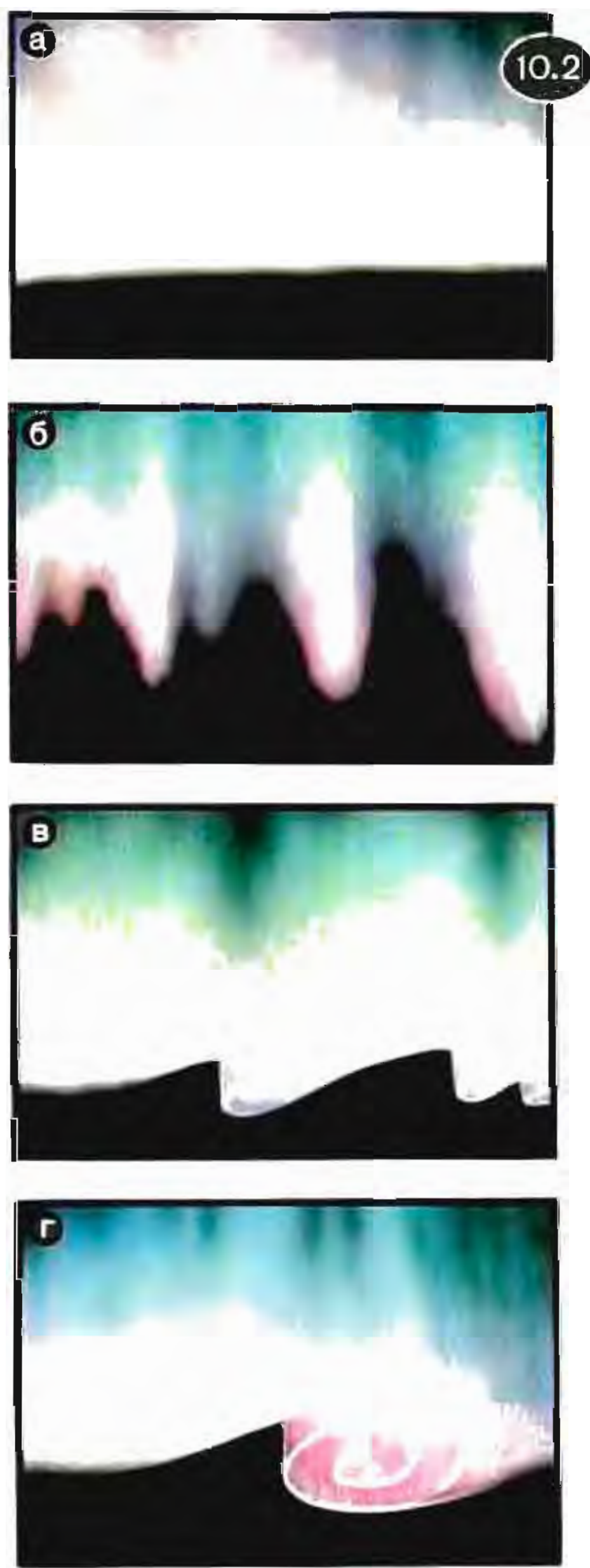
Изольды». Толщина этих занавесей порядка километра; по высоте они располагаются примерно от 100 до 400 км. Окраска лент в основном зеленовато-синяя, с переходом к розоватым и красным тонам в нижней части.

Наконец, надо отметить сияния, имеющие форму размытых пятен, похожих на гигантские светящиеся облака; их называют *диффузными пятнами*. Отдельное такое пятно имеет площадь порядка 100 км<sup>2</sup>. Как правило, пятна окрашены в белесые или красноватые тона. Образуются они на высотах около 100 км, а также на высотах 400...500 км.

Различные формы полярных сияний могут возникать одновременно, накладываясь одна на другую. Лучи, ленты, пятна вовсе не неподвижны: они перемещаются и при этом интенсивность их свечения со временем изменяется. Скорость движения лучей и лент может достигать десятков километров в секунду. В течение ночи можно наблюдать постепенное превращение одних форм сияний в другие. Например, однородная дуга может вдруг разбиться на лучи или превратиться в складки ленты, а последняя может затем распасться на облакообразные пятна.

Таким образом, форма наблюдаемого полярного сияния оказывается непостоянной — она способна совершенно измениться в течение часа и даже нескольких минут.

Возвращаясь к рисунку 10.1, заметим, что нетрудно распознать на нем перечисленные выше формы сияний. Так, на рисунках 10.1,а,г мы видим однородные дуги. На рисунках 10.1,в, б наблюдается лучистая полоса. На рисун-



ках 10.1, г, ж, з полярное сияние имеет достаточно четко выраженную ленточную форму. Сияние на рисунке 10.1, е можно рассматривать как наложение друг на друга лучистой и ленточной форм.

В заключение приведем весьма обстоятельное описание картины полярного сияния, составленное советским полярником Г. А. Ушаковым: «Небо пылало. Бесконечная прозрачная вуаль покрыла весь небосвод; какая-то неведомая сила колебала ее. Вся она горела нежным лиловым светом. Кое-где показывались яркие вспышки и тут же бледнели, как будто на мгновение рождались и рассеивались облака, сотканые из одного света. Сквозь вуаль ярко светили звезды. Вдруг вуаль исчезла. В некоторых местах еще раз вспыхнули лиловые облака. Какую-то долю секунды казалось, что сияние погасло. Но вот длинные лучи, местами собранные в яркие пучки, затрепетали бледно-зеленым светом. Вот они сорвались с места и со всех сторон, быстрые как молнии, метнулись к зениту, на мгновение замерли в вышине, образовали огромный сплошной венец, затрепетали и потухли».

**Где и когда они наблюдаются.** Предположим, что мы смотрим на нашу планету из космоса, находясь где-то над Северным полюсом.

Полярные сияния будут образовывать светящийся венчик над планетой, овалом окружающий полюс. Этот овал и есть та область, где полярные сияния наблюдаются наиболее часто. Ее называют овалом полярных сияний или, иначе, *авроральной*

*зоной*. Фактически полярные сияния происходят в этой зоне все время. Овал зоны сияний смещен в ночную сторону земного шара. Это хорошо видно на рисунке, помещенном в левом нижнем углу на с. 141. Овальная зона сияний выделена на рисунке желтым цветом. На дневной стороне (стороне, обращенной к Солнцу) зона простирается от широты  $75^\circ$  до широты  $80^\circ$ , а на ночной стороне примерно от  $60^\circ$  до  $70^\circ$ . Положение овала зоны фиксировано по отношению к Солнцу. В течение суток Земля совершает оборот под этим овалом. Наряду с зоной сияний вблизи Северного полюса существует такая же зона в Южном полушарии — вблизи Южного полюса.

Приведенные данные о размерах и положении овальной зоны полярных сияний относятся к периодам «спокойного Солнца» — когда солнечная активность находится на среднем уровне. При повышении солнечной активности размеры зоны сияний существенно увеличиваются. После особенно сильных возмущений на Солнце зона сияний может расшириться настолько сильно, что охватит средние и даже нижние широты — вплоть до экватора. При этом заметно возрастает интенсивность свечения сияний.

**Что такое полярное сияние.** От Солнца во все стороны, и в частности к Земле, непрерывно распространяются не только волны электромагнитного излучения, но и потоки летящих с огромной скоростью заряженных частиц — так называемый *солнечный ветер*. Вторгаясь в земную атмосферу, частицы солнечного ветра (в ос-

новном электроны и протоны) определенным образом фокусируются и направляются магнитным полем Земли. Благодаря воздействию со стороны земного магнитного поля космические электроны и протоны проникают в пределах зон полярных сияний достаточно глубоко в атмосферу — вплоть до высот порядка 100 км (но не ниже!). Сталкиваясь с атомами и молекулами атмосферного воздуха, они ионизируют и возбуждают их, в результате чего возникает свечение люминесценции, которое, собственно говоря, и есть полярное сияние.

Итак, полярное сияние — это люминесцентное свечение, возникающее в результате взаимодействия летящих от Солнца заряженных частиц (электронов и протонов) с атомами и молекулами земной атмосферы. Появление же этих заряженных частиц в определенных районах атмосферы и на определенных высотах есть результат взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли.

Физика полярных сияний достаточно сложна. Чтобы разобраться в ней, читатель должен иметь представление о том, как движутся заряженные частицы в магнитных полях, какова структура магнитного поля Земли, что такое люминесценция. Поэтому, прежде чем переходить к физике сияний, остановимся сначала на указанных вопросах.

**Сила Лоренца; векторное произведение двух векторов.** Предположим, что частица с зарядом  $e$  движется в магнитном поле. Пусть в некоторый момент времени скорость частицы есть  $\vec{v}$ , а магнитная индукция в этот момент в точке простран-

ства, где находится частица, есть  $\vec{B}$ . В рассматриваемый момент времени на частицу будет действовать со стороны магнитного поля сила  $\vec{F}$ , определяемая следующей формулой:

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}. \quad (10.1)$$

Эта формула была получена нидерландским физиком Х. Лоренцом, поэтому силу  $\vec{F}$  называют силой Лоренца.

Формула (10.1) нуждается в разъяснении. Стоящий в ней знак « $\times$ » означает, что вектор скорости  $\vec{v}$  векторно умножается на вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , или, иными словами, что  $\vec{F}/e$  есть векторное произведение векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Расскажем, что это такое — векторное произведение двух векторов.

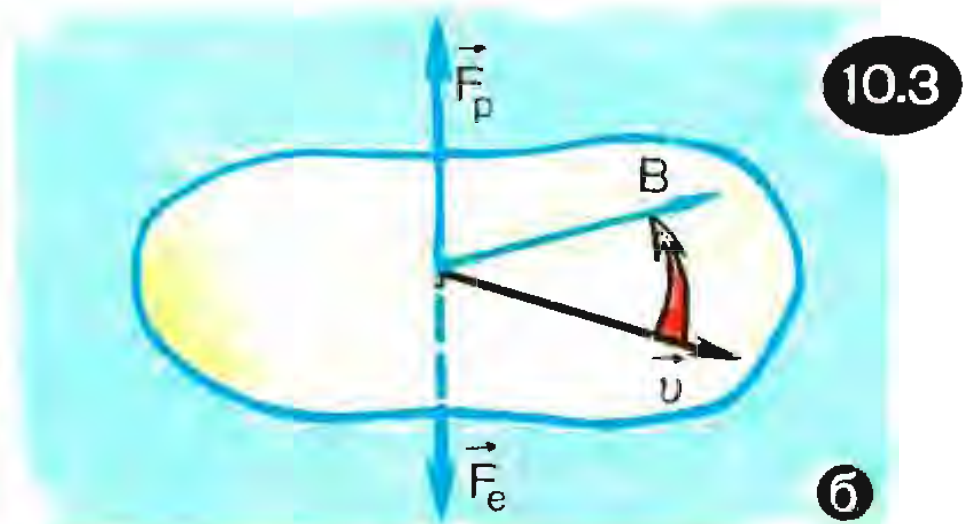
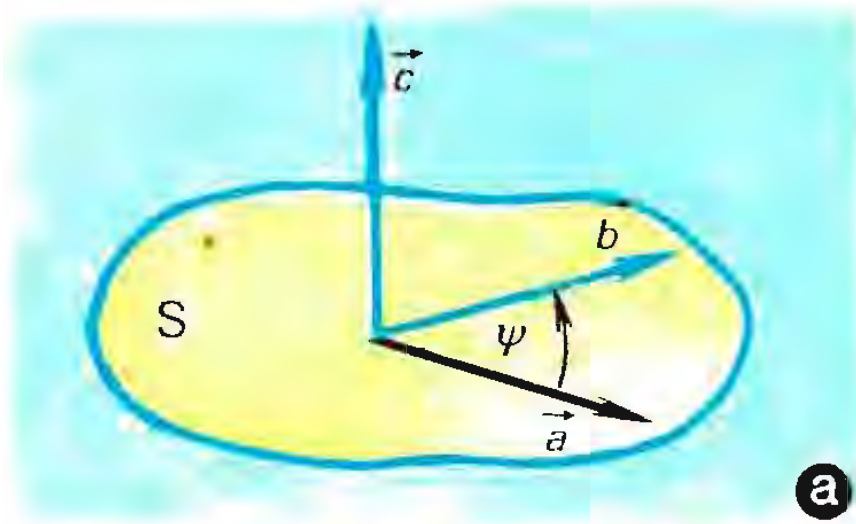
Пусть имеются два вектора ( $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ ), составляющие друг с другом угол  $\varphi$ , и пусть  $S$  — плоскость, проходящая через эти векторы (рис. 10.3,а). Векторно умножая вектор  $\vec{a}$  на вектор  $\vec{b}$ , мы получаем новый вектор (обозначим его как  $\vec{c}$ ), который называется векторным произведением векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ :  $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ . Этот вектор определяется так: его модуль есть

$$c = ab \sin \varphi, \quad (10.2)$$

направлен он перпендикулярно к плоскости  $S$ , причем в ту сторону, куда будет перемещаться ось винта или буравчика, который вращают в направлении от вектора  $\vec{a}$  к вектору  $\vec{b}$  (в сторону меньшего угла между векторами). Предположим, что мы смотрим на плоскость  $S$  сверху так, как это изображено на рисунке 10.3,а. Поворот от вектора  $\vec{a}$  к вектору  $\vec{b}$  соответствует вращению против часовой стрелки. При этом буравчик будет как бы вывинчиваться из плоскости; его ось будет перемещаться вдоль себя самой от плоскости к наблюдателю. Именно в этом направлении и будет ориентирован вектор  $\vec{c}$ .

Если бы мы умножали векторно не вектор  $\vec{a}$  на вектор  $\vec{b}$ , а, наоборот, вектор





10.3

$\vec{b}$  на вектор  $\vec{a}$ , то должны были бы мысленно совершить поворот от  $\vec{b}$  к  $\vec{a}$ . Ему соответствует вращение по часовой стрелке, и, значит, буравчик будет как бы ввинчиваться в пространство под плоскостью  $S$ ; его ось будет перемещаться от наблюдателя (вниз). Теперь векторное произведение (пусть это будет вектор  $\vec{c}'$ ) ориентируется не вверх, а вниз. Это означает, что  $\vec{c}' = -\vec{c}$  или, иначе говоря,

$$\vec{b} \times \vec{a} = -(\vec{a} \times \vec{b}). \quad (10.3)$$

Мы видим, что векторное произведение двух векторов меняет свой знак при перемене мест сомножителей. Это тот особый случай, когда при перемене мест сомножителей произведение меняется.

После сделанных замечаний вернемся к формуле (10.1). Теперь ясно, что вектор  $\vec{F}/e$  должен быть перпендикулярен к плоскости, проходящей через векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Чтобы выявить одно из двух возможных направлений этого перпендикуляра, надо мысленно совершить поворот от  $\vec{v}$  к  $\vec{B}$  и сообразить, куда при этом будет перемещаться ось буравчика. Если частица заряжена *положительно*, направление силы Лоренца  $\vec{F}$  будет совпадать с направлением векторного произведения  $\vec{F}/e$ . Для *отрицательно* заряженной частицы векторы  $\vec{F}$  и  $\vec{F}/e$  будут направлены в противоположные стороны. На рисунке 10.3,б показано, как направлена сила Лоренца

для протона (сила  $\vec{F}_p$ ) и для электрона (сила  $\vec{F}_e$ ).

Скорости электрона и протона выбраны в данном случае одинаковыми.

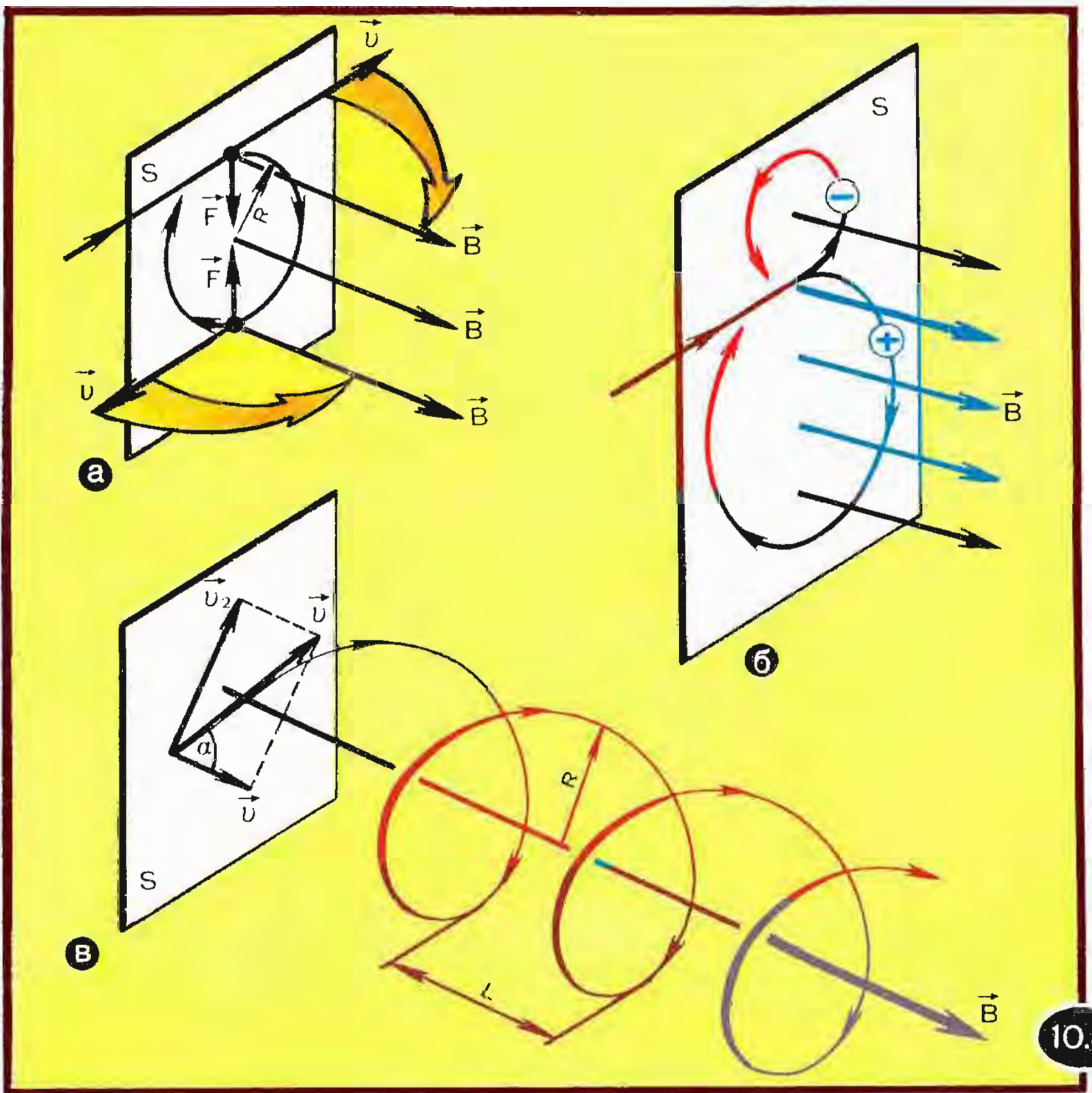
Векторное произведение  $\vec{F}/e$ , а значит, и сила Лоренца  $\vec{F}$  перпендикулярны к плоскости векторов  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Это означает, в частности, что сила Лоренца в любой момент времени перпендикулярна к скорости частицы. Следовательно, эта сила не может производить работу. Она не может ни увеличить, ни уменьшить энергию частицы, а лишь изменяет направление ее движения. Иными словами, сила Лоренца изменяет направление вектора  $\vec{v}$ , оставляя неизменным его модуль.

**Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.** Напомним, что поле называют *однородным*, если его напряженность одинакова во всех точках. Силовые линии такого поля представляют собой семейство взаимно параллельных прямых. Всякое реальное поле является неоднородным, так что однородное поле — это идеализация. Однако идеализация эта весьма полезная, поскольку в пределах достаточно малой области пространства поле практически всегда можно приближенно считать однородным. Поэтому, прежде чем переходить к магнитному полю Земли (являющемуся, разумеется, неоднород-

ным), рассмотрим однородное магнитное поле и выясним, как будет двигаться в таком поле заряженная частица.

Предположим, что частица массой  $m$  с положительным зарядом  $e$  влетает в такое поле со скоростью  $\vec{v}$ , направленной перпендикулярно силовым линиям поля ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ). Обозначим через  $S$  плоскость, перпендикулярную к сило-

вым линиям поля. Частица будет двигаться в этой плоскости по окружности под действием силы Лоренца  $\vec{F}$ , играющей роль центростремительной силы. В этом нетрудно убедиться, обратившись к рисунку 10.4,а. Сила Лоренца изображена на рисунке для двух точек траектории частицы. Всякий раз для выявления направления этой силы надо мысленно поворота-



10.4



чивать вектор скорости  $\vec{v}$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  и применять описанное ранее правило буравчика. Из (10.1) и (10.2) следует, что в рассматриваемом случае  $F = evB$ . Радиус окружности частицы  $R$  (его называют *гирорадиусом*) найдем, воспользовавшись вторым законом Ньютона, который в данном случае можно записать в виде

$$evB = m \frac{v^2}{R} \quad (10.4)$$

(здесь, напомним,  $v^2/R$  есть модуль центростремительного ускорения).

Из (10.4) получаем

$$R = mv/eB. \quad (10.5)$$

Рисунок 10.4,а относился к частице с положительным зарядом; в этом случае сила Лоренца  $\vec{F}$  совпадает по направлению с векторным произведением  $\vec{F}/e = \vec{v} \times \vec{B}$ . Если у частицы отрицательный заряд, то, как уже отмечалось, векторы  $\vec{F}$  и  $\vec{F}/e$  будут направлены в противоположные стороны. Такая частица совершает движение по окружности вокруг силовых линий поля в направлении, обратном по отношению к направлению движения положительно заряженной частицы. На рисунке 10.4,б сравниваются движения частицы с положительным и частицы с отрицательным зарядом. Если смотреть навстречу силовым линиям поля, то положительно заряженная частица совершает поворот по часовой стрелке, а отрицательно заряженная против часовой стрелки.

Рассмотрим задачу. Чему равен гирорадиус протона, если известно, что гирорадиус электрона, имеющего такую же энергию,

есть  $R_e = 5$  м? Масса протона в 1840 раз больше массы электрона.

Обозначим через  $m$  и  $M$  массы электрона и протона соответственно, а через  $v_e$  и  $v_p$  их скорости. В соответствии с (10.5) запишем для электрона

$$R_e = mv_e/eB$$

и для протона

$$R_p = Mv_p/eB.$$

Отсюда видно, что

$$\frac{R_p}{R_e} = \frac{M}{m} \frac{v_p}{v_e}. \quad (10.6)$$

Так как энергии электрона и протона одинаковы, то  $mv_e^2 = Mv_p^2$  и, значит,

$$v_p/v_e = \sqrt{m/M}.$$

Подставляя это соотношение в (10.6), находим

$$R_p/R_e = \sqrt{M/m}. \quad (10.7)$$

Учтем, что  $M/m = 1840$  и  $R_e = 5$  м. В результате получаем  $R_p = 215$  м.

Теперь предположим, что частица с положительным зарядом  $e$ , массой  $m$  и скоростью  $\vec{v}$  влетает в однородное магнитное поле (магнитная индукция  $\vec{B}$ ) под углом  $\alpha$  к силовым линиям; этот угол называют *питч-углом*. Разложим вектор  $\vec{v}$  на две составляющие  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  — соответственно вдоль силовых линий ( $v_1 = v \cos \alpha$ ) и перпендикулярно к ним ( $v_2 = v \sin \alpha$ ). Вектор  $\vec{v}_1$  параллелен вектору  $\vec{B}$ , и поэтому  $\vec{v}_1 \times \vec{B} = 0$ ; значит, вдоль силовых линий поля частица будет перемещаться с постоянной скоростью (скоростью  $v_1$ ). В то же время она будет совершать обороты вокруг силовых линий со



скоростью  $v_2$ ; в соответствии с (10.5) радиус оборотов (гирорадиус частицы) есть

$$R = \frac{mv_2}{eB}.$$

Таким образом, частица будет двигаться в однородном магнитном поле по *спиральной траектории*, которая как бы намотана на силовые линии поля. Эта спираль изображена на рисунке 10.4,в, где  $R$  и  $L$  — соответственно радиус и шаг спирали.

Рассмотрим задачу. Если бы частица двигалась в плоскости, перпендикулярной к силовым линиям однородного магнитного поля (т. е. если бы  $\alpha = 90^\circ$ ), то в этом случае ее гирорадиус был бы  $R_0 = 5$  м. Известно, что частица влетела в поле под углом  $\alpha = 45^\circ$  к его силовым линиям. Найти радиус и шаг спирали, описываемой частицей.

В рассматриваемом случае

$$v_1 = v_2 = \frac{v}{\sqrt{2}},$$

где  $v$  — модуль скорости частицы; Радиус спиральной траектории частицы  $R = \frac{mv_2}{eB} = \frac{(mv/eB)}{\sqrt{2}} = \frac{R_0}{\sqrt{2}}$ . Чтобы найти шаг спирали,

надо определить период  $T$  обращения частицы вокруг силовой линии. Он определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi R}{v_2}. \quad (10.8)$$

Учитывая, что

$$R = \frac{R_0}{\sqrt{2}},$$

находим

$$T = \frac{2\pi R_0}{v}.$$

Подставляя этот результат в формулу для шага спирали ( $L = v_1 T$ ), получаем

$$L = \pi \sqrt{2} R_0.$$

Итак, радиус и шаг спиральной траектории частицы описываются в данном случае

выражениями:

$$R = R_0 / \sqrt{2}, \quad L = \pi \sqrt{2} R_0.$$

С учетом того, что  $R_0 = 5$  м, находим отсюда  $R = 3,5$  м,  $L = 22$  м.

**Особенности движения заряженной частицы в неоднородном магнитном поле.** На рисунке 10.5 сопоставляются картины силовых линий для однородного (а) и неоднородного (б) магнитных полей. Магнитная индукция неоднородного поля, изображенного на рисунке 10.5,б, возрастает в направлении оси  $z$ ; по мере увеличения  $z$  силовые линии все более сближаются («сгущаются»).

Предположим, что в рассматриваемое неоднородное магнитное поле влетает положительно заряженная частица со скоростью  $\vec{v}$ , ориентированной в плоскости  $S$  перпендикулярно к оси  $z$  (рис. 10.6,а). Вектор магнитной индукции  $\vec{B}_A$  в точке  $A$  на рисунке разложим на две составляющие — перпендикулярную к плоскости  $S$  (составляющая  $\vec{B}_{A1}$ ) и лежащую в плоскости  $S$  (составляющая  $\vec{B}_{A2}$ ). Последняя составляющая перпендикулярна к оси  $z$ ; ее наличие связано с неоднородностью поля (в однородном поле, показанном на рисунке 10.5,а, такой составляющей нет).

Сила

$$\vec{F}_1 = e\vec{v} \times \vec{B}_{A1}$$

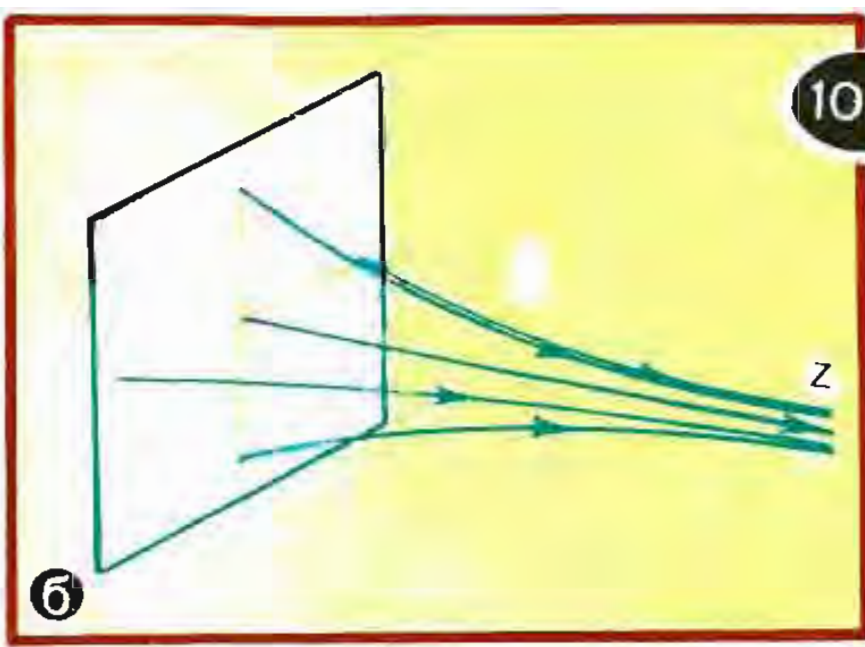
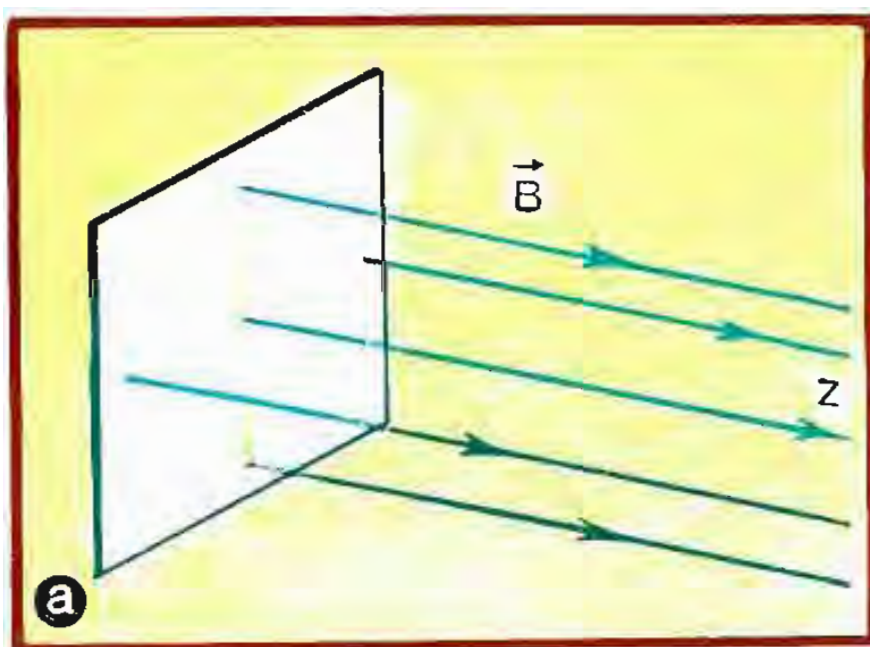
лежит в плоскости  $S$ . В этом нетрудно убедиться, если мысленно совершить поворот от вектора  $\vec{v}$  к вектору  $\vec{B}_{A1}$  и воспользоваться правилом буравчика. Сила  $\vec{F}_1$  заставляет частицу совершать обо-

роты вокруг силовых линий поля. Однако остаться в пределах плоскости  $S$  частица не может. Ведь есть еще одна составляющая вектора магнитной индукции — составляющая  $\vec{B}_{A2}$ . Она обуславливает силу

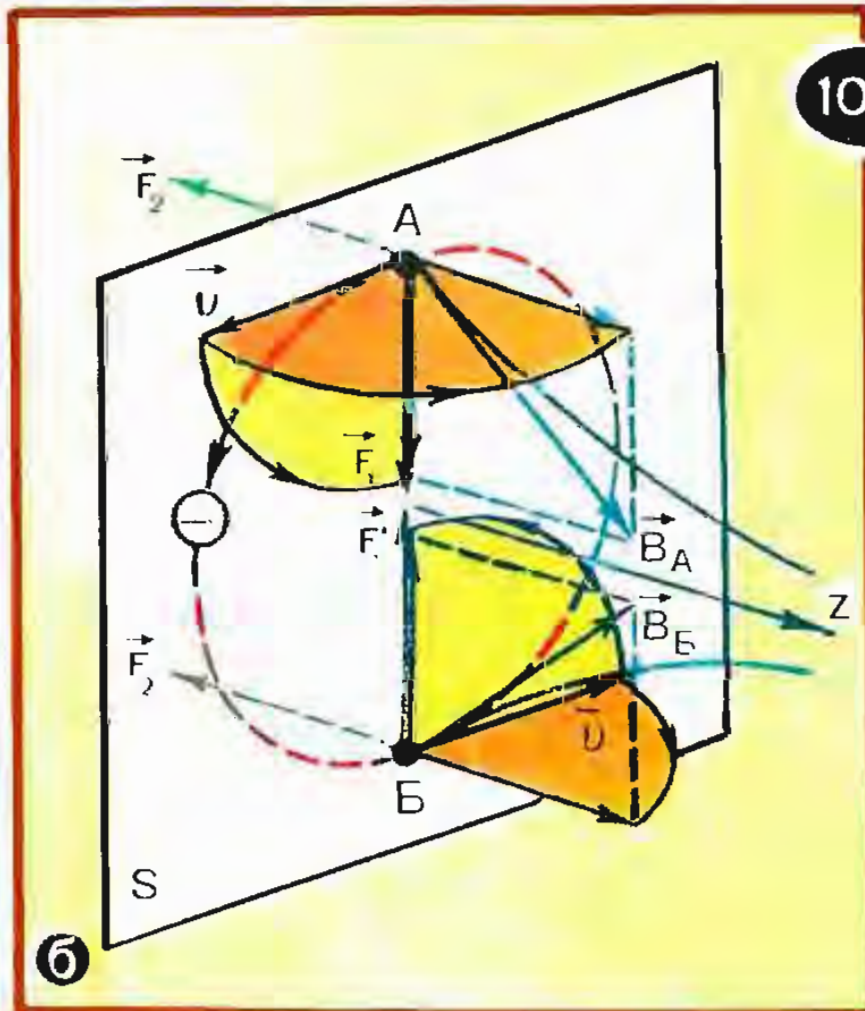
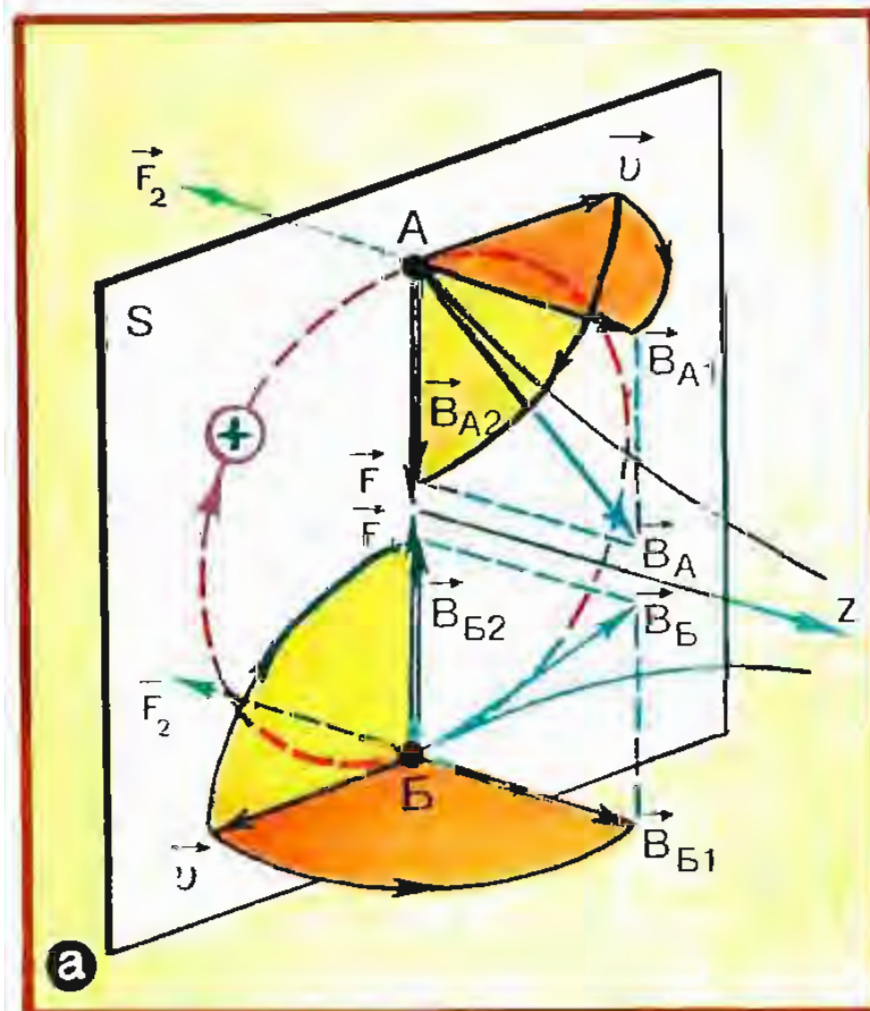
$$\vec{F}_2 = e\vec{v} \times \vec{B}_{A2}.$$

Совершая мысленно поворот от  $\vec{v}$  к  $\vec{B}_{A2}$  и применяя правило буравчика, убеждаемся, что сила  $\vec{F}_2$  перпендикулярна к плоскости  $S$ , причем ее направление противо-

положно направлению оси  $z$ . Во всех точках штриховой окружности, изображенной на рисунке 10.6,а, составляющая магнитной индукции, лежащая в плоскости  $S$ , будет направлена к центру окружности (см., например, показанное на рисунке разложение вектора магнитной индукции в точке  $B$ ). Таким образом, во всех точках окружности на частицу будет действовать сила  $\vec{F}_2$ , направленная противоположно оси  $z$ . Эта сила будет **выталкивать** частицу из



10.5



10.6

плоскости  $S$  в сторону уменьшения индукции магнитного поля, т. е. в направлении, в котором поле ослабевает.

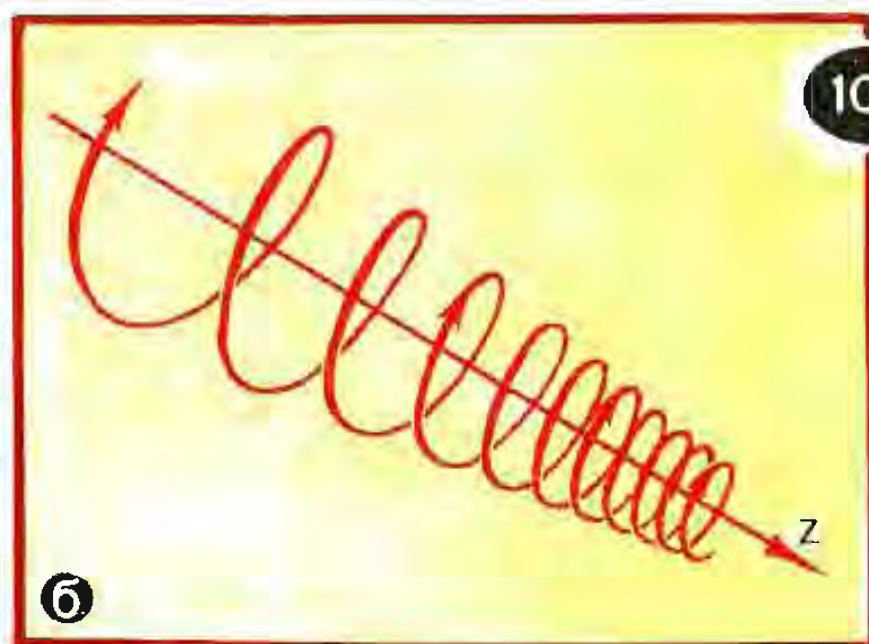
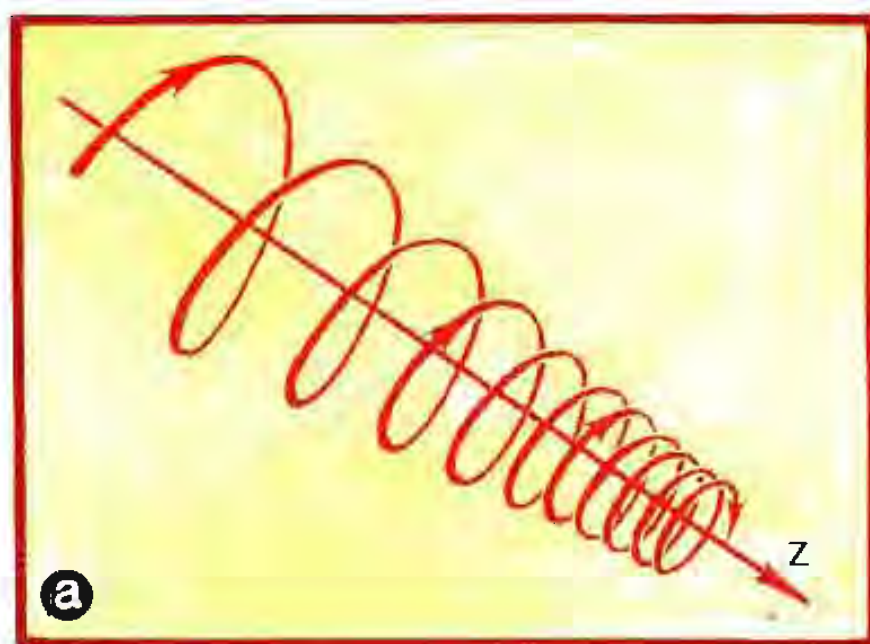
Такой же результат мы получим, рассматривая не положительно, а отрицательно заряженную частицу. Как мы уже знаем, такая частица совершает обороты вокруг силовых линий поля в обратную сторону. При этом она, как и положительно заряженная частица, будет выталкиваться полем в направлении, в котором поле ослабевает. Предлагаем читателю самостоятельно изучить рисунок 10.6,б, построенный по аналогии с рисунком 10.6,а. В отличие от рисунка 10.6,а, здесь частица движется по окружности в обратную сторону. Кроме того, следует учесть, что для отрицательно заряженной частицы вектор  $\vec{F}_2$  направлен противоположно вектору  $\vec{F}_2/e$  (направление последнего определяется по правилу буравчика).

Теперь нетрудно представить, как в общем случае должна двигаться в неоднородном магнитном поле заряженная частица. Как и в однородном поле, она будет описывать спиральную траекторию вокруг силовых линий. Однако, в отличие от однородного поля, спираль эта обладает двумя особенностями. Во-первых, по мере перемещения частицы вдоль силовой линии радиус спирали теперь не остается неизменным. Если частица, перемещаясь, попадает в область более сильного поля, то ее гирорадиус уменьшается; при перемещении же частицы в направлении, в котором поле ослабевает, ее гирорадиус возрастает. Это следует непосредственно из соотношения (10.5), согласно которому гирорадиус

частицы пропорционален обратной величине магнитной индукции поля ( $R \sim 1/B$ ). Во-вторых, изменяется не только гирорадиус, изменяется также и шаг спирали. Предположим, что начальная скорость частицы направлена таким образом, что частица, описывая спираль, перемещается в область более сильного поля. Как мы уже выяснили, в этом случае она будет встречать противодействие со стороны поля; на частицу будет действовать сила, стремящаяся вернуть ее назад, в результате шаг спирали станет постепенно уменьшаться. Уменьшение будет происходить до тех пор, пока шаг не обратится в нуль, после чего частица, продолжая движение по спирали, начнет перемещаться обратно — в область более слабого поля. Теперь указанная сила будет подгонять частицу, вследствие чего шаг спирали начнет возрастать.

На рисунке 10.7,а показана спиралеобразная траектория частицы, перемещающейся вдоль оси, т. е. в направлении усиления магнитного поля. Видно, что радиус спирали и ее шаг постепенно уменьшаются. На рисунке 10.7,б показана траектория частицы уже после того, как поле заставило ее начать перемещение назад; теперь шаг и радиус спирали постепенно возрастают. Если вначале частица двигалась по сворачивающейся спирали, то после изменения направления перемещения она движется по разворачивающейся спирали. Заметим, что, когда мы говорим об изменении (обращении) направления перемещения частицы, мы имеем в виду лишь ее перемещение вдоль силовой линии (вдоль оси  $z$ ). Что же касается направления движения час-





тицы вокруг силовой линии, то оно сохраняется неизменным: если смотреть на положительно заряженную частицу так, чтобы ось  $z$  была направлена на наблюдателя, то частица будет закручиваться по часовой стрелке как при ее приближении к наблюдателю, так и при удалении от наблюдателя. Отрицательно заряженная частица будет закручиваться против часовой стрелки.

**Магнитное поле Земли.** На рисунке 10.8,а изображен хорошо знакомый всем магнит ( $N$  — северный полюс магнита,  $S$  — южный полюс,  $NS$  — ось магнита). Синими линиями показаны силовые линии магнитного поля, создаваемого магнитом.

Наш земной шар — это тоже магнит, только очень большой. Как и вокруг обычного магнита, вокруг Земли существует *магнитное поле*. О его существовании люди знали давно; ведь оно с давних времен направляло стрелки компасов на судах. Вначале считали, что ось земного магнита совпадает с осью вращения Земли. В 1600 г. Уильям Гильберт установил отсутствие такого совпадения. Оказалось, что магнитные

полюсы Земли не совпадают с ее географическими полюсами.

Упрощенная картина силовых линий магнитного поля Земли (его называют *геомагнитным полем*) показана на рисунке 10.8,б; через  $S$  и  $Ю$  обозначены соответственно Северный и Южный географические полюсы. Видно, что магнитные полюсы не только не совпадают с соответствующими географическими полюсами, но, более того, северный полюс земного магнита находится в Южном, а южный полюс — в Северном полушарии.

Новейшие исследования геомагнитного поля показали, что оно имеет значительно более сложную структуру, чем та, которую мы видим на рисунке 10.8,б. Оказалось, что на геомагнитное поле существенно влияет *солнечный ветер*. Благодаря этому влиянию поле на дневной стороне земного шара сильно отличается от поля на ночной стороне. Действительная картина силовых линий геомагнитного поля показана на рисунке 10.8,в. Солнечный ветер как бы поджимает поле с дневной стороны, при этом на ночной стороне линии поля оказываются отброшенными далеко от Земли, образуя длинный «хвост». Если на



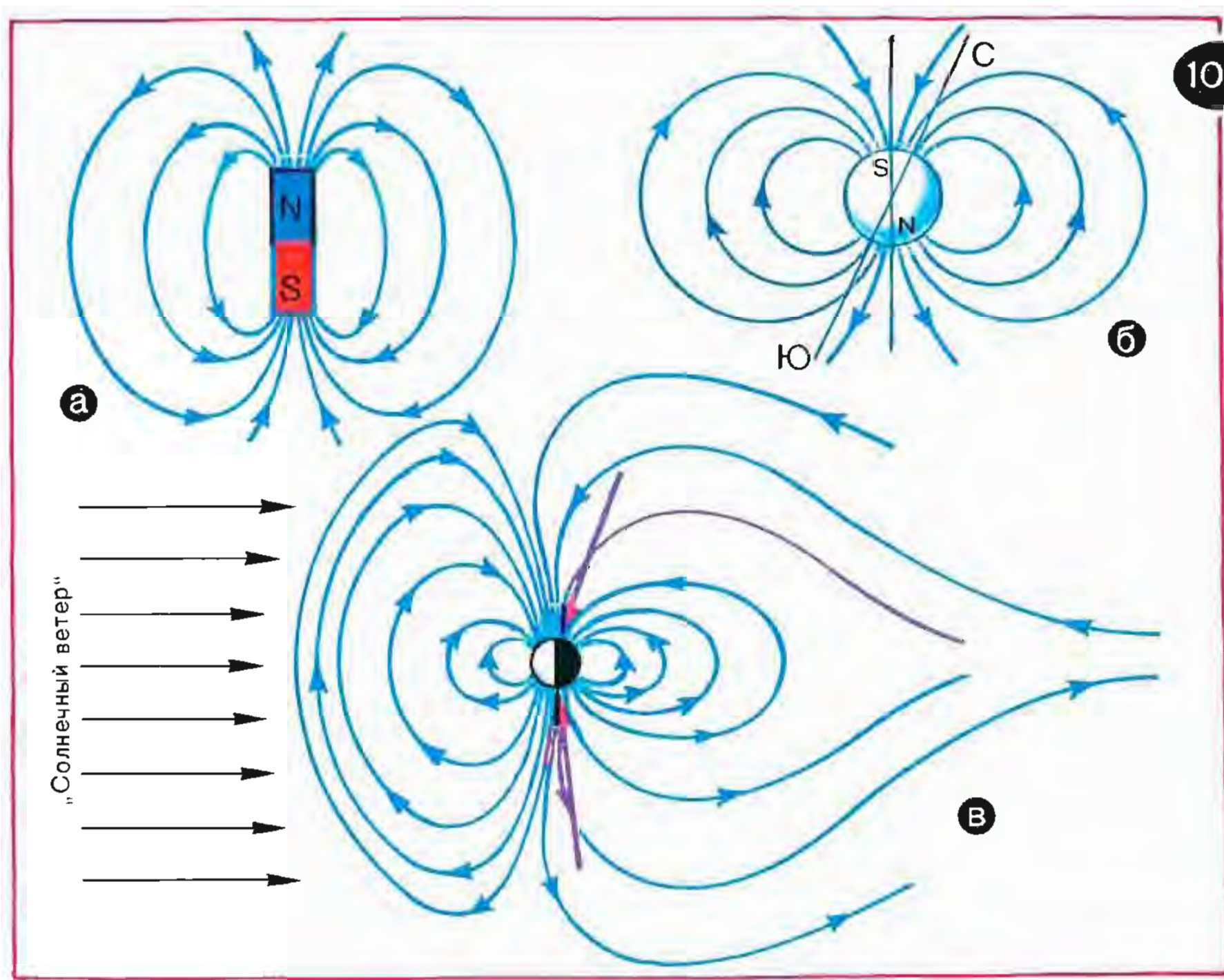
дневной стороне протяженность магнитного поля порядка десяти земных радиусов, то на ночной стороне магнитное поле обнаруживается (при помощи искусственных спутников Земли) на расстояниях в сотни земных радиусов.

Положение овальных зон полярных сияний показано на рисунке 10.8, в красными стрелками. Смещение зон в ночную сторону, безусловно, связано с различием структуры геомагнитного поля на дневной и ночной сторонах. Иными словами, оно обусловлено влиянием солнечного ветра на магнитное поле Земли.

Интересно заметить, что уже в прошлые века была подмечена

связь между магнитным полем Земли и полярными сияниями. Поморы, жившие на берегах северных морей, знали, что во время полярных сияний стрелка компаса начинает метаться. «На пазорях компас дурит», — говорили они.

**Люминесценция.** Почему светятся различные тела и среды? Причин тому немало. Во-первых, тела и среды могут светиться отраженным или рассеянным светом, как, например, луна или дневное небо. Во-вторых, они могут светиться собственным светом, испускаемым при достаточно высоких температурах (Солнце, пламя костра, рас-



10.8

каленная нить обычной электрической лампочки). В-третьих, возможно свечение собственным светом, не связанное с нагревом. Этот «холодный свет» называют люминесцентным. С явлением люминесценции мы встречаемся, когда наблюдаем свечение моря, когда смотрим на светящийся экран телевизора, когда пользуемся лампами дневного света. Свет полярных сияний — это тоже люминесценция.

Для люминесценции необходимо, чтобы предварительно в теле (среде) накопилась энергия; ее называют энергией возбуждения. Эта энергия затем высвечивается телом (средой) — возникает излучение люминесценции, люминесцентный свет. Высвечивание может происходить практически сразу же после получения телом энергии возбуждения — через время порядка всего  $10^{-8} \dots 10^{-6}$  с. В этом случае создается впечатление, что тело люминесцирует, пока оно получает энергию возбуждения; прекратилось возбуждение — и тут же прекратилось свечение. Такую люминесценцию называют флуоресценцией. В тех случаях, когда люминесценция наблюдается уже после прекращения возбуждения (тело может светиться в течение секунд, минут, даже часов), говорят о фосфоресценции. На экране телевизора мы наблюдаем флуоресценцию; светящийся циферблат часов, светящиеся дорожные указатели — примеры фосфоресцирующих тел.

Люминесценцию полярных сияний следует отнести к флуоресценции.

Способы возбуждения люминесцирующих тел разнообразны. В связи с этим выделяют разные виды люминесценции (как флуорес-

ценции, так и фосфоресценции). Укажем некоторые из них: фотолюминесценция (возбуждение производится светом, поглощаемым частицами тела), хемилюминесценция (возбуждение за счет энергии, выделяющейся при определенных химических реакциях), электролюминесценция (возбуждение энергией электрического поля, происходящее при возникновении электрических разрядов в газах), катодолюминесценция (возбуждение за счет энергии пучка электронов, бомбардирующих люминесцирующее вещество). С катодолюминесценцией все хорошо знакомы — это люминесценция экрана телевизионной трубки, бомбардируемого управляемым пучком электронов, который сканирует по поверхности экрана. Люминесценция (точнее говоря, флуоресценция) полярных сияний — это тоже катодолюминесценция. Она вызывается потоками электронов, которые вторгаются в земную атмосферу. Люминесцирующим «экраном» является в данном случае сама атмосфера, или, правильнее сказать, атомы, молекулы, ионы атмосферы.

Физика люминесценции стала понятной лишь в нашем столетии — когда была создана квантовая физика, объяснившая свойства, поведение, взаимодействия микрочастиц (атомов, молекул, ионов). Было установлено, что энергия микрочастицы квантуется: принимает лишь некоторые определенные значения. Набор этих значений энергии различен для разных видов микрочастиц (для разных атомов, молекул, ионов). С этими значениями сопоставляют так называемые энергетические уровни. В обычном состоянии микрочастица находится на самом



нижнем уровне, ее энергия минимальна. Возбуждение переводит микрочастицу скачком на один из более высоких ее уровней, с которого она затем скачком или несколькими скачками (через промежуточные уровни) возвращается назад. Скачки вниз сопровождаются во многих случаях испусканием квантов света (фотонов), которые и составляют люминесцентное излучение.

Если скачок (его называют *квантовым переходом*) происходит с уровня, имеющего энергию  $E_2$ , на уровень с энергией  $E_1$  ( $E_2 > E_1$ ), испускается фотон с энергией  $\varepsilon = E_2 - E_1$ . Частота света, состоящего из таких фотонов, есть

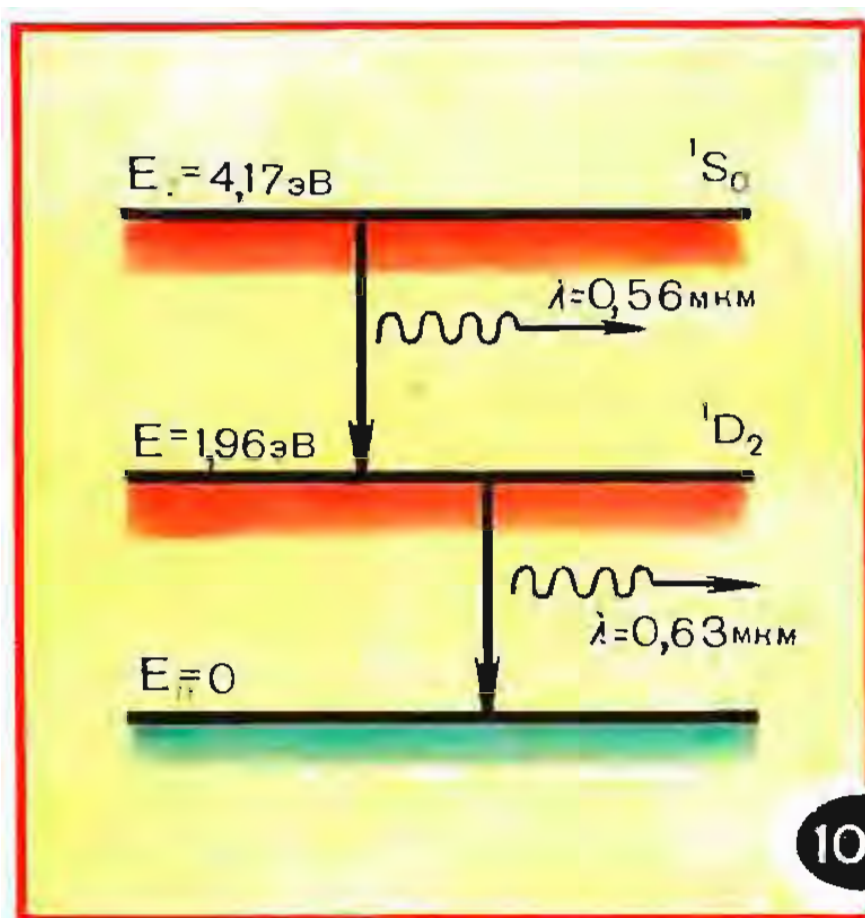
$$\nu = \varepsilon/h = (E_2 - E_1)/h, \quad (10.9)$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Длина волны такого света

$$\lambda = c/\nu = hc/(E_2 - E_1) \quad (10.10)$$

( $c$  — скорость света в вакууме). Подчеркнем, что частота (длина волны) люминесцентного излучения определяется *структурой энергетических уровней* частиц данного люминесцирующего вещества.

В качестве примера рассмотрим имеющиеся в верхних слоях земной атмосферы атомы кислорода, которые могут быть возбуждены в результате бомбардировки их электронами солнечного ветра. Эти атомы затем люминесцируют (высвечиваются) при переходах с уровня  $^1S_0$  на уровень  $^1D_2$  и с последнего уровня на основной (рис. 10.9) (смысл обозначений уровней пояснить здесь не будем). Энергия уровня  $^1S_0$  составляет 4,17 эВ, а уровня  $^1D_2$  1,96 эВ. При первом переходе испускается из-



10.9

лучение с длиной волны 0,56 мкм (зеленый свет), а при втором — 0,63 мкм (красный свет).

Убедимся в этом, проделав несложные вычисления. Надо найти длину волны излучения при переходах  $E_2 \rightarrow E_1$  и  $E_1 \rightarrow E_0$ , если энергии  $E_2$  и  $E_1$  равны соответственно 4,17 эВ и 1,96 эВ (относительно  $E_0$ ).

Для этого воспользуемся формулой (10.10). Величина  $hc$  в этой формуле равна  $1,98 \cdot 10^{-25}$  Дж·м. Для первого перехода:  $E_2 - E_1 = (4,17 - 1,96) \text{ эВ} = 2,21 \text{ эВ}$ . Так как  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж, то, следовательно,  $E_2 - E_1 = 3,54 \cdot 10^{-19}$  Дж. В результате находим:  $\lambda_1 = 1,98 \cdot 10^{-25} \text{ Дж} \cdot \text{м} / 3,54 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,56 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,56 \text{ мкм}$ . Для второго перехода:  $E_1 - E_0 = 1,96 \text{ эВ} = 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ; отсюда  $\lambda_2 = 1,98 \cdot 10^{-25} \text{ Дж} \cdot \text{м} / 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,63 \text{ мкм}$ .

**Электронные полярные сияния.** Различают два типа полярных сияний — вызываемые потоками космических электронов (*электронные сияния*) и вызываемые потоками протонов (*протонные сияния*). Сразу же отметим, что главную роль играют электронные

сияния; вклад же протонных сияний в свечение неба относительно невелик. Все формы сияний, имеющие достаточно четко выраженную структуру (дуги, лучистые полосы, ленты), обусловлены электронами. Фактически лишь диффузные пятна могут быть обязаны своим происхождением протонам. Ниже мы еще вернемся к этому вопросу.

Как возникают электронные полярные сияния? Упрощенно это можно представить себе следующим образом. Приносимый солнечным ветром поток электронов, достигая Земли, начинает взаимодействовать с ее магнитным полем. Электроны захватываются геомагнитным полем и далее движутся по спиральным траекториям вокруг силовых линий поля. Линии, постепенно «сгущаясь», подходят к земной поверхности в приполярных областях (напомним рисунок 10.8,в). Туда-то и устремляются закручивающиеся вокруг силовых линий электроны. Но достигнуть поверхности Земли они все же не могут. Ведь по мере перемещения вдоль линии поля и приближения к земной поверхности электрон попадает в области все более сильного поля. Как мы уже знаем, *неоднородное магнитное поле стремится вытолкнуть заряженную частицу в направлении, в котором оно ослабевает*. Значит, на опускающийся в земной атмосфере электрон будет действовать со стороны геомагнитного поля сила, стремящаяся отбросить его назад — в верхние слои атмосферы. В результате, опустившись до высоты порядка 100 км, электроны как бы «отражаются» геомагнитным полем назад; вдоль тех же самых силовых линий они *возвращаются* в верх-

ние слои атмосферы — с тем, чтобы, следуя этим линиям, начать опускаться к земной поверхности теперь уже в другом полушарии. Вплоть до нового «отражения» назад.

Сказанное поясняет рисунок 10.10,а, где схематически, без наблюдения масштаба, изображена траектория одного из электронов. Красным цветом показана траектория электрона, когда он приближается к земной поверхности в районе Северного полюса, а зеленым — когда он движется назад — от Северного полюса к Южному.

Любуясь лучистой полосой полярного сияния, мы обычно не задумываемся над тем, что каждый светящийся луч — это светящийся след, оставленный лавиной электронов, спустившихся вдоль силовых линий магнитного поля Земли до высоты примерно 100 км (рис. 10.10,б). Иными словами, вертикальные лучи, равно как вертикальные светящиеся нити лент, — все это своеобразная «фотография» силовых линий геомагнитного поля.

Оговоримся, что описанная картина движения электронов, захваченных магнитным полем Земли, верна лишь в общих чертах. На самом деле все оказывается более сложным. Электроны не просто захватываются и направляются полем Земли. Они еще и *ускоряются* в нем. Это означает, что на электроны в геомагнитном поле действуют не только магнитные, но и электрические силы. Оказывается, что при этом существенную роль играет хвост геомагнитного поля, образующийся на ночной стороне земного шара; именно благодаря ему электроны ускоряются и собираются в ленто-

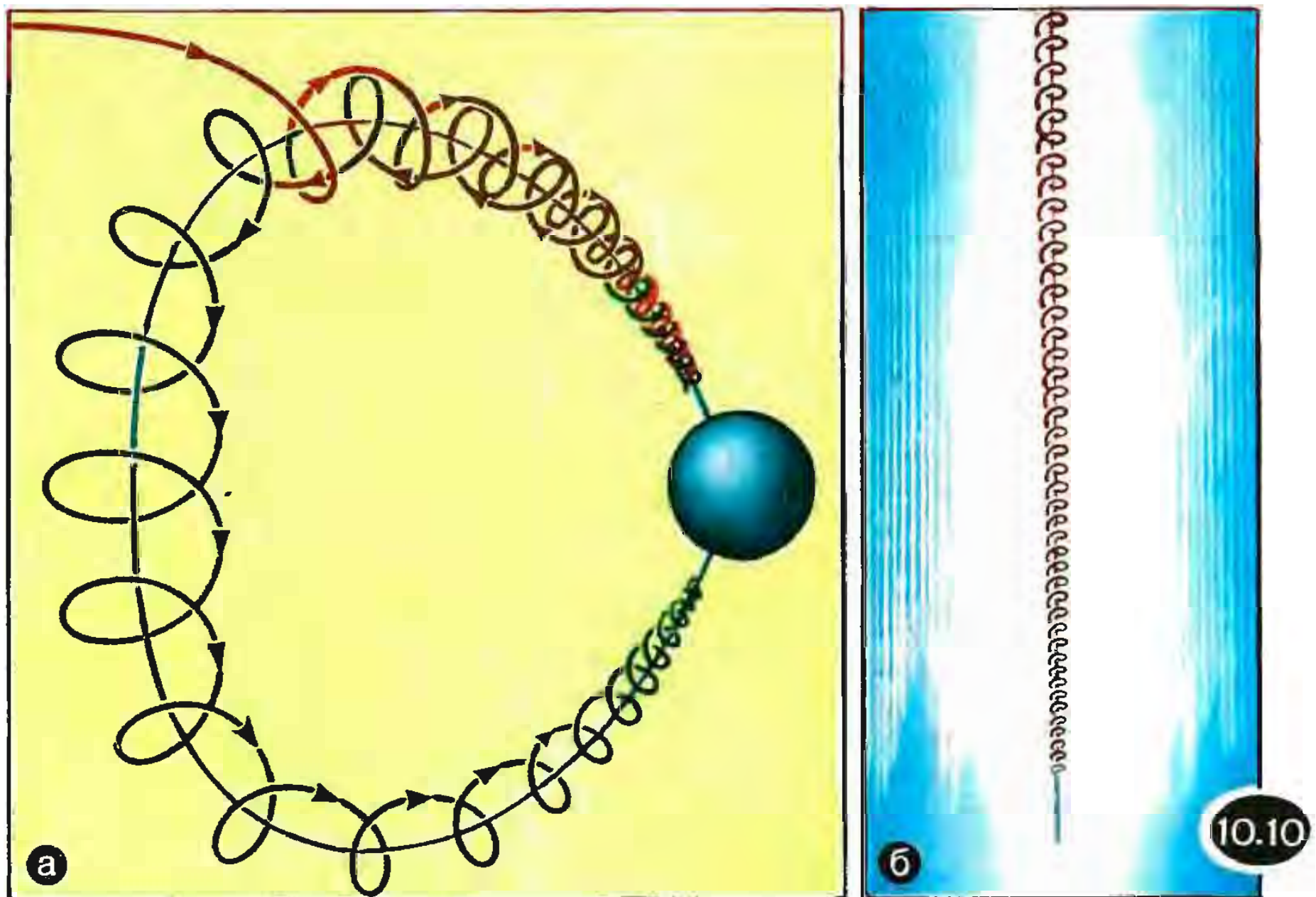


образную структуру пучков. Правда, до сих пор непонятно, каким образом все это происходит.

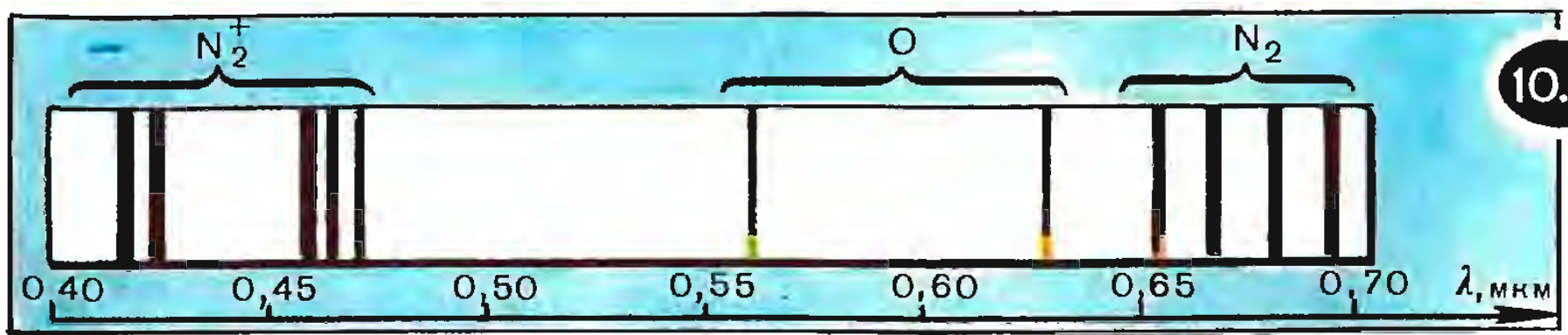
Кроме того, при рассмотрении движения электронов в геомагнитном поле мы не принимали во внимание их столкновения с атомами и молекулами атмосферы. Конечно, на высотах выше 100 км атмосфера сильно разрежена, так что с точки зрения влияния на движение электрона столкновения несущественны и ими можно пренебречь. Однако столкновения все же происходят. Более того, они принципиально важны, так как именно благодаря им возбуждаются и ионизируются атомы и молекулы атмосферы, в результате чего и возникает свечение полярного сияния.

Основную роль в возникновении наблюдаемого свечения по-

лярных сияний играют столкновения космических электронов с атомами и молекулами кислорода и азота. В результате этих столкновений атомы и молекулы возбуждаются или ионизируются. В первом случае происходит изменение электронной оболочки микрочастицы, связанное с переходом ее в возбужденное состояние. Во втором случае частично разрушается электронная оболочка; микрочастица теряет электрон и превращается в атомарный или молекулярный ион. Возбужденная микрочастица возвращается вскоре в основное состояние; ион рекомбинирует со свободным электроном. В обоих случаях возможно испускание фотона люминесцентного излучения, уносящего энергию возбуждения. Это люминесцентное излучение мы и наблюда-







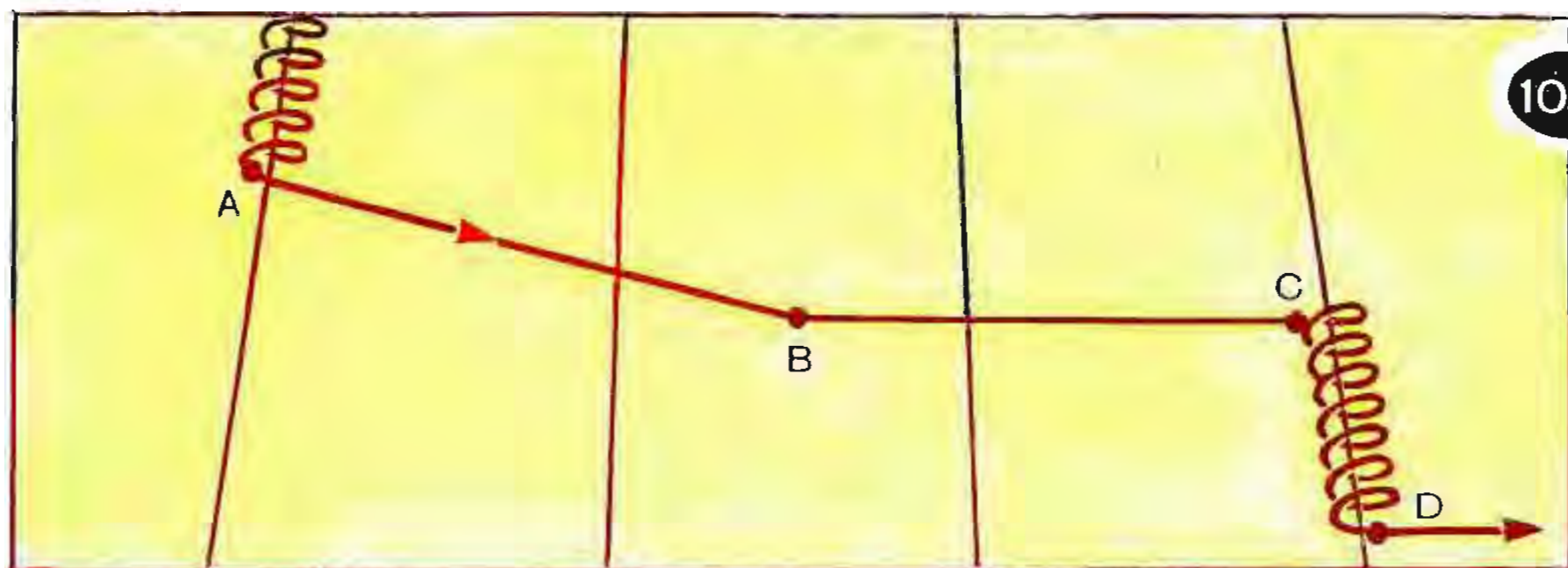
даем, когда любуемся полярным сиянием.

На рисунке 10.11 представлен спектр полярного сияния. Ионизованные молекулы азота при рекомбинации высвечивают синие и фиолетовые полосы спектра, а возбужденные молекулы азота высвечиваются красным светом. Возбужденные атомы кислорода высвечивают зеленую ( $\lambda=0,56$  мкм) и красную (0,63 мкм) линии. Особенно интенсивными оказываются синие линии азота и зеленая линия кислорода, вследствие чего полярные сияния окрашиваются преимущественно в сине-зеленые тона.

Интересно рассмотреть, почему, например, красная линия в спектре кислорода оказывается значительно слабее зеленой линии. На рисунке 10.9 были изображены квантовые переходы, соответствующие этим спектральным линиям. Все дело в величине времени жизни атома кислорода на уровнях  $^1S_0$  и  $^1D_2$ , т. е. в том времени, какое проходит с момента попадания атома на рассматриваемый уровень до момента его ухода с него (имеется в виду уход, связанный с самопроизвольным, иначе говоря, спонтанным, возвращением атома в основное состояние). Заметим, что время жизни атома в том или ином состоянии не надо понимать буквально. Один атом «проживет» в данном состоянии дольше, дру-

гой меньше; время жизни — это усредненная величина, получаемая при рассмотрении большого числа одинаковых атомов. Так вот, уровни  $^1S_0$  и  $^1D_2$  атома кислорода имеют существенно разные времена жизни: 0,7 с для уровня  $^1S_0$  и 100 с для  $^1D_2$ . Получается, что, оказавшись на уровне  $^1D_2$ , атом кислорода долго «живет» на нем, «не решаясь» сделать еще один скачок вниз. Пока атом «раздумывает», на него может налететь другой атом или свободный электрон; это столкновение может вынудить наш атом перескочить на основной уровень, передав избыток энергии частице, столкнувшейся с ним. В итоге испускание фотона с  $\lambda=0,63$  мкм в данном случае не состоится. Практически все атомы кислорода переходят с уровня  $^1S_0$  на  $^1D_2$ , испуская фотон; в то же время лишь сравнительно немногие атомы испускают фотон, переходя с  $^1D_2$  на основной уровень. Находящиеся на уровне  $^1D_2$  атомы попросту не успевают высветиться — столкновения с другими частицами вынуждают их перейти на основной уровень без испускания фотона. Вот почему излучение с  $\lambda=0,56$  мкм оказывается существенно интенсивнее, чем излучение с  $\lambda=0,63$  мкм.

Сегодня многое понятно в физике полярных сияний. Как мы убедились, нетрудно объяснить (хотя бы в общих чертах) форму, высоту и спектр сияний. Изменчи-



вость сияния тоже вполне понятна — она объясняется изменениями (возмущениями) магнитного поля Земли под воздействием солнечного ветра. В то же время остается еще немало загадок, связанных с сияниями. Как уже отмечалось, неясно, как именно хвост магнитосферы ускоряет и фокусирует электроны. Непонятно, почему зона сияний имеет форму овала. Неясно также происхождение шелеста и треска, которые иногда сопровождают полярное сияние.

**Протонные полярные сияния.** Ранее мы говорили, что, в отличие от электронных, протонные сияния не характеризуются четкой структурой — они размыты, имеют вид бесформенных светящихся пятен.

Попробуем разобраться, с чем это связано.

Когда протоны, принесенные солнечным ветром, попадают в магнитное поле Земли, они, подобно электронам, начинают двигаться по спиральным траекториям вокруг силовых линий поля. Однако гирорадиус протона при тех же значениях энергии и pitch-угла, что и у электрона, будет

существенно больше электронного — в 40...50 раз (напомним задачу, рассматривавшуюся выше). Уже поэтому протонные траектории оказываются менее «привязанными» к силовым линиям магнитного поля, чем электронные. Но дело не только в этом. Более существенно то, что во время своего движения в земной атмосфере протон может захватить свободный электрон и тем самым превратиться в атом водорода. В результате такого превращения возникает частица, которая уже не подчиняется действию магнитного поля (в силу того, что она электрически нейтральна). Образовавшийся атом водорода по прямой удаляется в сторону от «своей» силовой линии до тех пор, пока новое столкновение не приведет к потере электрона (ионизации), после чего он, теперь уже в качестве протона, будет закручиваться вокруг новой силовой линии. Сказанное поясняет рисунок 10.12: в точке *A* на рисунке протон захватил электрон и превратился в атом водорода; в точке *B* атом водорода испытал столкновение с другим атомом (которое, однако, не привело к потере электрона нашим атомом); в точке *C* атом водорода в результате

очередного столкновения потерял электрон и превратился в протон. Пролетая через атмосферу Земли, протон может несколько раз пройти через последовательные этапы захвата и потери электрона. В результате он может значительно удалиться от первоначальной силовой линии. Именно поэтому протонные сияния оказываются пространственно нечеткими, сильно размытыми (диффузные пятна).

Когда протон захватывает электрон, он превращается в атом водорода, находящийся, как правило, в одном из возбужденных состояний. Кроме того, возможно возбуждение атома водорода в результате столкновения (например, при столкновении в точке *B* на рисунке 10.12). Переходя затем в основное состояние, атом водорода испускает фотон с длиной волны, соответствующей одной из линий спектра атома водорода. Наиболее яркой оказывается спектральная линия с  $\lambda=0,66$  мкм (красный цвет). Вот почему протонные диффузные пятна окрашены преимущественно в красноватые тона.

**Магнитные бури.** У М. А. Дудина есть прекрасное стихотворение, посвященное полярному сиянию:

Ах, как играет этот Север!  
Ах, как пылает надо мной  
Разнообразных радуг веер  
В его короне ледяной!  
Ему, наверно, по натуре  
Холодной страсти красота,  
Усилием магнитной бури  
Преображенная в цвета...

В стихотворении упоминается *магнитная буря*. Что это такое? Очень подробное и выразительное

описание магнитной бури, наблюдавшейся в Арктике в самом конце 1894 г., можно найти в дневнике Ф. Нансена: «После полудня было редкостное северное сияние. Когда я вышел в шесть часов, яркая дуга перекинута была над южным краем неба. Долгое время она оставалась спокойной, почти не изменяясь. Затем началось сильное свечение у ее верхнего края за черным гребнем горы; с минуту продолжалось пылание; затем вдруг свечение распространилось вдоль дуги на запад, к зениту ото всей ленты метнулись лучи и, не успев я опомниться, как вся южная часть неба, от дуги до зенита, оказалась объята светлым пламенем. Оно сверкало и горело, кружилось, словно в вихре ветра, лучи летали взад и вперед, то красные и красно-фиолетовые, то желтые, зеленые и ослепительно белые; то у основания лучи были красные, а наверху желтые и зеленые, то наоборот. Выше и выше поднималось пламя; вот оно достигло и северной стороны зенита — на мгновение в нем образовалась великолепная корона; потом всё обратилось в одну крутящуюся огненную массу. Это был точно водоворот огня, красного, желтого и зеленого — глаз ослепляло это зрелище...»

Мы уже отмечали изменчивость и подвижность картины полярного сияния. Но особенно изменчиво и подвижно сияние во время магнитной бури. Такое сияние отличается исключительной динамичностью, яркостью, масштабностью. Всё это можно видеть из приведенных выше записей в дневнике Нансена.

Если бы мы могли наблюдать магнитную бурю из космоса, то



увидели бы существенное расширение светящегося овала авроральной зоны. Расширение овала происходит как в сторону полюса, так и в направлении к экватору. Во время сильных магнитных бурь полярными сияниями могут любоваться даже жители Средиземноморья и Северной Африки.

Чем же вызывается магнитная буря? Прежде чем ответить на этот вопрос, напомним, что мы (наша планета Земля) удалены от Солнца на расстояние, равное всего ста диаметрам Солнца. С точки зрения масштабов солнечной системы это совсем немного. Можно сказать, что Земля непосредственно контактирует с веществом Солнца. Расширяясь в пространстве, это вещество (потoki электронов и протонов) порождает солнечный ветер, обдувающий нашу планету и обжимающий ее магнитосферу (ее магнитное поле). Известно, что состояние атмосферы Солнца все время меняется: происходят вспышки, появляются, перемещаются и исчезают пятна.

В этом проявляется солнечная активность. Временами солнечная активность резко усиливается. Так было, например, в 1972 г. В августе этого года на Солнце произошла мощнейшая вспышка, за которой последовала целая серия сильных вспышек. Они привели к резкому увеличению плотности и скорости солнечного ветра, воздействующего на магнитосферу Земли. В результате магнитосфера претерпела существенные возмущения, начался период сильных магнитных бурь на Земле.

Интерес к магнитным бурям необычайно вырос в последние десятилетия. Ученые приходят к убеждению, что вызываемые солнечной активностью сильные возмущения магнитного поля Земли влияют не только на полярные сияния, но (что гораздо важнее) и на состояние земной атмосферы. В частности, высказывается мнение, что именно возмущения магнитного поля Земли являются причиной зарождения мощных циклонов.

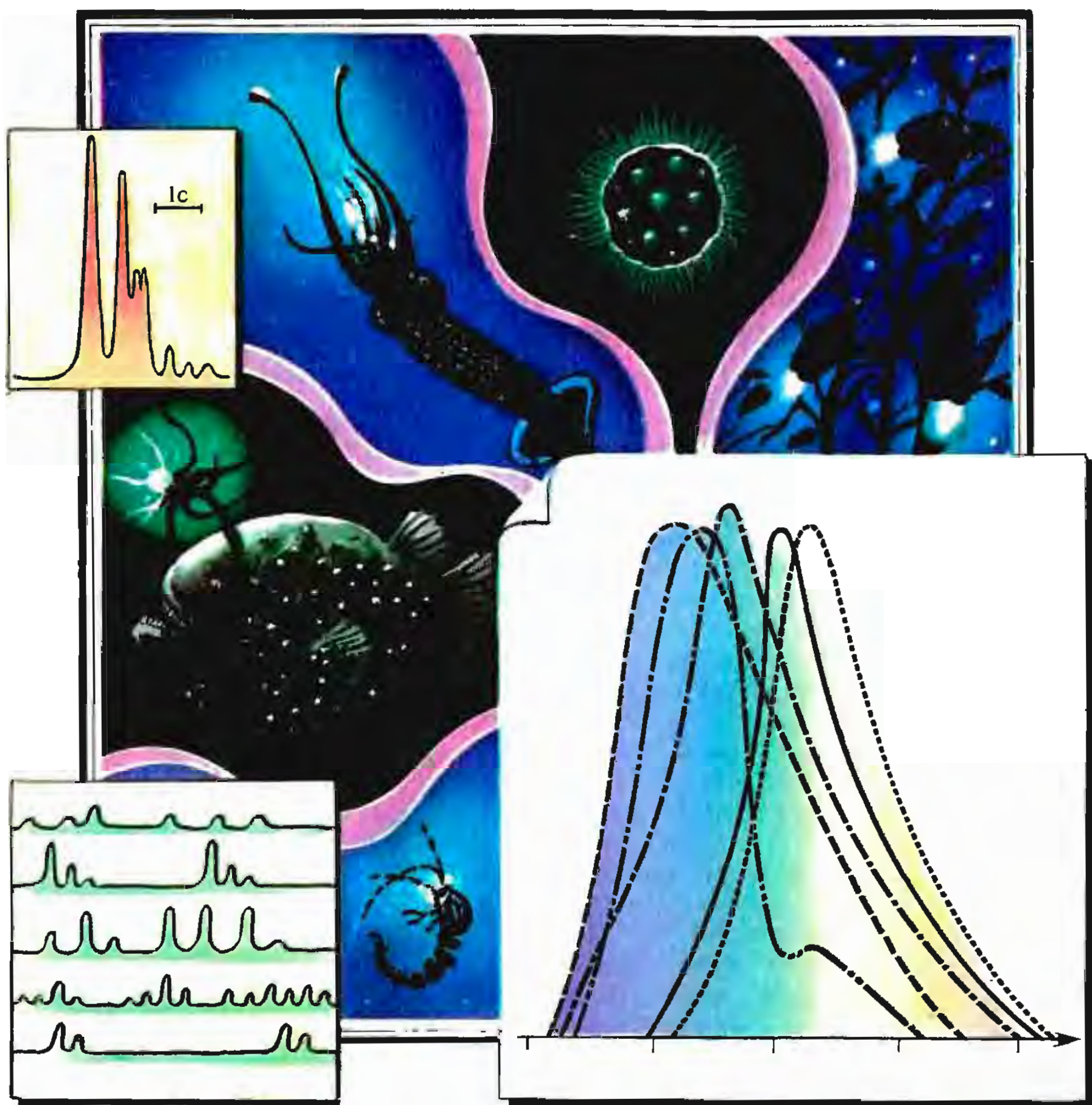
Глава

# 11

## ЖИВОЙ СВЕТ

Ночь была бы темна,  
Но все море насыщено тонкою  
Пылью света...

*И. А. Бунин*



У Ханса Кристиана Андерсена есть сказка «Старый уличный фонарь». Старый фонарь много лет честно служил людям, и вот теперь его решено отправить на покой. Сегодня у него последний вечер, поэтому он вспоминает всю свою жизнь. А рядом, на мостике через водосточную канаву, стоят три кандидата на освобождающееся место. Правильнее сказать, это они сами считают себя кандидатами. Вот как описывает их Андерсен: «Одним из кандидатов была селедочная головка, светящаяся в темноте; она полагала, что ее появление на фонарном столбе значительно сократит расход ворвани. Вторым была гнилушка, которая тоже светилась и, по ее словам, даже ярче, чем «вяленая треска»; к тому же она считала себя последним остатком дерева, которое некогда было красой всего леса. Третьим кандидатом был светлячок; откуда он взялся — фонарь никак не мог догадаться, но светлячок был тут и тоже светился, хотя гнилушка и селедочная головка клялись в один голос, что он светит только временами, а потому его не следует принимать во внимание».

Итак, селедочная головка, гнилушка, светлячок. Можно подивиться столь удачному выбору писателя — ведь все три кандидата на место уличного фонаря являются в известном смысле «родственниками»: все они светят «живым светом» или, правильнее сказать, светом, который испускают живые организмы. Светлячок — одна из разновидностей жуков. Свечение гнилушки — это свечение некоторых видов грибов, растущих на пнях и старых деревьях. Что же касается селедочной головки, то здесь мы имеем дело с колониями

светящихся бактерий, развивающихся на гниющей рыбе. Еще Аристотель обратил внимание на то, что гниющая рыба может светиться.

Таинственно мерцающие в ночной тьме светляки не могли не действовать на воображение северных людей. Вполне понятно, что они вызывали у них мысли о «нечистой силе» — о леших, чертях, ведьмах и т. д. Все это хорошо нам знакомо по многим произведениям мировой литературы. В драме А. Н. Островского «Снегурочка» Мизгирь тщетно гонится за призраком полюбившейся ему Снегурочки. Подшучивая над страстью Мизгирия, леший заманивает его в лесную чащу при помощи светляков.

Безумец я, любовью опьяненный,  
Сухой пенек за милый образ принял,  
Холодный блеск зеленых светляков —  
За светлые Снегурочкины глазки.

К блуждающему огоньку обращается Мефистофель в «Фаусте» Гёте:

Я у блуждающего огонька  
Спрошу, как лучше нам пройти к вершине.  
В горах нет лучшего проводника.  
Вот сам он, кстати, легок на помине.  
Не откажи, чем даром тратить пламя,  
Нам посветить и вверх взобраться с нами.

Впрочем, не надо думать, что светляки непременно должны быть на службе у «нечистой силы». Для японской поэзии, например, характерно отнюдь не религиозное, а просто нежное, глубоко лирическое отношение к светлякам. Они воспринимаются как нечто призрачное, беспомощное, быстро угасающее. Японский поэт конца XVII в. Кёрай обращается к образу светлячка, чтобы выра-



зить тихую печаль в связи со смертью маленькой сестры:

Увы, в руке моей,  
Слабея неприметно,  
Погас мой светлячок...

В лесной чаще светляки светятся одинокими огоньками, которые действительно представляются беспомощными и слабыми. Иное дело — морская стихия. Здесь светящиеся организмы обычно образуют гигантские скопления. И уже совсем иное настроение возникает при виде картины полыхающего моря. Как писал Н. А. Заболоцкий,

Слова — как светляки с большими фонарями.

Пока рассеян ты и не всмотрелся в мрак,  
Ничтожно и темно их девственное пламя  
И неприметен их одушевленный прах.

Но ты взгляни на них весною в южном Сочи,  
Где олеандры спят в торжественном цвету,  
Где море светляков горит над бездной ночи  
И волны в берег бьют, рыдая на лету.

Зрелище светящегося моря похоже на световую феерию. Оно всегда поражает, вызывает восхищение, потрясает. Вот как описывает свечение моря К. Г. Паустовский: «Море горит! Я оглянулся. Все, что произошло дальше, я до сих пор не могу представить себе как действительность. Люди в таких случаях говорят, что действительность была похожа на сон, но это неверно. Она была лучше самого необыкновенного сна. Море горело. Казалось, его дно состояло из хрусталя, освещенного снизу лунным огнем. Свет разливался до горизонта, и там, где всегда сгущается тьма, небо сверкало, как бы затянутое серебряным туманом. Широкий свет медленно мерк. Но

после недолгой темноты море опять превращалось в незнакомое звездное небо, брошенное к нашим ногам. Мириады звезд, сотни Млечных Путей плавали под водой. Они то погружались, потухая, на самое дно, то разгорались, всплывая на поверхность воды. Глаз различал два света: неподвижный, медленно качавшийся в воде, и другой свет — весь в движении, рассекающий воду быстрыми фиолетовыми вспышками. Это металась под водой разбуженные рыбы. Белый огонь набегал на пляж, и было видно все дно».

Свое восхищение картиной светящегося моря писатель хочет передать читателям. При этом он не пытается проникнуть в глубь изображенной картины и осмыслить сущность наблюдаемого свечения. Проникновение в глубину явления мы находим в прекрасном стихотворении И. А. Бунина. Поэт видит за картиной свечения моря мириады светящихся существ. Для него светящаяся морская вода — поистине живая вода. Именно эта мысль особенно впечатляет поэта.

Набегает впотьмах  
И узорною пеною светится,  
И лазурным сиянием реет у скал на песке...  
О божественный отблеск незримого —  
жизни, мерцающей  
В мириадах незримых существ!  
...Фосфорясь,  
Загораясь мистическим пламенем,  
Рассыпаясь по гравию кипенью бледных  
огней,  
Море светит сквозь сумрак таинственно,  
Тонко и трепетно, озаряя песчаное дно.  
И тогда вся душа  
У меня загорается радостью.  
Я в пригоршни ловлю закипевшую пену  
волны —  
И сквозь пальцы течет не вода, а сапфиры —  
Несметные искры синего пламени, Жизнь!

**Свечение моря.** Существует много описаний свечения моря, основанных на личных наблюдениях этого впечатляющего природного явления. Большинство описаний принадлежит, естественно, мореплавателям. Они пишут о светящихся волнах, расходящихся от корабля, о млечной световой дорожке за кормой, о полыхающих глубинах. Иногда свечение охватывает огромные пространства; вокруг, куда достигает взор, видны светящиеся гребни волн, длинные светящиеся полосы, которые могут быть настолько яркими, что на низких облаках возникают отблески. Особенное впечатление производят наблюдаемые на морской поверхности быстро меняющиеся световые «фигуры», состоящие из ярких пятен, полос, кругов, завихрений.

Очень яркое свечение бывает при цунами — громадных волнах, обрушивающихся на побережье, когда под дном моря или в прибрежной полосе происходит землетрясение (подробнее о цунами см. в главе 15). Приближаясь к берегу, такие волны сначала вызывают сильный отлив — море вдруг отступает, иногда на километры. И вслед за этим вода возвращается в виде волны, высота которой может достигать десятков метров. Ее удар сметает все на своем пути; волна рушит дома, выбрасывает на берег суда, вырывает с корнем и переламывает толстые деревья. Перед самым приходом волны цунами наблюдается особенно сильное свечение моря. Обнажившееся во время кратковременного отлива морское дно полыхает ярким светом.

Отметим две важные особенности свечения моря. Во-первых, оно возникает не «само по себе»,

а как ответ на какие-либо воздействия возбуждающего характера. Возбуждающими факторами могут быть всевозможные волнения морской поверхности, прибой, прохождение судна, и уж тем более землетрясения и образование волн цунами. Даже за обычной лодкой может возникать светящийся след; при этом с весел падают «огненные» капли, от их ударов по воде расходятся светящиеся круги. Во-вторых, свечение моря отличается исключительным непостоянством. Оно может вспыхнуть ярко в одном месте, внезапно исчезнуть в другом; интенсивность его может быстро меняться во времени.

Море светится, как правило, зеленоватым и голубым светом. Реже наблюдается желто-зеленое и желтое свечение. Очень редко можно видеть свечение остальных цветов — фиолетового, оранжевого, красного.

**Светящиеся организмы.** Свечение моря — это всегда свечение живых организмов. Широко распространенные в прошлом представления, будто свечение моря вызывается растворенными в морской воде солями или окисляющимся фосфором, оказались глубоко неверными. С полным основанием можно называть рождающийся в море свет «живым светом».

В настоящее время известно более 800 видов светящихся морских организмов — от светящихся бактерий и одноклеточных жгутиконосцев до светящихся рачков и рыб. Среди «сухопутных» организмов светятся лишь некоторые виды насекомых (жуки из семейства светляков, личинки отдельных видов комаров), а также не-

многие виды грибов. Мы уже говорили, что именно грибы вызывают хорошо известное свечение гнилушек в лесу.

*Светящиеся бактерии* разделяют на две группы. К первой относятся бактерии, которые могут обитать свободно в морской воде. В 1 л морской воды содержится в среднем  $10^3 \dots 10^4$  таких бактерий. Они часто поселяются на мертвой рыбе, в результате гниющая рыба начинает светиться. Вторую группу светящихся бактерий составляют бактерии, являющиеся сожителями рыб и головоногих моллюсков. Световые органы некоторых рыб представляют собой специальные культиваторы для таких светящихся бактерий. Кровеносная система рыбы обеспечивает бактерии питательными веществами, доставляет им кислород, выводит продукты обмена. Когда кровеносные сосуды рыбы сжимаются, уменьшается приток крови, а вместе с тем и доступ кислорода к бактериям; в результате свечение бактерий ослабевает или даже прекращается. Расширение сосудов вызывает, напротив, вспышку свечения.

Было бы, однако, неправильно полагать, что свечение любых организмов связано со свечением живущих в них бактерий. Многие организмы излучают свет сами; они имеют для этого специальные органы (фотофоры), нередко весьма сложные.

В прибрежных зонах морей распространены светящиеся *одно-клеточные жгутиконосцы* — так называемые *ночесветки*. Отдыхающие на берегу Черного моря могут любоваться искрящимся свечением воды у берега, создаваемым *ночесветками*. На рисунке 11.1,а показана отдельная *ночесветка*

при большом увеличении; ниже изображена *ночесветка* в момент свечения. Сама *ночесветка* красного цвета; ее свечение имеет голубоватый цвет. Крупные *ночесветки* могут быть диаметром 1...2 мм; их хорошо видно невооруженным глазом. Внешне они напоминают мелкозернистую красную икру. И. А. Гончаров в романе «Фрегат «Паллада» так описывает встречу со скоплениями *ночесветок* у берегов Японии: «Множество красной икры, точно толченый кирпич, пятнами покрывает в разных местах море. Икра эта сияет по ночам нестерпимым фосфорическим блеском. Вчера свет был так силен, что из-под судна как будто вырывалось пламя; даже на парусах отражалось зарево; сзади кормы стелется широкая огненная улица...»

Светятся многие виды *медуз*. Среди них часто встречающаяся в морях и океанах *оранжевая медуза* — *пелагия*. Ее колокол имеет диаметр до 25 см, а длина щупалец достигает 2 м. Когда *медузу* раздражают, на поверхности ее купола и щупалец возникают светящиеся зеленые полосы.

Весьма эффектен также *светящийся рачок зуфаузида*. Он достигает в длину 3...5 см и дает очень сильный свет. Распределенные по телу *рачка* световые органы имеют сложное строение. Они могут поворачиваться, способны фокусировать излучение, изменять его интенсивность.

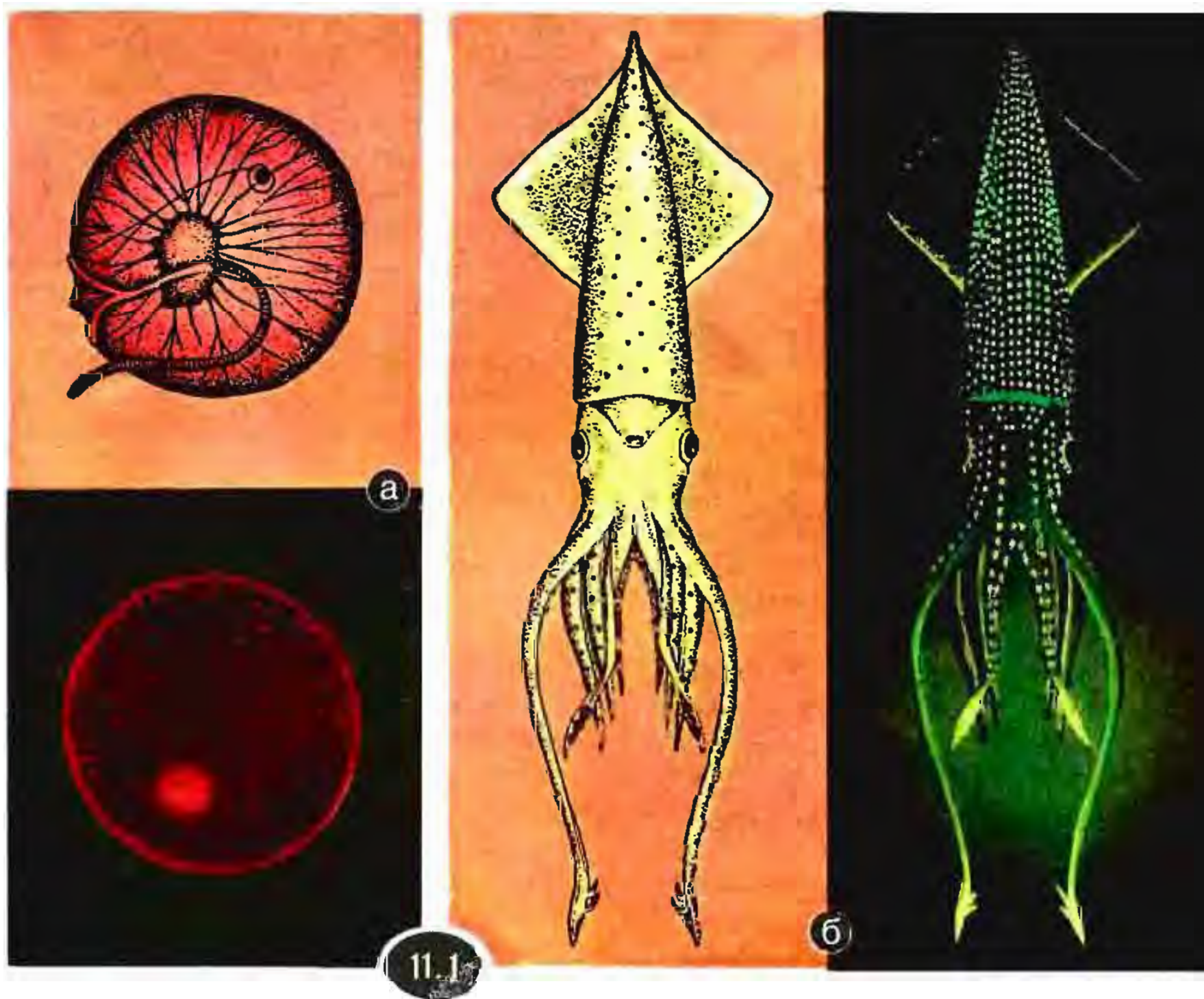
На рисунке 11.1, б показан *светящийся мелководный кальмар ватасения*, обитающий в Японском море. Хорошо видны многочисленные световые органы (фотофоры) *кальмара*. Особенно ярко светятся фотофоры на концах щупалец. На рисунке 11.2,а схе-



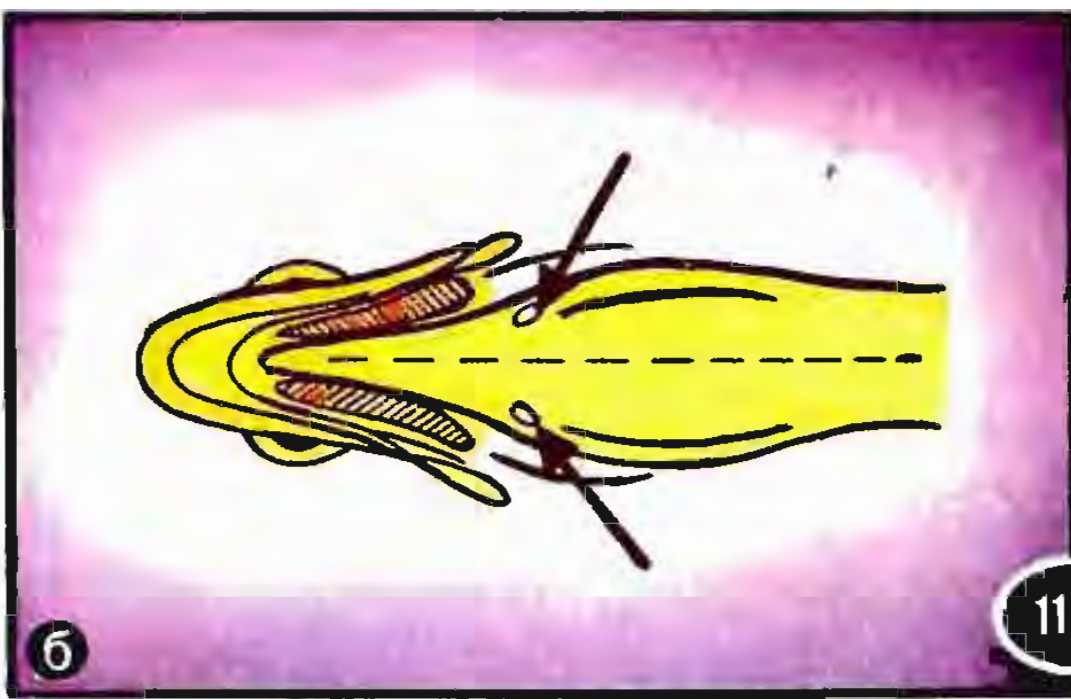
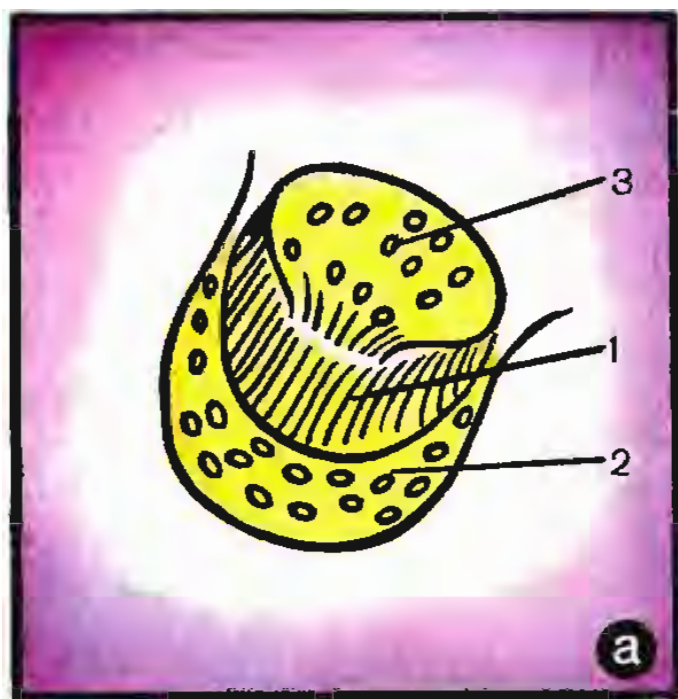
матически показана структура такого фотофора. Его основу составляет ткань из излучающих клеток 1. Излучение клеток отражается в нужном направлении специальным отражателем 2 и может фокусироваться линзой 3.

Свечение рыб бывает трех видов: *внеклеточное* (будучи раздражена, рыба выбрасывает облако светящейся слизи), *внутриклеточное* (создаваемое специальными световыми органами, содержащими излучающие клетки), *бактериальное* (создаваемое светящимися бактериями, живущими в определенных местах на теле рыбы). Фотофоры рыб с внутриклеточным свечением весьма разнообразны, часто имеют довольно

сложное строение. Они снабжены отражателями, линзами, диафрагмами, светофильтрами. Фотофоры могут устилать рядами тело рыбы снаружи, как, например, у некоторых видов акул (такие рыбы напоминают расцвеченные огнями туристические лайнеры), но могут находиться и внутри тела рыбы, как, например, у рыбы рабамии. У этой рыбы спрятанные внутри тела световые органы представляют собой специальные выросты кишечника. Излучение, испускаемое световыми органами рабамии, выходит наружу через две полупрозрачные линзы на брюшной стороне тела рыбы; на рисунке 11.2,б стрелками помечены упомянутые линзы.







11.2

В заключение вернемся к светящимся бактериям и рассмотрим следующую задачу. В верхнем слое морской воды толщиной 100 м концентрация светящихся бактерий достигает  $5 \cdot 10^4$  1/л. Каждая бактерия испускает каждую секунду  $10^4$  фотонов; длина волны испускаемого света 0,5 мкм. Какова суммарная световая мощность, испускаемая бактериями, находящимися в слое воды, имеющем площадь  $1 \text{ км}^2$  и толщину 100 м?

Рассматриваемый объем воды равен  $10^8 \text{ м}^3$  или, иначе,  $10^{11}$  л. Значит, полное число высвечивающихся бактерий составляет  $5 \cdot 10^{15}$ . Эти бактерии испускают каждую секунду  $5 \cdot 10^{15} \cdot 10^4 = 5 \cdot 10^{19}$  фотонов. Энергию каждого фотона  $\epsilon$  определяем по формуле

$$\epsilon = hc/\lambda,$$

где  $\lambda = 0,5 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ,  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  (постоянная Планка),  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  (скорость света в вакууме). Легко подсчитать, что  $\epsilon = 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Умножив эту величину на число фотонов, испускаемых всеми бактериями в секунду (напомним, что оно равно  $5 \cdot 10^{19}$ ), находим искомую световую мощность; она составляет 20 Вт.

**Особенности свечения живых организмов.** Еще в XVII в. Р. Бойль установил, что свечение гниющей древесины прекращается без воз-

духа и снова возобновляется в воздушной среде. Отсюда следовало, что свечение возникает в результате химической реакции с участием воздуха. Впоследствии установили, что в данной реакции участвует кислород — это есть реакция окисления.

Существенно, что свечение организмов возникает лишь при наличии определенного внешнего раздражения и является своеобразным откликом на него. Характер раздражения может быть различным. Высокоорганизованные организмы, снабженные фотофорами, можно раздражать светом; они отвечают световым откликом на световые сигналы особей того же вида. Раздражители могут быть химическими, механическими, тепловыми, электрическими. Например, ночесветки и мелкие рачки откликаются световыми импульсами на любое механическое раздражение — малейшее волнение водной массы, ее незначительные перемешивания и т. д. Существуют организмы, не реагирующие ни на механические, ни на электрические раздражители, но вспыхивающие при добавлении в морскую воду пресной воды.



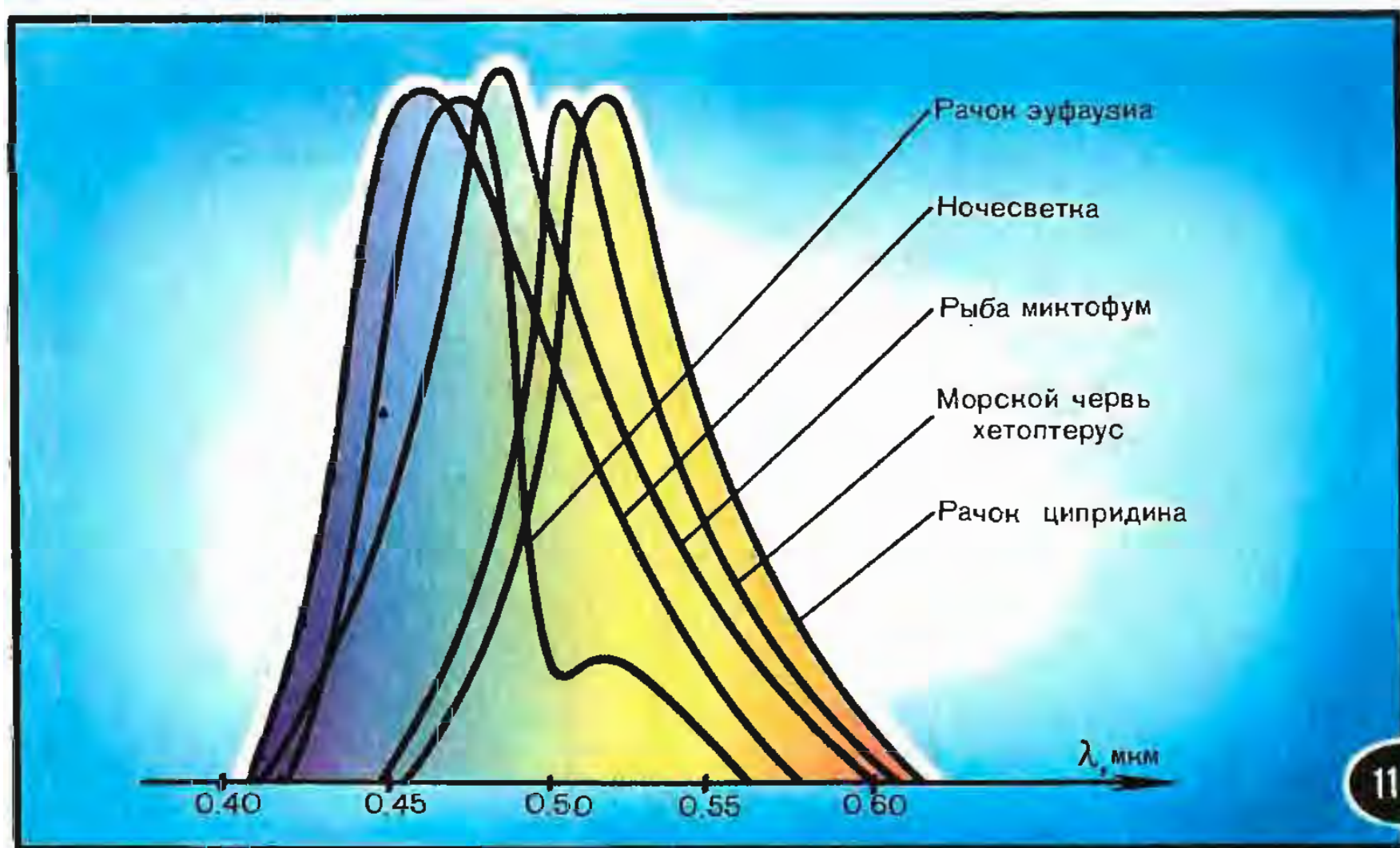
Вспомним сказку Андерсена о старом уличном фонаре, а точнее говоря, замечания селедочной головки и гнилушки о том, что светлячок светится не постоянно, а лишь временами. Замечание справедливое. Однако и селедочная головка хорошо светится не все время, а лишь в определенных условиях. Ведь интенсивность высвечивания бактерий зависит от разных факторов, и в частности от температуры среды.

Свечение живых организмов — холодное свечение. Будучи раздражены, они выделяют энергию исключительно в виде света, *ни сколько не нагреваясь*. Практически вся выделяемая ими световая энергия попадает в область видимого света, а точнее, в интервал длин волн от 0,4 до 0,6 мкм; максимум излучения соответствует синей и зеленой частям спектра. Это хорошо видно на рисунке 11.3, где для различных светящихся организмов приведена зависи-

мость интенсивности излучения от длины волны. Вспомним в связи с этим «холодный свет зеленых светляков».

Светящиеся организмы оказываются очень *рациональными* излучателями. Во-первых, они совсем не расходуют энергию на невидимое, и в частности тепловое, излучение. Для сравнения заметим, что даже самые совершенные лампы дневного света примерно половину энергии излучают в инфракрасной области. Во-вторых, максимум интенсивности излучения морских организмов приходится на область спектра, для которой морская вода наиболее прозрачна (сине-зеленая область), поэтому световые сигналы организмов распространяются в воде с наименьшими потерями.

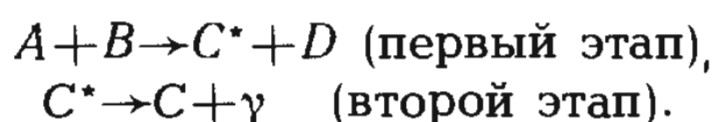
Исследования последних лет показали, что организмы испускают не непрерывное излучение, а *световые импульсы*. В качестве примера можно привести световые





импульсы ночесветки, которые она испускает при химическом раздражении. Импульсы показаны вверху в левой части с.165. Общая длительность этих импульсов составляет примерно 2 с. Ниже приведены группы световых импульсов светляков; каждая группа импульсов относится к светлякам определенного вида. Любопытно, что различные виды светляков «говорят» на разных световых языках.

**Хемилюминесценция.** В предыдущей главе, рассказывая о люминесценции, мы отмечали несколько различных ее видов. В частности, мы упоминали о хемилюминесценции — люминесценции за счет энергии, выделяющейся при некоторых химических реакциях. Хемилюминесцентный процесс можно разделить на два этапа, которые представим следующим образом:



На первом этапе исходные молекулы  $A$  и  $B$  вступают в химическую реакцию; в результате образуется возбужденная молекула  $C^*$ . На втором этапе молекула переходит из возбужденного состояния в основное, испуская фотон  $\gamma$ .

С точки зрения физики, свечение живых организмов — особый вид хемилюминесценции. Для него существует специальный термин — биолюминесценция.

**Биолюминесценция как особый вид хемилюминесценции.** Светящиеся бактерии, светляки, светящиеся органы рачков, моллюсков,

рыб содержат особые молекулы-излучатели, высвечивающиеся в сине-зеленой области. Для высвечивания необходимо, чтобы молекула-излучатель предварительно возбудилась, для чего она должна вступить в реакцию с кислородом. Таким образом, первый этап биолюминесцентного процесса — реакция окисления, в которой участвуют специальные молекулы-излучатели. Именно реакция окисления поставляет ту энергию, которая затем превратится в световую энергию. Такова энергетическая основа биолюминесценции.

Существенно, что реакция окисления происходит лишь в присутствии некоторого вещества, вырабатываемого организмом. Это вещество называют в общем случае люциферазой; оно играет роль фермента. Сама люцифераза в реакции не участвует, однако ее присутствие имеет решающее значение. Появилась люцифераза — реакция окисления идет, молекулы-излучатели высвечиваются. Исчезла люцифераза — реакция окисления, а вместе с тем и высвечивание молекул-излучателей прекращается.

Итак, биолюминесцентный процесс можно представить себе следующим образом. В ответ на внешнее раздражение организм вырабатывает люциферазу. В присутствии люциферазы начинается окисление молекул-излучателей, в результате чего они переходят в возбужденные состояния. Возбужденные молекулы-излучатели возвращаются в исходное состояние, высвечивая фотоны синей или зеленой области спектра.

Механизм биолюминесценции таит в себе еще много загадок. Разгадать их важно не только для того, чтобы лучше понимать био-

люминесценцию, но и для того, чтобы научиться искусственно воспроизводить биолюминесцентные процессы и тем самым осуществлять управляемое высокоэффективное преобразование химической энергии в световую. Это задача будущего, ее огромная практическая важность очевидна. Для решения данной задачи необходимо прежде всего расшифровать физико-химический механизм работы люциферазы.

**Зачем они светятся?** Даже у самых простых светящихся организмов (бактерий и жгутиконосцев) свечение является довольно сложным процессом — оно связано с выработкой специального фермента (люциферазы) при наличии внешнего возбуждения. Еще более сложен этот процесс у высокоорганизованных живых существ — рачков, головоногих моллюсков, рыб и др.; недаром у них имеются специальные светящиеся органы или специальные устройства для культивирования светящихся бактерий. Все это указывает на то, что способность излучать свет является для них жизненно важной. Почему?

Ответ на этот вопрос кажется, на первый взгляд, очевидным.

В темных глубинах моря свечение организмов позволяет им ориентироваться, охотиться, опознавать друг друга. Световые сигналы помогают встретиться самке с самцом. Они могут служить для отпугивания или обмана хищников. Скажем, рачок, вспыхнув, быстро отскакивает в сторону, а хищник бросается на световую вспышку и, естественно, промахивается.

Таким образом, представляется вполне очевидным, что свечение живых организмов есть не что иное, как *сигнализация*. Однако вряд ли дело только в этом. Как известно, большой (если не основной) вклад в свечение моря вносят одноклеточные организмы. А ведь у одноклеточных нет ни пола, ни преследующих хищников, ни скрывающихся жертв. Так что им вроде бы нет никакого резона подавать световые сигналы.

В настоящее время вопрос о биологическом смысле свечения моря все еще продолжает оставаться открытым.

Чтобы разгадать эту загадку природы, необходимо провести серьезные исследования по изучению поведения светящихся обитателей морских глубин, их взаимодействия друг с другом и с окружающей средой.



Глава

# 12

ЭХО

Ревет ли зверь в лесу глухом,  
Трубит ли рог, гремит ли гром,  
Поет ли дева за холмом —  
На всякий звук  
Свой отклик в воздухе пустом  
Родишь ты вдруг...

*А. С. Пушкин*





Эти стихотворные строки описывают интересное физическое явление — эхо. Все мы знакомы с ним. Мы слышим эхо, находясь на лесной поляне, в ущелье, плывя по реке между высоких берегов, путешествуя в горах. Его физическая природа хорошо известна — оно возникает в результате отражения звуковых волн от каких-либо препятствий.

У древних греков была лесная нимфа Эхо́. По одной из легенд, она влюбилась в прекрасного юношу Нарцисса. Но тот не обращал никакого внимания на нимфу, он был всецело занят тем, что без конца глядел в воду, любуясь своим отражением. Бедная нимфа от горя окаменела, от нее остался лишь голос, который мог повторять только окончания произнесенных поблизости слов. Согласно другой легенде, нимфа Эхо была наказана Герой — супругой всемогущего Зевса. Дело в том, что Эхо пыталась своими речами отвлечь внимание Геры от Зевса, который в это время ухаживал за другими нимфами. Заметив это, Гера разгневалась и сделала так, чтобы Эхо не могла говорить, когда другие молчат, и не могла молчать, когда другие говорят.

Загадка эхо была разгадана очень давно. Тот факт, что эхо объясняется отражением звука от препятствий, знал еще Аристотель (IV в. до н. э.). Однако одушевленный образ эхо — образ нимфы, которую можно слышать, но нельзя увидеть, казался слишком поэтичным, чтобы отказаться от него.

Этот образ, иногда веселый, а чаще грустный, можно встретить в стихотворениях поэтов различных эпох. Так, мы встречаемся с ним в стихотворении римского

поэта IV в. Децима Магна Авсония:

В ваших ушах я, Эхо, живу, проходящая  
всюду,  
Хочешь меня написать — голос возьми  
напиши.

В стихотворении А. А. Фета эхо вздыхает, грустит, даже стонет:

Та же птичка, что певала,  
Ночью песнь свою поет,  
Но та песнь грустнее стала,  
Радость на сердце нейдет.  
Эхо тихо простонало:  
Да, нейдет...

Образ нимфы Эхо встречается в одном из стихотворений А. А. Блока:

Листва кружевная!  
Осеннее злато!  
Зову — и трикраты  
Мне издали звонко  
Ответствует нимфа, отвечает Эхо...

Современный читатель, знающий об отражении звука от препятствий, обычно не видит здесь ничего удивительного. По его мнению, нимфа Эхо может представлять интерес только лишь для поэтов. Спешим предостеречь его от поспешных выводов. В явлении эха немало удивительного и интересного.

**Удивительное эхо.** Замечали ли вы, сколь разным может быть эхо? Вот вы стоите на лесной поляне и аукаете; в ответ вы слышите громкое эхо. Вы повернулись в другую сторону — и эхо стало тихим. А вот вы еще повернулись — и теперь явственно можно различить не одно эхо, а два: одно погромче, другое послабее. На той же поляне вы можете хорошо слышать эхо прохладным тихим

летним вечером и совсем не слышать его в жаркие полуденные часы.

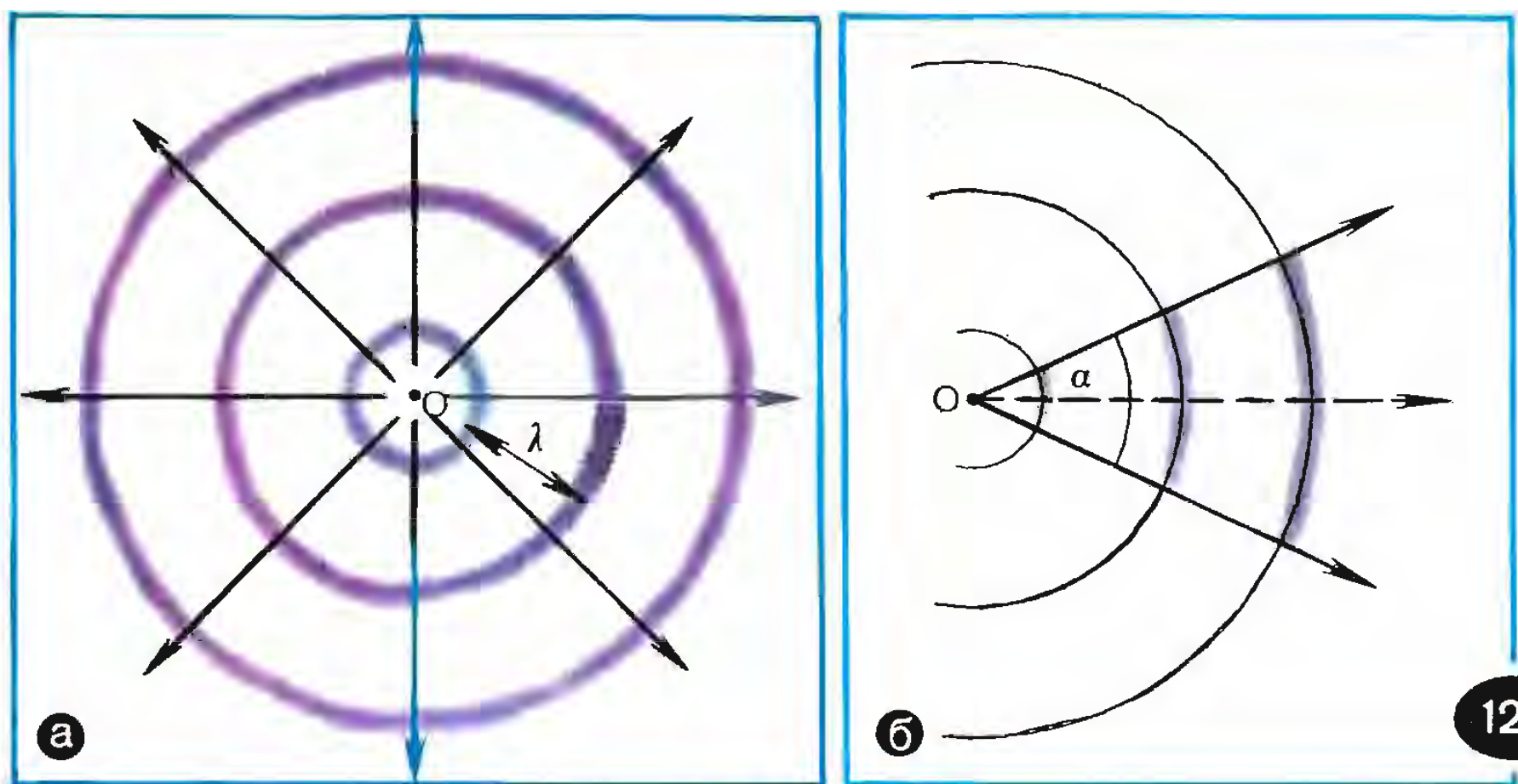
Большое впечатление производит многократное эхо — когда какой-нибудь громкий звук (крик, хлопок, выстрел) порождает не один, а несколько следующих друг за другом звуковых откликов. Такое эхо часто встречается в скалистых местностях, горных районах, в каменных замках. В Олимпии (Греция) в храме Зевса сохранился до наших дней «Портик Эхо». В нем голос повторяется 5...7 раз. В Сибири на реке Лене севернее Киренска есть удивительное место. Рельеф скалистых берегов там таков, что эхо гудков идущих по реке теплоходов может повторяться до 10 и даже 20 раз (при благоприятных погодных условиях). Такое эхо подчас воспринимается как постепенно затухающий звук, а иногда как звук, порхающий с различных направлений. Многократное эхо можно слышать также на Телецком озере в горах Алтая. Это озеро имеет 80 км в длину и всего несколько километров в ширину; его берега высоки и круты, покрыты лесами. Выстрел из ружья или резкий громкий крик порождает здесь до 10 эхо-сигналов, которые звучат в течение 10...15 с. Любопытно, что часто звуковые отклики представляются наблюдателю приходящими откуда-то сверху, как если бы эхо было подхвачено прибрежными возвышенностями.

В зависимости от рельефа местности, места и ориентации наблюдателя, погодных условий, времени года и суток эхо изменяет свою громкость, тембр, длительность; меняется число его повторений. Кроме того, может измениться и частота звукового отклика; она

может оказаться более высокой или, напротив, более низкой по сравнению с частотой исходного звукового сигнала. Напомним в связи с этим следующую картину, наверняка знакомую многим читателям. Вы едете в поезде, снаружи в открытое окно доносится множество звуков. Но вот поезд вошел в туннель — звуки сразу же стали более громкими и гулкими. Это происходит благодаря отражениям звуков от стенок туннеля, порождающим эхо. А теперь пусть наш поезд пересекает широкую реку, мимо окна быстро мелькают балки ферм железнодорожного моста. И сразу эхо стало иным — теперь мы слышим быстро следующие друг за другом короткие высокие («свистящие») звуки.

**Мир звуков.** Мы живем в мире звуков. Везде — в окружающем нас воздухе, в воде, в земле — распространяются различные по частоте, громкости, тембру звуковые волны.

Рассмотрим звуковую волну в воздухе. Она представляет собой регулярно чередующиеся сжатия и разрежения воздушной среды, распространяющиеся от источника звука; см. рисунок 12.1,а, где более темным тоном показаны более плотные (более сжатые) области,  $O$  — источник звука,  $\lambda$  — длина звуковой волны. Такие волны называются *продольными* — частицы среды совершают колебания вдоль направления распространения волны (смещаясь вперед, частицы создают сжатия в волне, а смещаясь назад — разрежения). В случаях, изображенных на рисунке 12.1, молекулы воздуха совершают колебания вдоль стрелок. На рисунке 12.1,а звуковая волна рас-



пространяется от источника света во все стороны. Используя рупор (в простейшем случае это могут быть ладони, соответствующим образом приставленные ко рту), можно обеспечить распространение звуковой волны в пределах некоторого угла  $\alpha$  (рис. 12.1, б). О величине этого угла можно говорить, разумеется, лишь приближенно; в данном случае важно то, что в пространстве выделено преимущественное направление распространения энергии звука — его называют направлением звукового луча (штриховая прямая на рисунке).

Заметим, что сжатия и расширения воздуха в любой фиксированной точке пространства совершаются очень быстро — настолько, чтобы теплообмен между сжатыми и разреженными областями не успевал произойти (адиабатное сжатие и расширение). Как показывает теория, скорость распространения таких сжатий и разрежений, иначе говоря, скорость звуковой волны в воздухе, может быть определена по формуле

$$v = \sqrt{\frac{7}{5} \frac{RT}{M}}, \quad (12.1)$$

где  $R$  — газовая постоянная ( $R = 8,31$  Дж/(моль·К)),  $M$  — молярная масса (для воздуха  $M = 2,9 \times 10^{-2}$  кг/моль),  $T$  — температура воздуха. Используя численные значения для  $R$  и  $M$ , перепишем (12.1) в виде

$$v \text{ (м/с)} = 20 \sqrt{T}. \quad (12.2)$$

Для  $T = 273$  К получаем из (12.2) хорошо известное значение  $v = 330$  м/с. Подчеркнем, что скорость звука в воздухе довольно заметно возрастает с увеличением температуры. Например, при  $T = 303$  К ( $30^\circ\text{C}$ ) она составляет 350 м/с, в то время как при температуре  $T = 243$  К ( $-30^\circ\text{C}$ ) она равна 312 м/с.

В жидкостях и твердых телах распространяются как продольные (волны сжатия-разрежения), так и поперечные волны. В поперечной звуковой волне частицы среды совершают колебания перпендикулярно к направлению распро-



странения волны. Скорость распространения звуковых волн в жидкостях и твердых телах существенно больше, чем в воздухе. Так, в воде звук распространяется со скоростью 1400...1500 м/с, в граните и мраморе около 4000 м/с, в различных породах деревьев от 3000 м/с до 5000 м/с. Как и в воздухе, скорость звука в воде возрастает с увеличением температуры (для пресной воды: 1410 м/с при 0°C, 1430 м/с при 5°C, 1480 м/с при 20°C).

Источники звуков необычайно многообразны. Мы не будем говорить здесь о прекрасном мире музыки, не будем касаться и тех подчас весьма беспокоящих нас звуков, которые порождает созданный нами же самими мир техники. Нас будут интересовать лишь *природные* источники звуков. Этих источников очень много и они крайне разнообразны. Шелест листьев деревьев, журчание ручья, завывание ветра, рокот морских волн, шум прибоя, грохот обвалов, гром — этот перечень можно было бы существенно увеличить. В него можно было бы включить также звуки, издаваемые живыми существами — птицами, зверями, рыбами. Да, мы не оговорились, — и рыбами тоже. Известная поговорка «нем как рыба» оказалась неправильной. Рыбы издадут множество звуков, и притом весьма разнообразных, так что вряд ли уместно называть подводное царство «миром безмолвия». Ставрида, например, издает звуки, напоминающие собачий лай, морской налим урчит и хрюкает, рыба барабанщик (из породы горбылей) производит нечто, действительно напоминающее барабанный бой; звуки карпа похожи на серию тресков, а речного

окуня на короткую дробь. Особо следует сказать о морских млекопитающих — китообразных, и в частности о дельфинах. Они обладают великолепно развитым внутренним ухом и отличаются исключительной «болтливостью». Их «словарь» довольно велик — он состоит из скрежета, щелканий, свистов, хрюканья, визга и т. д.

Почему же мы не слышим голоса рыб? Основная причина в том, что звуковые волны, достигая границы, разделяющей воду и воздух, почти целиком отражаются от нее. Лишь 1% энергии звука пересекает эту границу. Можно считать, что звуковая волна в воде, достигнув поверхности, разделяющей две стихии, почти полностью отражается от нее и продолжает распространяться под водой. То же относится и к звуковой волне в воздухе: достигнув поверхности воды, она почти полностью отражается от нее и продолжает распространяться в воздушной среде. Таким образом, мир звуков в воздухе и мир звуков в воде оказываются практически изолированными один от другого.

Впрочем, имеются свидетельства рыбаков и исследователей, указывающих на то, что иногда голоса рыб можно услышать. В частности, немало «поющих» и «разговаривающих» рыб в бассейне Амазонки. Среди них можно указать большого сома пирару, издающего звуки, которые напоминают рев слона; их слышно на расстоянии до ста метров. Внешне мало примечательная рыба хараки во время нереста издает громкие звуки, похожие на звук мотоцикла. Так что нельзя утверждать, что мы совсем не слышим рыбьих голосов.

Людей давно заинтересовало удивительно мелодичное «пение» китов-горбачей. Свидетели утверждают, что оно напоминает то гобой, то кларнет, то волынку, причем киты поют не только по одиночке, но и «хором». «Голоса горбачей,— писал Жак Ив Кусто,— отличны от голосов любых других животных. Их спектр гораздо шире, и они выразительнее птичьих голосов... Мы различали до тысячи различных звучаний! Тембр, сила звука, частоты создавали бесконечное разнообразие. Тут и трели, и сирены, и что-то вроде мышиного писка. А то вдруг словно олень заревел...» Человек хорошо слышит звуки, издаваемые дельфинами. Более того, возможен прямой звуковой контакт (обмен звуками) между человеком и дельфином.

Так американский исследователь Джон Лилли, известный нам по книге «Человек и дельфин», отмечал, что дельфины способны копировать человеческий смех и всевозможные звуки, даже звуки речи, произнося их в свойственной их звукообразующему аппарату высокой тональности и сжато.

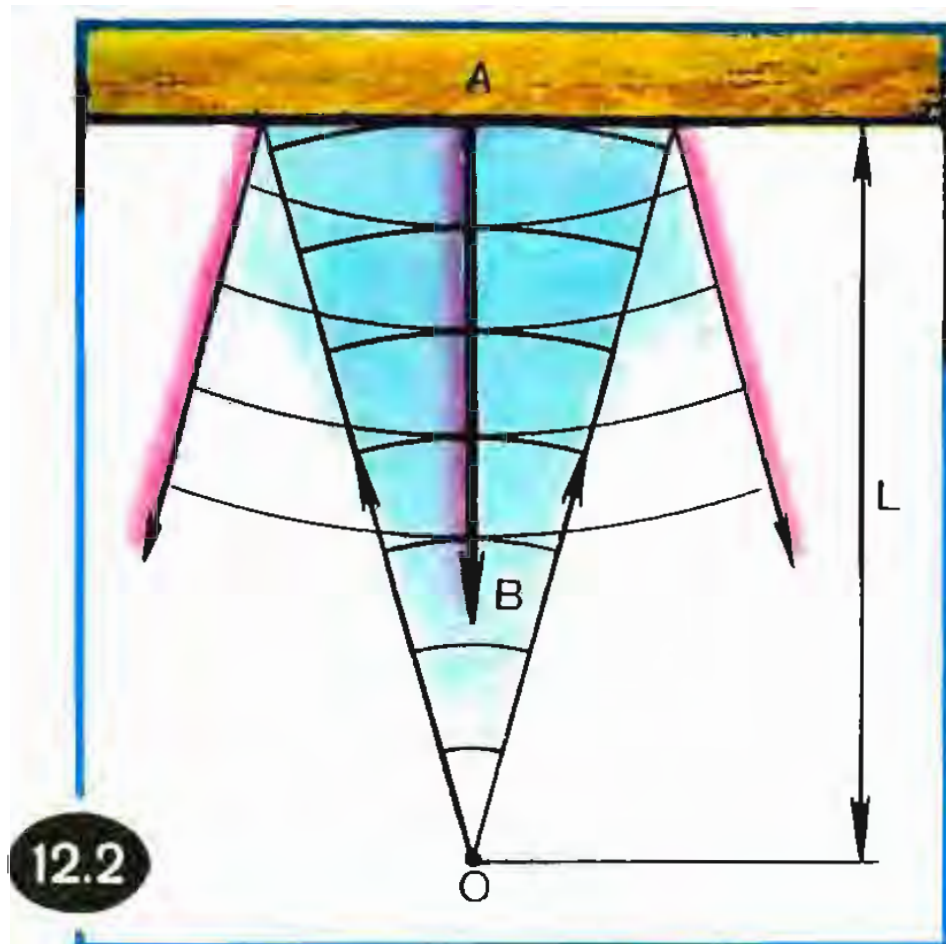
В заключение отметим, что воспринимаемый человеком мир звуков ограничен определенным диапазоном частот. Человеческое ухо способно воспринимать звуки частотой от 16 до  $2 \cdot 10^4$  Гц. Для него недоступен как мир инфразвуков (с частотами ниже 16 Гц), так и ультразвук (с частотами выше  $2 \cdot 10^4$  Гц).

**Эхо однократное и многократное.** Предположим, что вы находитесь в горном ущелье и хотите как можно явственнее, отчетливее

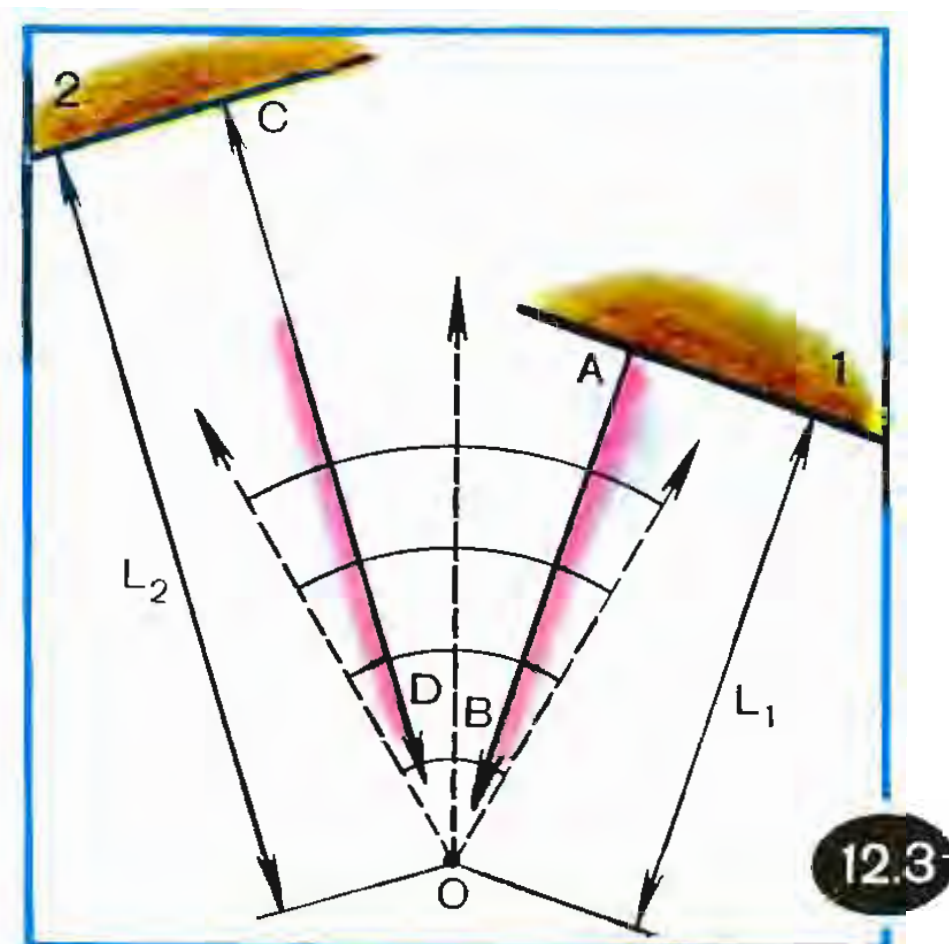
услышать эхо. О чем вам следует позаботиться?

Наверное, ответите вы, надо сложить ладони рупором около рта, повернуться лицом к ближайшему горному склону и погромче крикнуть что-нибудь.

Давайте проанализируем ваш ответ. Вы складываете ладони рупором, чтобы образовалась *направленная* звуковая волна (звуковой луч). В этом действительно есть резон: концентрируя звуковую энергию в каком-то направлении, мы тем самым усиливаем посылаемый звуковой сигнал. Это, конечно, важно, поскольку, распространяясь в воздухе (как и в любой другой среде), звуковая волна постепенно рассеивает свою энергию, слегка нагревая среду, и таким образом постепенно затухает. И все же это — не принципиальный момент. Ведь если источник звука достаточно мощный, можно слышать отчетливое эхо и тогда, когда звуковые волны распространяются во все стороны от источника (например, эхо от выстрела или взрыва). Принципиально важно другое — звуковой сигнал должен быть *достаточно коротким*. Точнее говоря, его длительность должна быть меньше времени, которое требуется звуку, чтобы пройти расстояние от источника до отражающей поверхности и обратно. В противном случае звуковой отклик будет накладываться на исходный звуковой сигнал, сливаться с ним, и поэтому отчетливое эхо мы не услышим. Получается, что отражающая поверхность должна находиться не слишком близко от источника звука (от наблюдателя). Однако нежелательно, чтобы она была слишком далеко от него — в этом случае звуковая



12.2



12.3

волна будет сильно ослабевать. Поэтому важно все-таки уменьшать длительность звукового сигнала.

Обратимся к рисунку 12.2. Источник звука  $O$  (наблюдатель) находится на расстоянии  $L$  от стены. Отражаясь от стены по направлению  $AB$ , звуковая волна возвращается к наблюдателю, и тот слышит эхо. Пусть  $c$  — скорость звука, а  $\tau$  — длительность звукового сигнала, посылаемого наблюдателем. Звук достигнет точки  $A$  через время  $L/c$ ; значит, промежуток времени от момента, соответствующего началу эхо-сигнала, составляет  $2L/c$ . Наблюдатель услышит отчетливое эхо, не перекрывающееся с первоначальным сигналом, если длительность сигнала будет меньше упомянутого промежутка времени, т. е. если будет выполнено неравенство

$$\tau < 2L/c. \quad (12.3)$$

Заметим, что, измеряя время  $2L/c$ , необходимое звуковому сигналу для того, чтобы вернуться к наб-

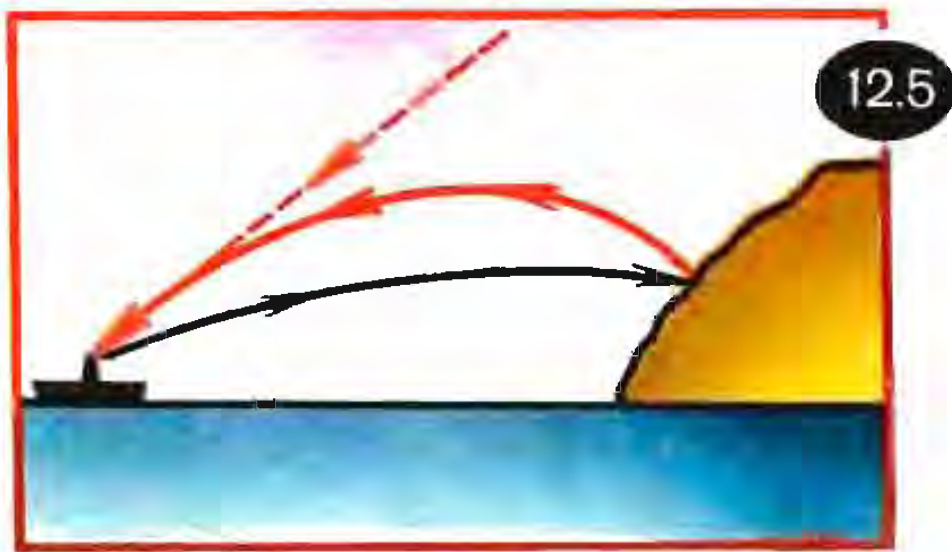
людателю, можно, очевидно, определить расстояние  $L$  от наблюдателя до стены (в этом заключается принцип эхолокации).

Множественное эхо возникает, когда имеется несколько отражающих поверхностей, находящихся на разных расстояниях от источника звука (наблюдателя). На рисунке 12.3 показано, как может возникнуть двойное эхо. Первый эхо-сигнал приходит к наблюдателю по направлению  $AB$  (отражение звука от поверхности 1), а второй — по направлению  $CD$  (отражение от поверхности 2). Время прихода первого эхо-сигнала, отсчитываемое от начала исходного сигнала, равно  $2L_1/c$ ; соответственно время прихода второго эхо-сигнала равно  $2L_2/c$ . Отчетливое двойное эхо образуется, если

$$\tau < 2L_1/c; \quad \tau < 2(L_2 - L_1)/c, \quad (12.4)$$

где  $\tau$  — длительность сигнала (длительность отклика). Второе неравенство (12.4) необходимо для того, чтобы эхо-сигналы не накладывались друг на друга.



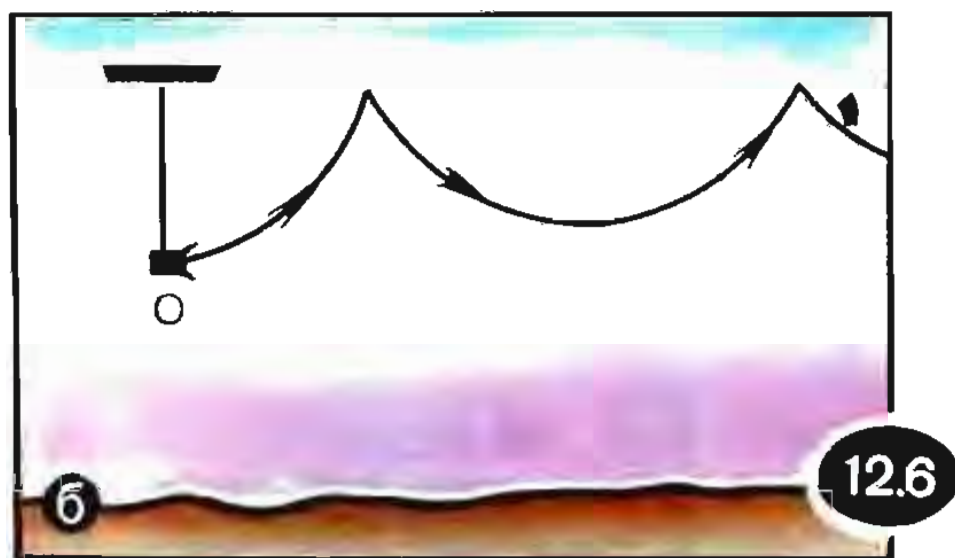
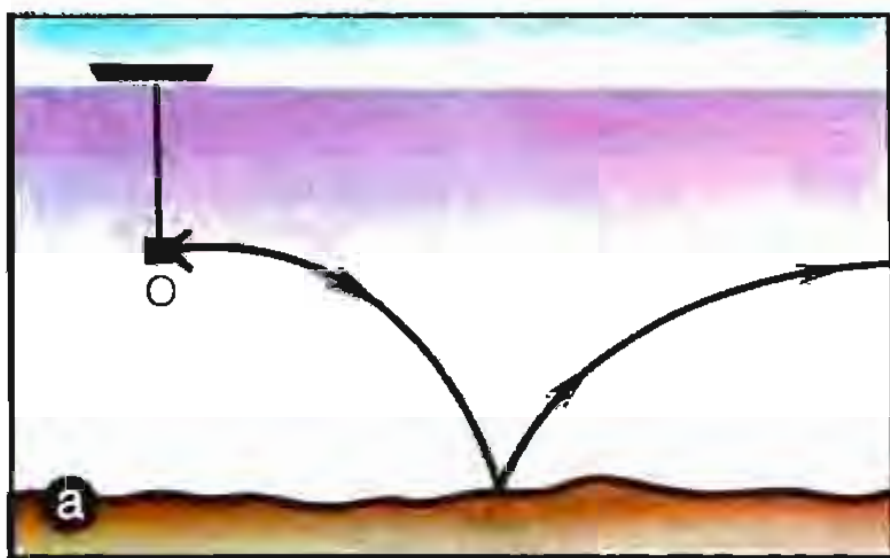


**Искривление звукового луча в акустически неоднородной среде.** В начале книги, знакомясь с солнечными закатами и миражами, мы встретились с явлением оптической рефракции — искривлением световых лучей в оптически неоднородной атмосфере. Для звуковых волн (звуковых лучей) наблюдается аналогичное явление — направление их распространения искривляется в акустически неоднородной среде. Как уже отмечалось, скорость звука зависит от температуры среды, поэтому среда, температура которой различна в разных точках, может рассматриваться как акустически неоднородная. Учитывая, что скорость звука в воздухе возрастает с увеличением температуры (см. (12.1)), и повторяя рассуждения, относившиеся в главе 2 к световому пучку, нетрудно прийти к следующему заключению: *звуковой луч в воздухе изгибается таким образом, чтобы его траектория была обращена выпуклостью в сторону более нагретых слоев.*

Теперь легко объяснить, почему на одной и той же поляне в тихий прохладный вечер эхо возникает, а жарким днем его нет. Днем солнечные лучи сильно прогревают почву, поэтому у самой поверхности земли температура воздуха оказывается заметно вы-

ше, чем на высоте, равной нескольким метрам. Акустическая неоднородность приповерхностных слоев воздуха приводит к *рефракции звуковых лучей* — они искривляются так, как это показано на рисунке 12.4, поэтому эхо не возникает. Вечером же приповерхностный воздух оказывается прогретым равномерно, он акустически однороден, поэтому искривления звуковых лучей не происходит и эхо наблюдается.

В одних случаях рефракция звука в воздушной среде предотвращает возникновение эха, в других же, напротив, приводит к его возникновению. Возникновение эха благодаря рефракции звука иллюстрирует рисунок 12.5. Такая ситуация характерна для горных озер. Вода в этих озерах всегда холодная, поэтому летом температура воздуха над ними с высотой возрастает. В результате звуковые лучи будут изгибаться так, чтобы их траектория была обращена выпуклостью кверху. На рисунке 12.5 хорошо видно, как возникает в этих условиях эхо. Кроме того, становится понятным, почему наблюдателю кажется, будто эхо приходит откуда-то сверху (по направлению штриховой прямой, показанной на рисунке). Как уже говорилось, этот эффект часто наблюдается на Телецком озере.



Рефракция звука происходит не только в воздухе, но и в воде. Как и в воздухе, скорость звуковых волн в воде увеличивается с ростом температуры. Значит, температурная рефракция звука под водой аналогична его рефракции в воздухе.

На рисунке 12.6 показана температурная рефракция звука в воде летом (а) и зимой (б).

Летом температура воды понижается с глубиной, поэтому звуковые лучи изгибаются книзу и затем отражаются от дна. Зимой, напротив, температура нижних слоев воды выше, чем приповерхностных; в этом случае звуковые лучи изгибаются кверху и отражаются от поверхности раздела вода — воздух. Заметим, что скорость звука в воде зависит не только от температуры, но и от концентрации солей в воде. Чем больше соленость воды, тем выше (при той же температуре) скорость звука. Нетрудно сообразить, что траектория звукового луча должна быть обращена в ту сторону, где соленость воды больше.

Гидроакустики пользуются легко запоминающимся правилом: *подобно жаждущему человеку, звуковой луч в морской воде всегда стремится в сторону более холодных и менее соленых слоев воды.*

Когда существенна длина звуковой волны? До сих пор мы рассматривали отражение звуковых волн от стенок и протяженных поверхностей. В этих случаях *длина* звуковой волны не существенна (она важна лишь с точки зрения обеспечения направленности звуковых волн; чем меньше длина волны, тем легче реализовать более высокую направленность). Предположим теперь, что звук отражается от объектов, размеры которых относительно невелики, например от копны сена, камня, ствола дерева и т. д. Здесь принципиально важно соотношение между размерами отражающего объекта (будем характеризовать их величиной  $d$ ) и длиной волны звука  $\lambda$ . Если  $\lambda \ll d$ , то звуковая волна отражается от объекта (подобно тому как она отражалась от стенки). Если  $\lambda \gg d$ , то звуковая волна проходит сквозь объект, как бы «не замечая» его. Точно так же волны на поверхности воды проходят сквозь тонкие стебли растений, торчащие из воды. Обе ситуации иллюстрирует рисунок 12.7 ( $\lambda_1 \ll d; \lambda_2 \gg d$ ). Они помогают объяснить возникновение высоких тонов в эхо-сигналах в упоминавшемся ранее примере поезда, проходящего по железнодорожному мосту. Когда мимо окна пронесется очередная балка мостовой

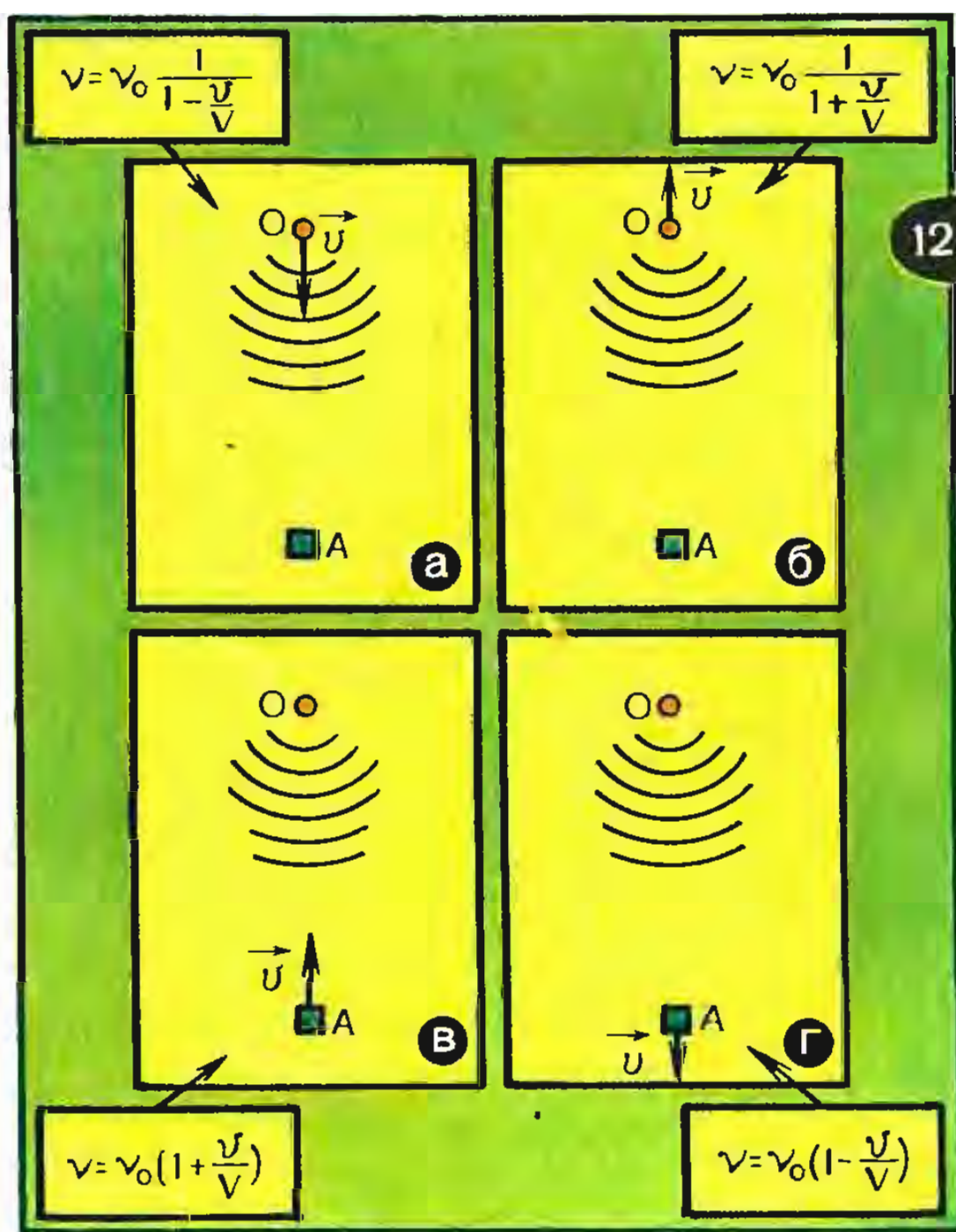
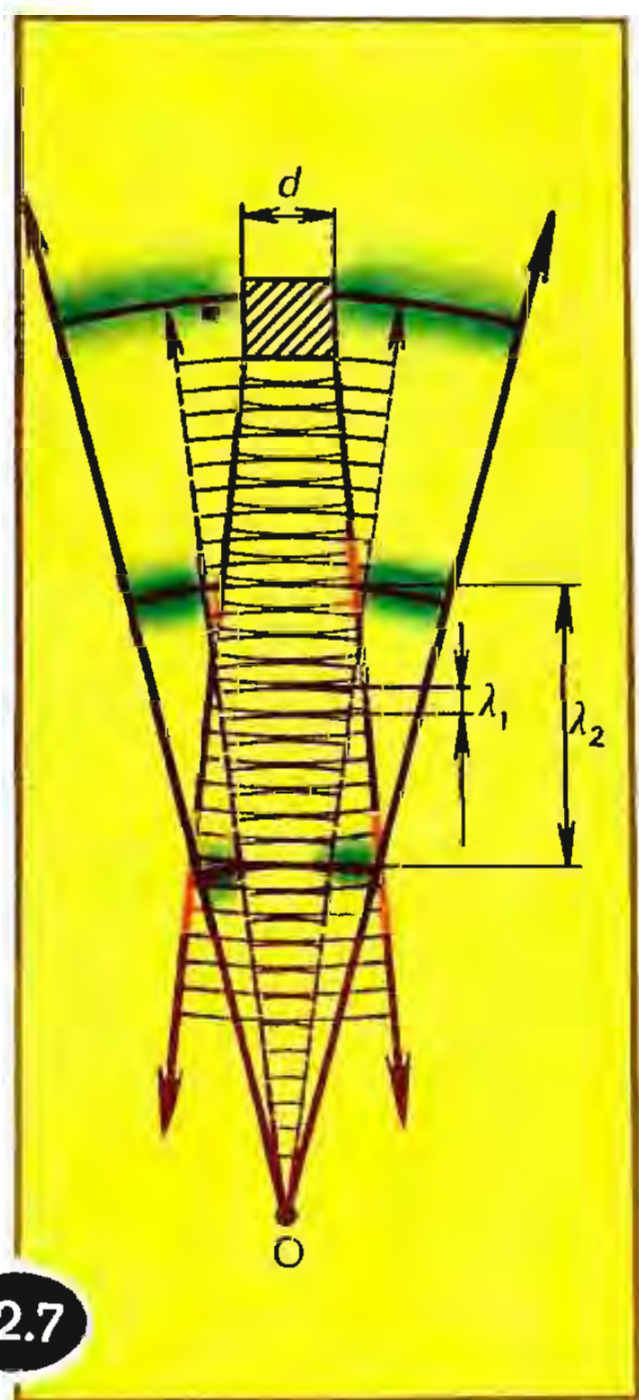


фермы, наблюдатель воспринимает отраженные ею звуковые волны. На балку падает много звуковых волн разной частоты, однако, как мы уже знаем, отражаются лишь те, длина которых меньше диаметра балки, т. е. волны с достаточно высокой частотой. Поэтому в воспринимаемом наблюдателем звуковом шуме и будут выделяться высокие тона.

Изображенная на рисунке 12.7 картина является упрощенной; очевидно, объект должен в какой-то мере искажать картину регулярных звуковых волн. Эти искажения становятся принципиальными, когда  $\lambda \approx d$ ; в этом случае наблюдается дифракция звуковых волн на рассматриваемом объекте.

Заметим, что утверждение, будто при  $\lambda \gg d$  волна «не замечает» объекта, не вполне верно; всегда происходит частичное рассеяние звука, при этом интенсивность рассеянной звуковой волны обратно пропорциональна  $\lambda^4$  (в применении к световым волнам этот результат рассматривался в главе 1 в связи с обсуждением голубого цвета неба).

**Эффект Доплера.** Предположим, что источник звука движется к неподвижному наблюдателю со скоростью  $v$  (рис. 12.8, а; О — источник звука, А — наблюдатель). Источник генерирует звуковую волну длиной  $\lambda_0$  (частота





$v_0 = c/\lambda_0$ ,  $c$  — скорость звука).  
 Вследствие движения источника звука наблюдатель будет воспринимать звуковую волну иной длины (иной частоты). В самом деле, пусть в момент времени  $t=0$  от источника к наблюдателю отправилась область сжатия. Следующая область сжатия отправится к наблюдателю в момент  $t_1 = 1/v_0$ ; т. е. через промежуток времени, равный периоду колебаний. За это время источник звука пройдет по направлению к наблюдателю путь  $v/v_0$ ; в результате расстояние между первой и второй областями сжатия окажется меньше  $\lambda_0$  на величину  $v/v_0$ . Это означает, что наблюдатель зарегистрирует волну длиной

$$\lambda = \lambda_0 - \frac{v}{v_0}. \quad (12.5)$$

Переходя от длин волн  $\lambda$  и  $\lambda_0$  к соответствующим частотам  $\nu$  и  $\nu_0$  ( $\lambda = c/\nu$ ;  $\lambda_0 = c/\nu_0$ ), преобразуем (12.5) к виду

$$c/\nu = (c - v)/\nu_0.$$

Таким образом, наблюдатель будет воспринимать звуковую волну с частотой

$$\nu = \nu_0 \frac{1}{1 - v/c}. \quad (12.6)$$

Если бы источник звука двигался со скоростью  $v$  не к наблюдателю, а от него (рис. 12.8,б), то в этом случае наблюдаемая частота описывалась бы выражением

$$\nu = \nu_0 \frac{1}{1 + v/c} \quad (12.7)$$

(предлагаем читателю самому убедиться в этом).

Рассмотрим теперь случай, когда источник звука покоится, а движется со скоростью  $v$  наблюдатель. Если наблюдатель движет-

ся по направлению к источнику (рис. 12.8,в), он будет регистрировать частоту

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \right). \quad (12.8)$$

При движении наблюдателя в обратную сторону (рис. 12.8,г) будет зарегистрирована частота

$$\nu = \nu_0 \left( 1 - \frac{v}{c} \right). \quad (12.9)$$

Результаты (12.8) и (12.9) приводим без вывода.

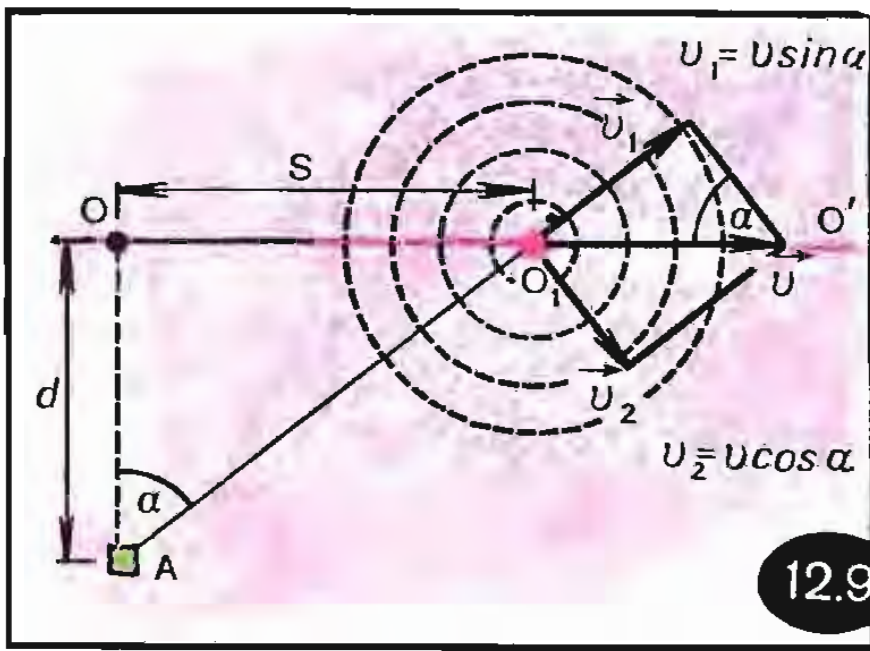
Зависимость регистрируемой наблюдателем частоты звука от скорости, с которой наблюдатель и источник звука сближаются друг с другом или, напротив, удаляются друг от друга, и составляет содержание эффекта Доплера в акустике (он был теоретически установлен в 1842 г. австрийским физиком К. Доплером). Когда источник звука движется к наблюдателю (или наблюдатель движется к источнику), частота звука, который слышит наблюдатель, повышается; см. (12.6) и (12.8). Когда источник звука движется от наблюдателя (или наблюдатель движется от источника), частота звука понижается; см. (12.7) и (12.9). Это, очевидно, необходимо принимать во внимание, рассматривая эхо-сигналы от движущихся объектов.

Полезно заметить, что при  $v \ll c$  можно приближенно принять:

$$\frac{1}{1 - v/c} = 1 + v/c;$$

$$\frac{1}{1 + v/c} = 1 - v/c.$$

В этом случае соотношение (12.6) переходит в (12.8), а соотношение (12.7) в (12.9). В результате оказывается безразличным, источник



12.9

ли звука движется, а наблюдатель неподвижен, или же, наоборот, наблюдатель движется, а источник звука неподвижен.

Решим задачу. Источник звука частоты  $\nu_0$  движется равномерно и прямолинейно со скоростью  $v$ . На расстоянии  $d$  от траектории источника звука находится наблюдатель. Как будет изменяться со временем частота звука, который слышит наблюдатель? Считать, что  $v \ll c$ , где  $c$  — скорость звука.

На рисунке 12.9 наблюдатель находится в точке  $A$ , а источник звука движется вдоль прямой  $OO'$ . Пусть в момент  $t=0$  источник звука проходит через точку  $O$ . Рассмотрим некоторый момент времени  $t$ . Ясно, что  $s=vt$  и  $s=d \operatorname{tg} \alpha$  (см. рисунок). Разложим вектор скорости  $\vec{v}$  в момент  $t$  на две составляющие: вдоль направления  $AO_1$  (составляющая  $v_1=v \sin \alpha$ ) и перпендикулярно к  $AO_1$  (составляющая  $v_2=v \cos \alpha$ ). С точки зрения эффекта Доплера важно, с какой скоростью источник звука удаляется от наблюдателя или приближается к

нему, т. е. важна составляющая  $v \sin \alpha$ . Используя соотношение (12.7) (с заменой  $v$  на  $v \sin \alpha$ ) и учитывая, что  $v \ll c$ , находим, что в рассматриваемый момент времени наблюдатель будет слышать звук частоты

$$\nu = \nu_0 (1 - v \sin \alpha / c). \quad (12.10)$$

Напомним, что

$$\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}},$$

и учтем, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{s}{d} = \frac{vt}{d}.$$

В результате соотношение (12.10) примет вид

$$\nu = \nu_0 \left( 1 - \frac{v^2 t}{c \sqrt{d^2 + v^2 t^2}} \right).$$

В момент  $t=0$  получаем  $\nu = \nu_0$ . При  $t \rightarrow \infty$  получаем

$$\nu = \nu_1 = \nu_0 (1 - v/c). \quad (12.11)$$

Итак, когда мимо наблюдателя пролетает со скоростью  $v$  источник звука частоты  $\nu_0$ , тот слышит звук, частота которого меняется со временем: она уменьшается от  $\nu_0(1+v/c)$  до  $\nu_0(1-v/c)$  по закону, описываемому формулой (12.11). Представим себе, что пролетающее мимо наблюдателя тело само звука не издает, а отражает звук, издаваемый наблюдателем. В этом случае наблюдатель будет воспринимать эхо. Ясно, что частота эхо-сигнала, регистрируемая наблюдателем, будет изменяться со временем по тому же закону (12.11), где под  $\nu_0$  следует понимать частоту сигнала, посылаемого наблюдателем.



Глава

# 13

## природные сонары

А дельфины черные,  
А дельфины добрые —  
На тебя глядят умными глазами.  
А дельфины теплые,  
А дельфины мокрые —  
Просят, чтобы им сказку рассказали.

*Песенка из мультфильма  
«Мы пришли сегодня  
в порт»*





Поговорим о двух удивительных животных — о летучей мыши и о дельфине. Впрочем, это не просто два животных, а две большие группы животных или, как говорят зоологи, два отряда. Отряд летучих мышей (ученые называют его *отрядом рукокрылых*) насчитывает около тысячи видов. Есть среди них очень маленькие зверьки — массой всего несколько граммов, но есть и настоящие гиганты, называемые летучими собаками за сходство их головы с головой собаки; размах крыльев у них достигает полутора метров. Дельфины относятся к отряду китообразных; число их видов составляет несколько десятков (белобочий дельфин, полосатый продельфин, афалина, морская свинья, дельфин-белобочка и др.).

И летучие мыши, и дельфины — млекопитающие. Но волей судьбы, а точнее говоря — эволюции, они приобрели способности, которые для млекопитающих являются необычными. Летучие мыши — это летающие звери, а дельфины — плавающие звери. Первые живут в мире птиц, а вторые в мире рыб.

Вполне понятно, что человек не мог остаться равнодушным к ним. Летучих мышей он откровенно невзлюбил, зато безоговорочно полюбил дельфинов.

В летучей мыши людям издавна не нравилось решительно все — уродливое строение тела, отвратительная голова, ночной таинственный образ жизни. Конечно, «уродливое», «отвратительная», «таинственный» — все это с точки зрения людей. Особую неприязнь всегда вызывали вампиры. Эти летучие мыши кровожадны в прямом смысле. Бесшумно приблизившись к какому-либо животно-

му, они прокусывают его кожу и жадно лижут кровь, вытекающую из ранки. Правда, кровожадные вампиры — всего лишь одна из разновидностей летучих мышей, однако неприязнь распространяется на всех. «Летучая мышь — это химера, чудовищное, невозможное существо, символ грез, кошмаров, призраков, больного воображения, — писал во второй половине XIX в. французский натуралист А. Туссенель. — Всеобщая неправильность и чудовищность, замеченная в организме летучей мыши, безобразные аномалии в устройстве чувств, допускающие гадкому животному слышать носом и видеть ушами, — все это, как будто нарочно, прищипано к тому, чтобы летучая мышь была символом душевного расстройства и безумия». С давних времен человек считал, что летучие мыши сродни «нечистой силе». И в наше время сохранилась неприязнь к этим удивительным животным, которые в абсолютном своем большинстве, право же, совершенно не заслуживают такого отношения.

А вот дельфины всегда нравились людям. Надо заметить, что и человек нравится дельфинам, так что любовь эта взаимная. Дружелюбие дельфинов по отношению к человеку поразительно. Когда вы видите огромную раскрытую пасть афалины с 88 зубами типа тигровых клыков, у вас возникает вполне понятное опасение. Но можете спокойно прыгать в воду к этим добродушным зверям. Они не тронут вас; более того, могут спасти, если вам вдруг доведется тонуть. Дельфины очень терпеливы, даже причиняющие им боль хирургические операции они переносят, не проявляя и малейшей агрес-

сивности к человеку, который делает операцию. Дельфины хорошо поддаются дрессировке, проявляя при этом исключительную смывленность. Добавьте сюда, что они необычайно игривы. Резвящиеся дельфины напоминают жизнерадостных ребятишек — они любят гоняться друг за другом, пускаться вперегонки, кувыркаться в волнах. Все это прекрасно объясняет нашу любовь к этим милым животным.

Итак, летучие мыши и дельфины. «Омерзительные чудища» и умные, ласковые, жизнерадостные звери. Почему же они оказались вместе на страницах этой книги? Что у них общего?

Вот об этом мы сейчас и расскажем.

**Сонары летучих мышей.** Почему летучие мыши могут уверенно летать в полнейшей темноте? Этот вопрос настолько заинтересовал в конце XVIII в. Ладзаро Спалланцани, что тот проделал над летучими мышами ряд опытов. Спалланцани установил, что летучие мыши, лишенные зрения, продолжают спокойно порхать в тесном помещении, по-прежнему прекрасно ориентируясь в темноте. При этом они полностью сохраняют способность охотиться за насекомыми. В то же время мыши, у которых уши залеплены воском, становятся беспомощными — они теряют ориентировку и все время натываются на разные препятствия. Спалланцани сделал правильный вывод: *летучие мыши ориентируются в темноте при помощи слуха.* Он предположил, что мыши издают во время полета какие-то звуки и улавливают эхо от препятствий, а также от насе-

комых. По эхо-сигналам они и ориентируются в полете.

В те времена подобное предположение многим казалось несерьезным, поскольку было известно, что летучие мыши летают совершенно бесшумно. Тогда еще не знали, что наряду со слышимыми звуками • бывают звуки, которые человеческое ухо не воспринимает, — инфразвуки и ультразвуки. Неудивительно, что после смерти Спалланцани опыты с летучими мышами надолго прекратились.

Они возобновились лишь в начале нашего века. В 1938 г. американские исследователи Г. Пирс и Д. Гриффин, применив специальную аппаратуру (ультразвуковые микрофоны), установили, что великолепная ориентировка летучих мышей в пространстве и, в частности, в полной темноте в самом деле связана с их способностью воспринимать эхо. Оказалось, что во время полета мышь излучает *короткие ультразвуковые сигналы* на частоте около  $8 \cdot 10^4$  Гц, а затем воспринимает эхо-сигналы, которые приходят к ней от ближайших препятствий и от пролетающих вблизи насекомых. По аналогии с радиолокацией Гриффин назвал способ ориентировки летучих мышей по ультразвуковому эху *эхолокацией*.

Использование для эхолокации именно ультразвука вполне естественно. Чем меньше длина волны излучения, тем более мелкими могут быть объекты, которые необходимо опознать при помощи эхо-сигналов. Напомним, что в данном случае линейные размеры объекта должны быть больше или по крайней мере порядка длины волны звука. Частоте  $\nu = 8 \cdot 10^4$  Гц отвечает длина волны  $\lambda = c/\nu = 4 \times 10^{-3}$  м = 4 мм (здесь  $c = 330$  м/с —

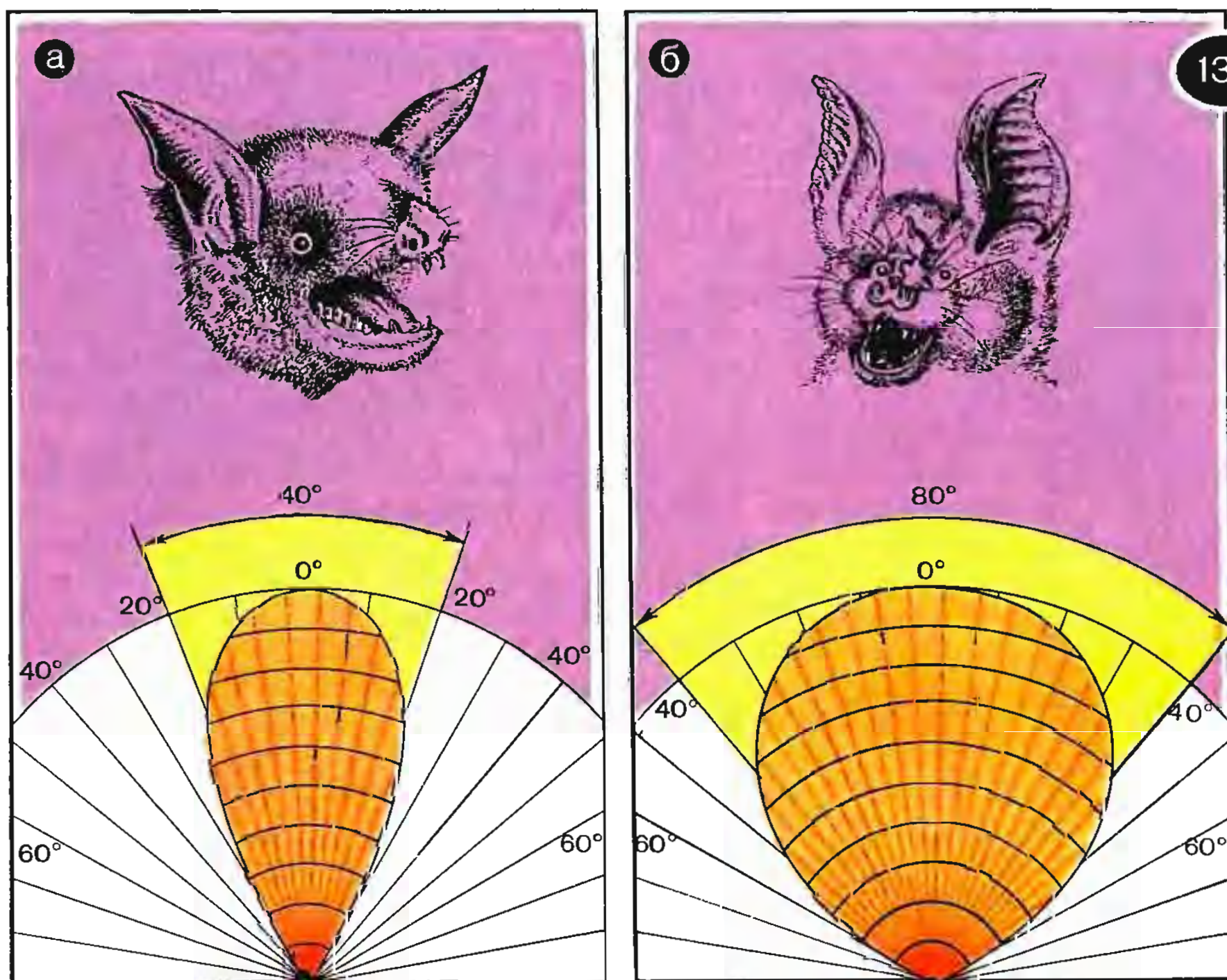


скорость звука). Кроме того, следует принять во внимание тот факт, что с уменьшением длины волны легче реализуется направленность излучения, а это очень важно для эхолокации.

Летучие мыши — обладатели весьма совершенных природных звуковых радаров, или, иначе говоря, природных сонаров (в слове «сонар» первый слог «со» происходит от английского *sound*, что означает «звук»). Устройство сонаров различно у разных видов летучих мышей. Например, остроухая ночница (как, впрочем, и многие другие виды мышей) излучает ультразвуковые волны через рот, а большой подковонос через ноздри, которые у него окружены

кожистыми выростами, наподобие рупоров. На рисунке 13.1,а изображена мордочка ночницы, а на рисунке 13.1,б — подковоноса. Там же приведены диаграммы направленности ультразвука, излучаемого этими мышами. Длина красных отрезков на диаграммах пропорциональна интенсивности звука в соответствующем направлении. Видно, что ночница испускает звуковой луч с углом раствора около  $40^\circ$ , а подковонос — около  $80^\circ$ .

Отраженные от объекта ультразвуковые волны летучая мышь воспринимает ушами, имеющими сравнительно большие размеры (см. рисунок). Слуховой аппарат у летучих мышей значительно





совершеннее, чем у человека. Дело здесь не только в том, что мыши улавливают ультразвуковые частоты. Они способны улавливать крайне слабые звуки, например звук, отраженный пролетающим комаром. Кроме того, летучая мышь удивительно точно определяет направление на объект, который отразил звуковой сигнал.

**Летучая мышь на охоте.** Многие виды летучих мышей питаются мелкими летающими насекомыми, например комарами. Комар имеет массу примерно 0,002 г. Предположим, что за 15 минут активной охоты за комарами масса маленькой летучей мыши возросла с 5 г до 5,4 г. Значит, проглоченные мышью комары составили в данном случае массу 0,4 г, что соответствует 200 комарам — меньше 5 с на каждого комара. И это отнюдь не рекорд. Производя звукозапись поведения летучих мышей, Гриффин обнаружил, что мышь может затрачивать на отлов одного комара менее секунды. Когда летучая мышь охотится за комарами, то со стороны кажется, что она совершает быстрые беспорядочные движения в воздухе, беспомощно мечется, бросаясь то в одну, то в другую сторону. В действительности же перед нами опытейшая летунья, наделенная совершенным сонаром. Каждое ее малейшее движение является целенаправленным и точным.

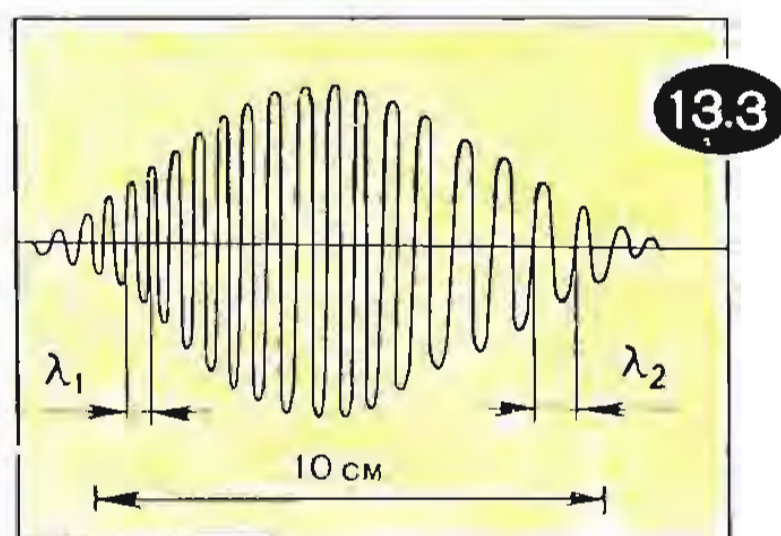
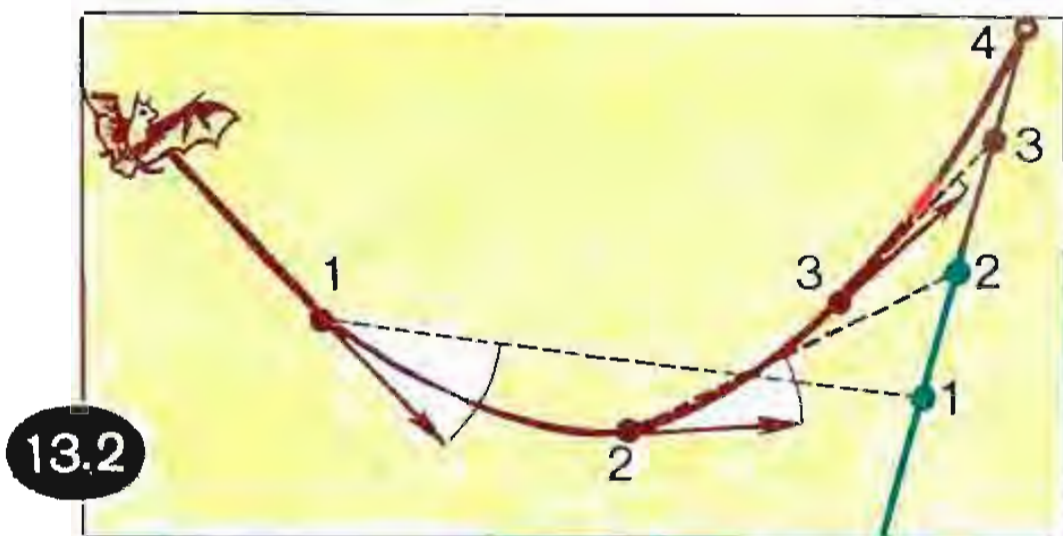
Заметим, что если бы мышь охотилась за комарами, не пользуясь своим сонаром, а просто вслепую летала бы туда и сюда с открытым ртом, то тогда даже в местности, достаточно богатой комарами (скажем, 10 комаров в каждом кубическом метре воз-

духа), ей пришлось бы затрачивать на одного комара в среднем несколько часов.

Убедимся в этом, решив следующую задачу. Лишенная слуха и зрения летучая мышь мечется в воздухе со скоростью  $v=1$  м/с с открытым ртом. Площадь ротового отверстия  $S=10$  мм<sup>2</sup>. Плотность комаров в воздухе составляет в среднем  $N=10$  м<sup>-3</sup>. Сколько времени в среднем нужно, чтобы мышь поймала одного комара?

Мы уже знаем, что лишенная слуха, а к тому же и зрения мышь не может ориентироваться и летает вслепую. Комары попадают ей случайно. На одного комара в рассматриваемой ситуации приходится объем  $\Omega=1/N=0,1$  м<sup>3</sup> воздушного пространства. Можно считать, что на отлов комара потребуется время  $t$ , в течение которого раскрытый рот мыши «заглатывает» объем, равный  $\Omega$ . За время  $t$  «заглатывается» объем  $Svt$ . Приравняв  $Svt$  и  $\Omega$ , находим  $t=\Omega/Sv$ . С учетом численных значений величин получаем  $t=10^4$  с, что соответствует примерно трем часам.

Вот летучая мышь заметила летящего комара. Как она начинает себя вести? На рисунке 13.2 изображены траектории полета комара (синяя линия) и преследующей его летучей мыши (красная кривая). Выделены четыре момента времени: 1, 2, 3, 4. Кружочками под соответствующими номерами показаны мгновенные положения отдельно мыши и комара. В момент 1 мышь начинает охоту за комаром, а в момент 4 она его настигает. Стрелками на рисунке отмечены направления скорости мыши в рассматриваемые моменты времени. В каждый момент летучая мышь как бы оценивает угол между направлением своей скорости и направлением на источник отраженного сигнала и



изменяет направление полета таким образом, чтобы этот угол становился все меньше и меньше (так называемое «преследование по собачьей кривой» — термин, используемый в артиллерийской практике при стрельбе из автоматических орудий по движущимся целям).

**Локационные сигналы летучих мышей.** Ультразвуковые сигналы, посылаемые летучей мышью в полете, имеют характер *очень коротких импульсов* — своеобразных щелчков. Длительность каждого такого щелчка  $\tau = (1...5) \cdot 10^{-3}$  с; ежесекундно мышь производит около десяти таких щелчков. Напомним, что при длительности локационного сигнала  $\tau$  отчетливое эхо, не сливающееся с начальным сигналом, возникает от препятствий, удаленных от источника (и одновременно приемника) звука на расстояние не менее  $c\tau/2$  (см. (12.3)). При  $\tau = 3 \cdot 10^{-3}$  с и  $c = 300$  м/с получаем, что это расстояние должно быть не меньше 50 см. Мы не знали, на каком именно расстоянии летучая мышь улавливает своим сонаром тот или иной объект, но реагировать на него она начинает на расстоянии порядка метра, при этом длительность  $\tau$  посылаемых мышью ульт-

развуковых сигналов уменьшается примерно в 10 раз, тогда как частота их следования увеличивается до 100...200 импульсов (щелчков) в секунду. Иначе говоря, заметив объект, летучая мышь начинает щелкать (посылать локационные сигналы) более часто, а сами щелчки становятся все более короткими.

А достаточно ли укорочение локационного сигнала в 10 раз? — может спросить дотошный читатель. Ведь при  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$  с можно по эхо-сигналу определить расстояние до объекта лишь при условии, что оно не меньше 5 см. Будет ли при этом обеспечено дальнейшее сближение летучей мыши с преследуемым ею комаром? Сомнения читателя нетрудно рассеять. Дело в том, что летучей мыши вовсе и не требуется определять, на каком именно расстоянии находится от нее комар в тот или иной момент. Как видно из рисунка 13.2, ей достаточно во время сближения с комаром оценивать расхождение между направлением собственного полета и направлением на комара и корректировать полет так, чтобы это расхождение постепенно сокращалось.

На рисунке 13.3 приведена осциллограмма одного щелчка (одного локационного сигнала) остро-

ухой ночницы, преследующей свою жертву. На осциллограмме длина щелчка составляет примерно 10 см. Поделив эту длину на скорость звука, находим длительность щелчка:  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$  с. На осциллограмме хорошо просматривается длина волны ультразвука  $\lambda$ . Видно, что с течением времени она заметно увеличивается: если в начале щелчка  $\lambda = \lambda_1 \approx 4$  мм, то в конце щелчка  $\lambda = \lambda_2 \approx 8$  мм. Следовательно, на протяжении щелчка частота ультразвука уменьшается от  $8 \cdot 10^4$  Гц до  $4 \cdot 10^4$  Гц. Способность сонара некоторых видов летучих мышей изменять частоту звука (как говорят, *модулировать звуковую частоту*) представляется в настоящее время одной из загадок. У подковоноса, кстати говоря, нет подобной частотной модуляции локационных сигналов.

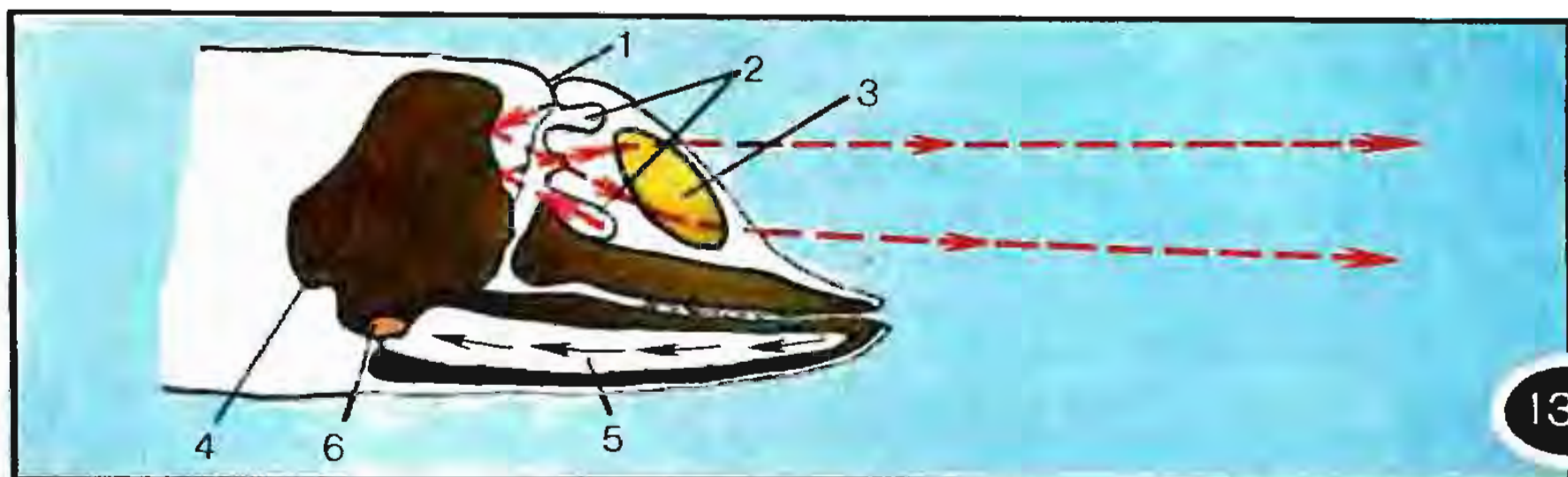
**Удивительные свойства природных сонаров.** Природные сонары летучих мышей не могут не восхищать исследователей и, в частности, они не могут не вызывать зависти у специалистов по радиолокации. Мы уже отмечали их очень высокую чувствительность, позволяющую улавливать крайне слабые эхо-сигналы от комара, который пролетает на расстоянии нескольких метров. Еще более удивительно то, что сонар летучей мыши позволяет ей различить эхо от неподвижного препятствия и эхо от движущегося объекта. Сама мышь находится, заметим, в движении. И при этом она не только легко различает неподвижные и движущиеся объекты, но способна воспринять слабенькое эхо от летящего комара на фоне во много раз более сильного эха от поверхности земли, деревьев и т. п. Спе-

циалисты по радиолокации знают, как трудно подчас различить радиозэхо от низко летящего самолета и от земной поверхности. Естественно, что их не может не заинтересовать природный сонар летучей мыши.

Летучие мыши обычно живут в пещерах, где собираются огромными стаями. Вылетая из пещеры или влетая в нее, каждая мышь пользуется, естественно, своим сонаром. Таким образом, одновременно издают звуки тысячи и более летучих мышей. А между тем весь этот шум, по-видимому, несколько не мешает каждой мыши легко ориентироваться внутри пещеры даже в полной темноте. Получается, что природные сонары обладают завидной способностью, по выражению специалистов, отстраиваться от паразитных сигналов. Известно, что в радиолокации проблема такой отстройки является очень важной и острой.

Пока мы не знаем достаточно хорошо, чем объясняются столь удивительные свойства природных сонаров. Ясно, что они связаны с особенностями устройства природных звукоизлучателей и звукоприемников летучих мышей. Возможно также, что определенную роль играет отмечавшаяся выше частотная модуляция локационных сигналов, посылаемых летучими мышами. Рассказывая об эффекте Доплера в предыдущей главе, мы рассмотрели задачу об изменении со временем частоты звука от пролетающего объекта. Не исключено, что сонары летучих мышей способны улавливать и соответствующим образом «оценивать» подобные изменения частоты. Одним словом, природные сонары заслуживают самого тщательного изучения. Нет сомнения,





что они подскажут людям немало интересных и полезных технических решений.

**Сонар дельфина.** Как и летучие мыши, дельфины обладают великолепным природным сонаром. Эхолокацию дельфинов обнаружили сравнительно недавно — в начале 50-х годов нашего столетия. Естественно, что интерес к дельфинам сразу же резко повысился; во многих странах начались серьезные исследования образа жизни, поведения, способностей этих удивительных животных.

Эхолокация у дельфинов, как и у летучих мышей, осуществляется на ультразвуковых частотах. Дельфины используют главным образом частоты от  $8 \cdot 10^4$  до  $10^5$  Гц. Мощность излучаемых дельфинами локационных сигналов может быть очень большой; известно, что они могут обнаруживать косяки рыбы на расстояниях до километра. Дельфин способен воспринимать очень слабые эхо-сигналы в сильнейшем шуме. Например, он прекрасно «замечает» маленькую рыбку, появившуюся на расстоянии 50 м.

Действие сонара дельфина поясняет рисунок 13.4, где дан продольный разрез черепа животного (рассматривается дельфин афали-

на). На рисунке: 1 — дыхало (отверстие в верхней части черепа, через которое осуществляется дыхательный процесс; оно закрывается, когда дельфин ныряет); 2 — воздушные мешки, генерирующие звуки (как обычные, так и ультразвуки); 3 — жировая лобная подушка, играющая роль своеобразной фокусирующей линзы для ультразвуковых волн, излучаемых дельфином; 4 — вогнутая, наподобие чаши, черепная кость, играющая роль отражателя ультразвуковых волн; 5 — нижняя челюсть, проводящая волны эхо-сигнала к уху; 6 — барабанная кость и внутреннее ухо. Штриховыми линиями показаны ультразвуковые лучи, которые дельфин посылает вперед. Эти лучи представляют собой последовательность коротких импульсов, имеющих длительность порядка  $10^{-5}.. 10^{-4}$  с.

**Два типа слуха дельфинов.** В слуховом аппарате дельфина есть два типа «входных ворот». «Ворота» первого типа — вытянутая нижняя челюсть. Через эти «ворота» к внутреннему уху дельфина поступают ультразвуковые волны, направление которых совпадает с направлением челюсти. Именно по этому направлению и осуществляется эхолокация. «Ворота» второго

типа — те места по бокам головы дельфина, где когда-то у далеких предков дельфинов, живших на суше, были обыкновенные уши. Ушей, как таковых, у дельфинов нет; наружные слуховые отверстия почти заросли, однако звуки они пропускают прекрасно. Через эти «входные ворота» к внутреннему уху дельфина поступают со всевозможных сторон звуковые волны относительно низких частот ( $10^3 \dots 10^4$  Гц).

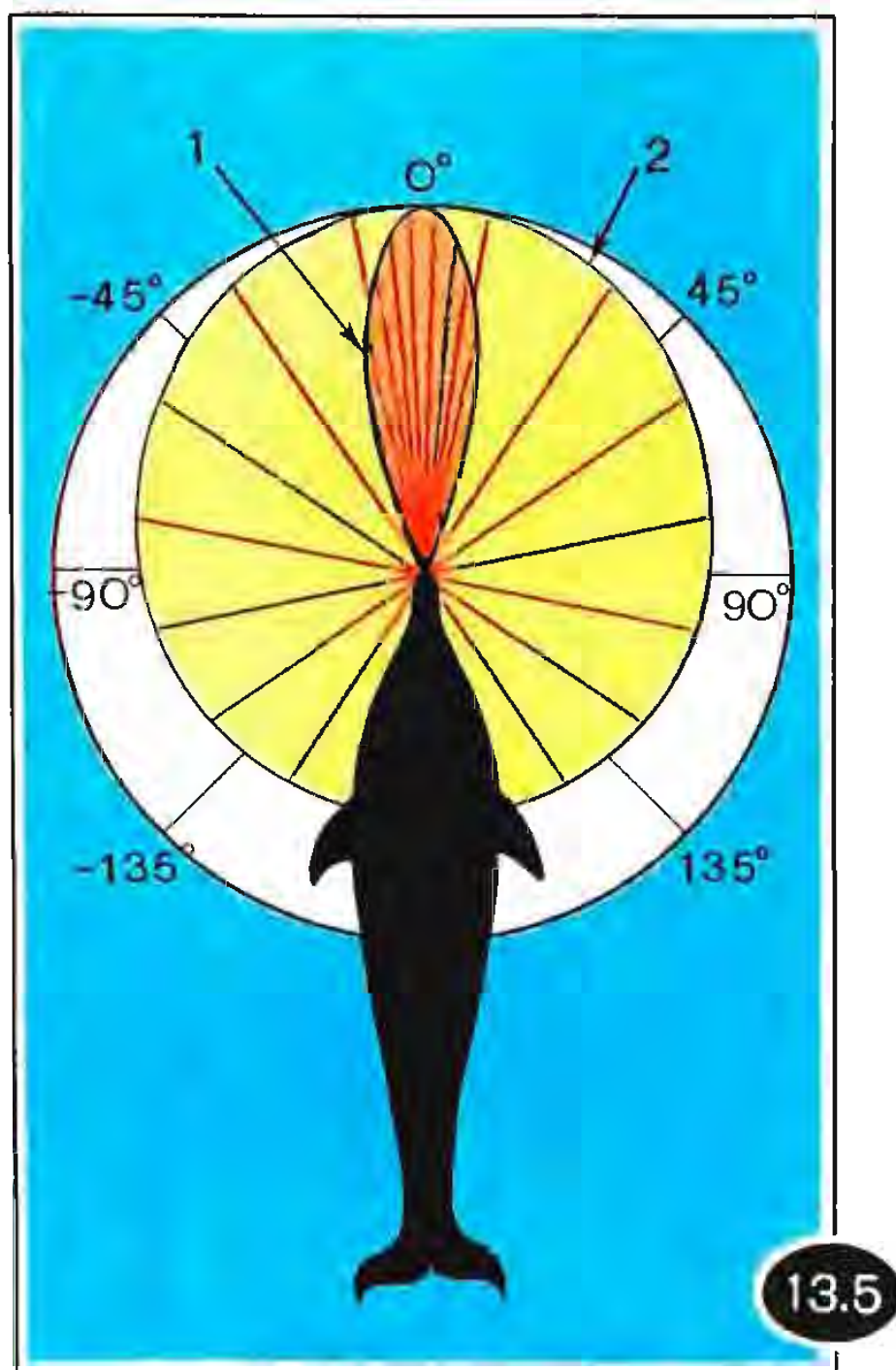
Таким образом, можно говорить о *двух типах* слуха дельфинов. *Первый тип* — *остронаправленный эхолокационный слух на ультразвуковых частотах*. Благодаря своей направленности этот слух предназначен для восприятия лишь ультразвуковых сигналов, отраженных от объектов, «просматриваемых» (правильнее сказать, прослушиваемых) дельфином. В известном смысле он подобен трубке фонендоскопа, при помощи которой врач прослушивает больного.

*Второй тип слуха* — *слух кругового обзора*; он предназначен для восприятия дельфином «обычных» звуков, заполняющих окружающее пространство.

Сказанное иллюстрирует рисунок 13.5. Длина красных отрезков на рисунке характеризует способность дельфина слышать звуки, приходящие к нему в соответствующем направлении. Чем длиннее отрезок, тем больше указанная способность. Отрезки, ограниченные кривой 1, относятся к эхолокационному слуху, а кривой 2 — к слуху кругового обзора. Рисунок хорошо иллюстрирует острую направленность слуха первого типа и слабо выраженную направленность слуха второго типа.

Эхо-сигналы отличаются от остальных звуков, приходящих к дельфину, во-первых, по степени направленности и, во-вторых, по частоте. Поэтому они воспринимаются разными устройствами слуха (проходят через разные «входные ворота»). В результате и оказывается возможным выделение даже очень слабых эхо-сигналов на фоне сильного шума.

**Другие природные сонары.** Мы рассказали об эхолокации летучих мышей (эхолокация в воздушной среде) и об эхолокации дельфинов (эхолокация в воде). Сонары имеются также и у ряда других видов животных. Они есть у ближайших





родственников дельфинов — кашалотов. Кашалоты используют свои сонары для поиска скоплений глубоководных кальмаров, которыми они кормятся. Сонар кашалота — своеобразная «дальнобойная пушка», имеющая длину до 5 м и занимающая почти треть тела животного.

Эхолокация обнаружена также у обитающих в Америке птиц гуахаро. Это очень странные птицы. Они гнездятся не на деревьях, а в темных пещерах и, хотя обладают хорошим зрением, предпочитают почему-то кормиться по ночам. В поисках пищи (они питаются плодами пальм) гуахаро улетают за десятки километров и непременно в ночной темноте, а с наступлением рассвета всей стаей спешат назад в свои темные пещеры. В темноте птицы ориентируются по эхо-сигналам. Надо признать, что их сонары гораздо менее совершенны, чем у летучих мышей и дельфинов. Они работают на относительно низких частотах, а именно в интервале от 1500 до 2500 Гц (эти частоты воспринимаются человеческим слухом). Поэтому гуахаро не замечают в темноте объектов, имеющих небольшие размеры. Как показали специальные исследования, птицы, испуганные в темной пещере, об-

наруживают препятствия размером более 20 см, но натываются на препятствия меньших размеров. Напомним, что летучая мышь с помощью эхолокации способна обнаружить бабочку и даже комара. Издаваемые гуахаро звуки, естественно, попадают в интервал частот, на которых работают их сонары, т. е. в интервал слышимых частот. По этой причине в пещерах гуахаро очень шумно. Птицы издают зловещие пронзительные крики, напоминающие плач и стоны, трудно переносимые для непривычного уха. Недаром их называли гуахаро, что в переводе с испанского означает «плачущий».

Эхолокацией пользуются и стрижи-саланганы, обитающие в Индонезии и на островах Тихого океана. Саланганы строят гнезда из собственной слюны; это хорошо известные «ласточины гнезда», они употребляются человеком в пищу, считаются деликатесом. У разных видов саланганов сонары работают на разных частотах: от  $2 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^4$  Гц. Любопытно, что когда птица сидит, ее эхолокационный аппарат не работает; локационные импульсы посылаются только в полете (при взмахиывании крыльями). Не работает сонар саланганов и на свету.



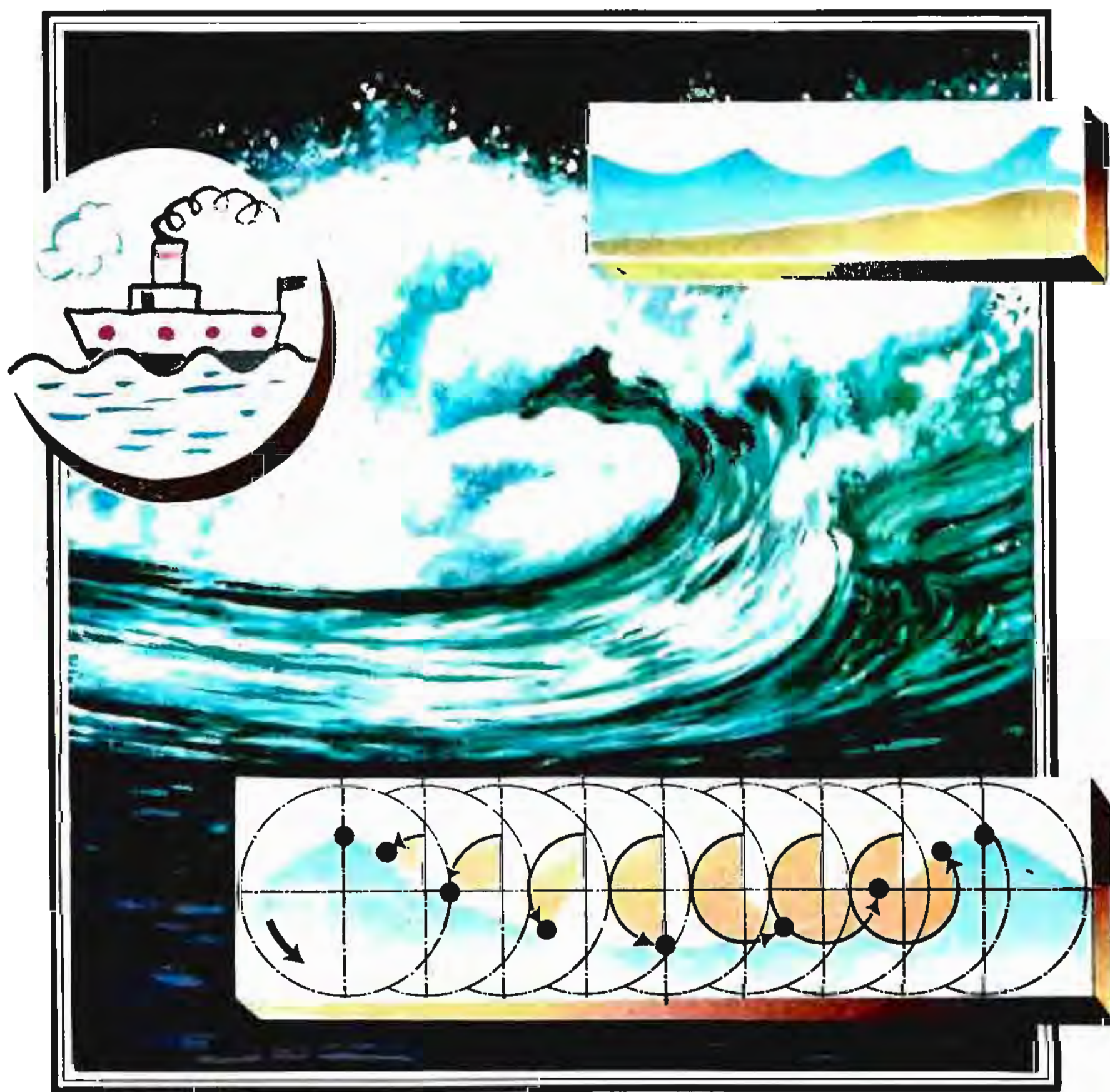
Глава

# 14

## Волны на море

Волны приходят и волны уходят,  
Стелются пеной на берег отлогий.  
По морю тени туманные бродят,  
Чайки летят и кричат, как в тревоге.

*В. Я. Брюсов*



Морские волны... Те, кто живет на берегу моря, могут каждый день наслаждаться их неумолкающей музыкой, их изменчивым видом. Правда, делают они это, как правило, безотчетно, ведь для них волны на море — нечто привычное, каждодневное. Те, кому еще не довелось побывать на море, имеют о морских волнах довольно поверхностное представление; они знают о них только по живописи, кинокартинам, телевизионным передачам. Многим ли из нас случилось всерьез задумываться над тем, что же это такое — морская волна?

А ведь это — удивительнейшее явление природы! Как, пожалуй, никакое другое явление, морские волны способны мощно воздействовать на наше настроение, успокаивать, вселять бодрость, будить воображение, обострять чувства. Волны — неиссякаемый источник вдохновения для поэтов и писателей. В то же время они — интереснейший объект изучения для физиков. Физика морских волн красива и сложна; чтобы объяснить ее, необходимо учесть множество факторов, взаимосвязанных и изменяющихся во времени.

Волна всегда наполнена внутренним движением и сама она — движение. Волна очень динамична. Свой «жизненный путь» — от зарождения до разрушения — она проходит, все время изменяясь. Вглядитесь повнимательнее в морскую волну, прислушайтесь к ней и к себе. Пусть вам припомнятся в этот момент душевные строки Ф. И. Тютчева:

Ты, волна моя морская,  
Своенравная волна,  
Как, покоясь иль играя,  
Чудной жизни ты полна!

В природе все взаимосвязано, в ней нет изолированных, обособленных явлений. Это трижды верно, когда речь идет о волне. В течение всей своей беспокойной жизни волна беспрестанно взаимодействует с земным притяжением, с берегом, с другими волнами и, конечно же, с ветром.

Подует ветер — и встает волна.  
Стихает ветер — и волна спадает.  
Они, должно быть, старые друзья,  
Коль так легко друг друга понимают.

Это очаровательное четверостишие средневекового японского поэта Ки-но Цураюки весьма точно отражает суть дела. Действительно, волны на море — своеобразное отражение динамики воздушных потоков в приповерхностных слоях атмосферы или, проще говоря, отражение силы и характера ветров над морем. Ветры отвечают за рождение и развитие морских волн. Свою энергию волны получают от ветра.

Волны оказывают на человека огромное эмоциональное воздействие. Прислушиваясь к ним, человек неизбежно прислушивается и к самому себе. Как всегда об этом хорошо говорят поэты. Они часто проводят поэтическую параллель между движением волн и порывами человеческой души. Вот как писал, например, А. К. Толстой:

Колышется море; волна за волной  
Бегут и шумят торопливо...  
О друг ты мой бедный, боюсь, со мной  
Не быть тебе долго счастливой:  
Во мне и надежд, и отчаяний рой,  
Кочующей мысли прибой и отбой,  
Приливы любви и отливы!

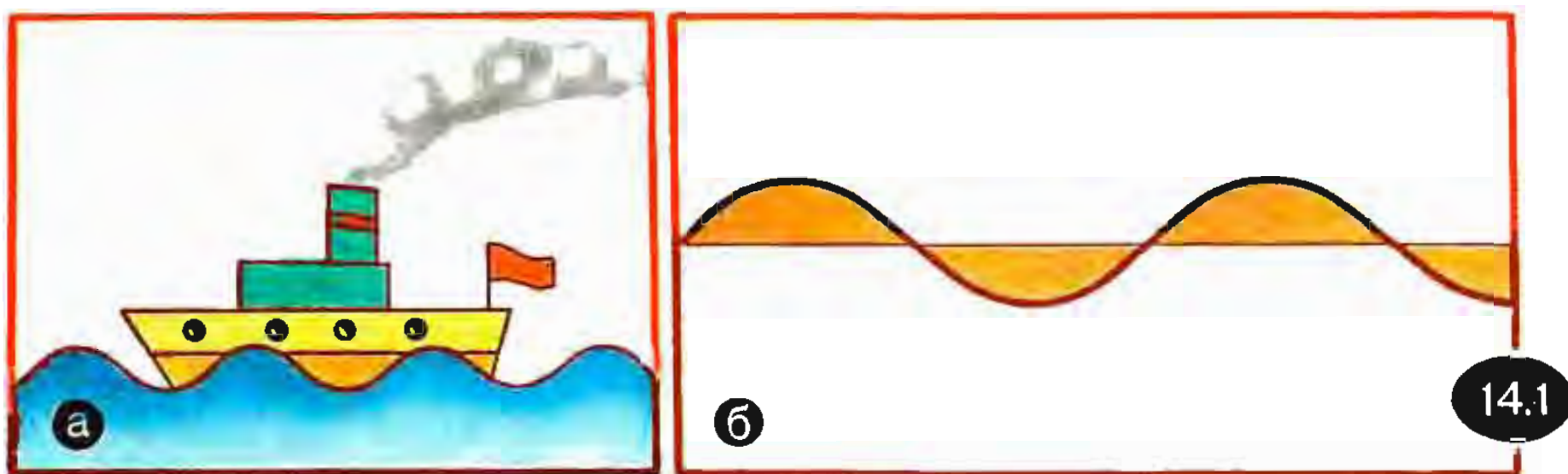
Поэтический образ волны прекрасен. Но еще более прекрасен образ того необъятного «целого»,







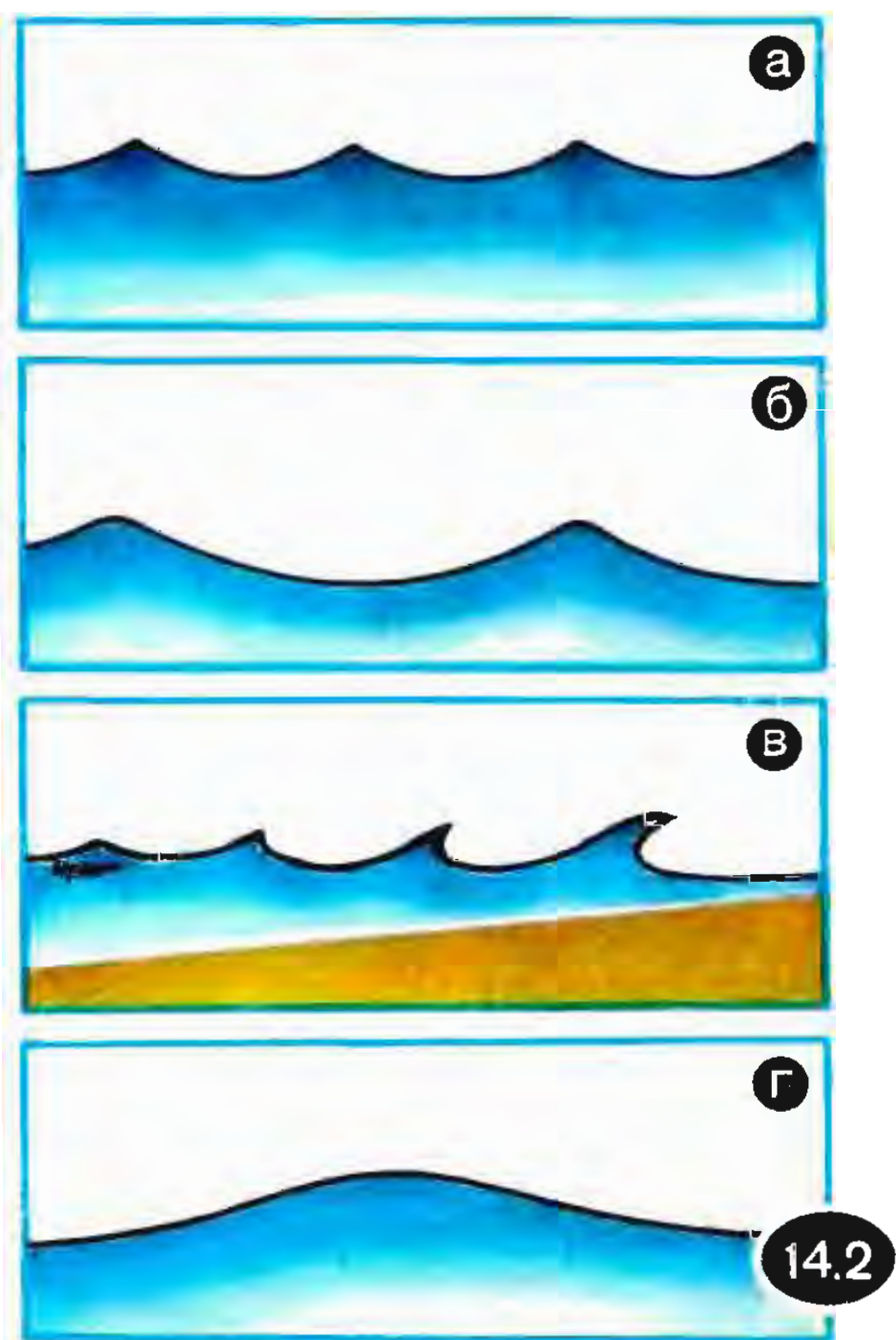




моря. Но основной причиной возникновения волн на поверхности воды является, конечно, ветер. Вызываемые ветрами волны называют *ветровыми волнами*; именно они и определяют картину волнения на море.

На рисунке 14.2 показаны четыре характерных профиля ветровых волн: а) волны вдали от берега при свежем ветре (обратите внимание на острые гребни волн); б) волны вдали от берега, устанавливающиеся на некоторое время после того, как ветер стихнет; их называют *мертвой зыбью* (по сравнению с синусоидой здесь более узкие гребни и более пологие ложбины волн); в) волны, набегающие на отлогий берег; г) одиночная волна, называемая *солитоном* (от английского слова *solitary* — «одинокий, уединенный»). Ниже мы поговорим подробнее о волнах первых трех типов. Что касается волн-солитонов, то отметим лишь, что примером таких волн являются приливные волны, возникающие в Финском заливе под действием циклонов; эти волны, входя в устье Невы, приводят к печально знаменитым ленинградским наводнениям. На рисунке 14.2 не показан интересный тип волн — очень мелкие волны длиной до 2 см и высотой в несколько миллиметров — *рябь*.

Нам понадобятся следующие характеристики волны: *длина волны*  $\lambda$  — расстояние между вершинами соседних гребней или, что одно и то же, между нижними точками соседних ложбин, *высота волны*  $h$  — расстояние по вертикали от нижней точки ложбины до



вершины гребня, *крутизна волны* — отношение высоты волны к ее длине, *скорость волны  $v$*  — скорость, с какой движется гребень волны.

**Ветровые волны глазами внимательного наблюдателя.** Вполне очевидна связь волнения на море с наличием ветра. При этом важна не только скорость ветра, но и тот факт, как долго дует ветер в одном и том же направлении.

Предположим, что несколько дней совсем нет ветра и поверхность моря практически неподвижна. Такое бывает на самом деле, хотя и довольно редко. Но вот появился легкий ветерок, затрепетали листья деревьев, и сейчас же на гладкой водной поверхности возникла рябь. Мы уже говорили, что волны ряби — это очень мелкие волны высотой всего в несколько миллиметров. Они легко возникают и быстро затухают; в результате наблюдаются образующиеся на короткое время то в одном месте, то в другом полосы ряби, как бы бегущие по гладкой водной поверхности. При внимательном наблюдении можно заметить, что чем меньше длина волны ряби, тем быстрее бежит эта волна.

Над морской поверхностью продолжает дуть ветер — все еще слабый, но понемногу усиливающийся. Постепенно полосы ряби сменяются отчетливо наблюдаемыми волнами, длина которых измеряется десятками сантиметров, метрами. Эти волны образуют довольно правильные параллельные ряды (рис. 14.3,а).

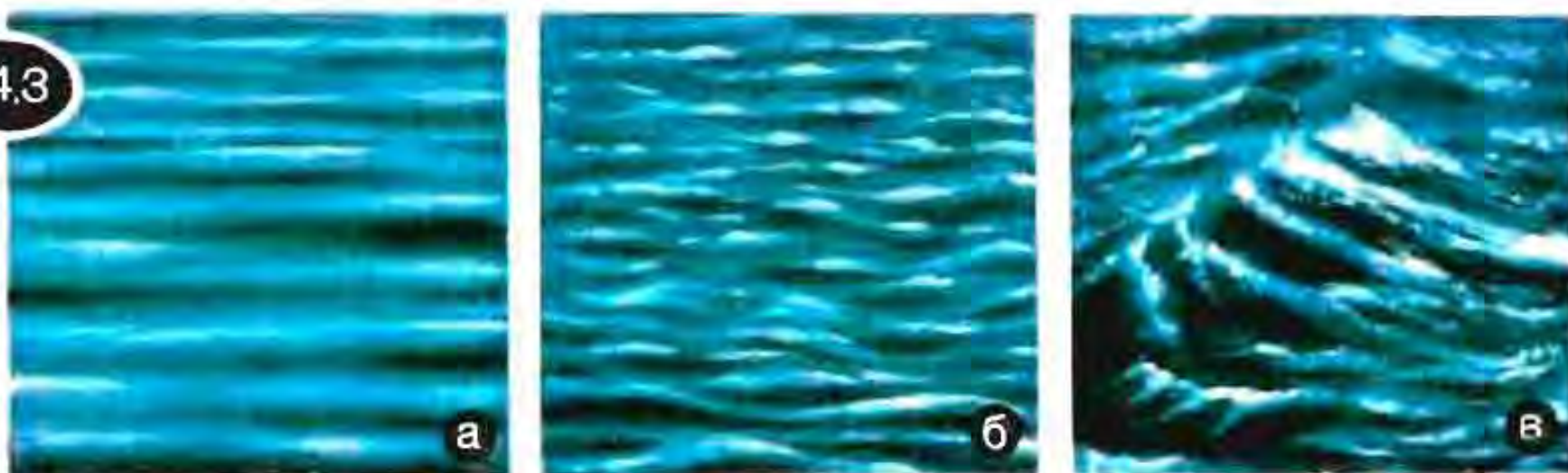
Ветер понемногу крепчает — волнение на море усиливается, увеличиваются длина и высота

волн. При этом происходит качественное изменение наблюдаемой картины: вместо регулярно следующих друг за другом параллельных рядов волн возникают хаотически разбросанные по всей водной поверхности холмы и холмики неправильной формы, разделенные столь же «неправильными» впадинами и ложбинами. Вся картина приобретает изменчивый, неупорядоченный вид (рис. 14.3,б). На первый взгляд кажется даже, что водяные холмы движутся в разные стороны. Все быстро меняется, холмы и впадины возникают и исчезают, и, кажется, никакого порядка нельзя усмотреть в наблюдаемой картине. Постепенно вершины водяных холмов все более обостряются, украшаются белыми барашками пены. Время от времени то в одном месте, то в другом возникают особенно крупные холмы. Такую картину можно наблюдать в открытом море, пожалуй, наиболее часто.

Если ветер дует со значительной скоростью достаточно долго и притом в одном и том же направлении, возникают штормовые волны (рис. 14.3,в). Это высокие и длинные волны (их высота измеряется метрами, а длина десятками и сотнями метров), имеющие острые гребни. Они образуют внушительные водяные валы, довольно регулярно следующие один за другим. Время от времени возникает особенно высокий вал — хорошо известный морякам как «девятый» (хотя, надо сказать, он совсем не обязательно оказывается девятым). Поверхность водяных валов покрыта более мелкими волнами неправильной формы; эти волны очень изменчивы — они легко возникают и быстро исчезают, непрерывно сме-



14.3



няя друг друга. В длинных и пологих ложбинах между водяными валами скапливаются полосы белой пены, образующейся в результате частичного разрушения острых гребней валов.

Мы убеждаемся, таким образом, что картина волнения на море достаточно сложна и изменчива; в ней есть элементы упорядоченности, регулярности, но в то же время много хаотичного. Можно утверждать, что развитие штормовых волн проходит через три последовательных этапа: *начальный* (рис. 14.3,а: регулярные ряды сравнительно небольших волн), *промежуточный* (рис. 14.3,б: картина волнения в значительной мере беспорядочна), этап *созревшей штормовой волны* (рис. 14.3,в: большие валы обнаруживают регулярность, на нее накладывается хаотичная картина мелких волн).

Но вот ветер стих, а затем и вовсе прекратился. Волнение на море улеглось, но волны не исчезли. Теперь они катятся друг за другом регулярными рядами; высота их около метра, длина порядка десяти метров. Гребни волн округлые, ложбины очень пологие. В этой картине плавно катящихся при полном безветрии волн нет какой-либо суеты, в ней чувствуется внутренняя уверенность и мощь. Перед нами мерт-

вая зыбь. О ней хорошо писал И. А. Бунин:

Как в гору, шли мы в зыбь, в слепящий  
блеск заката.

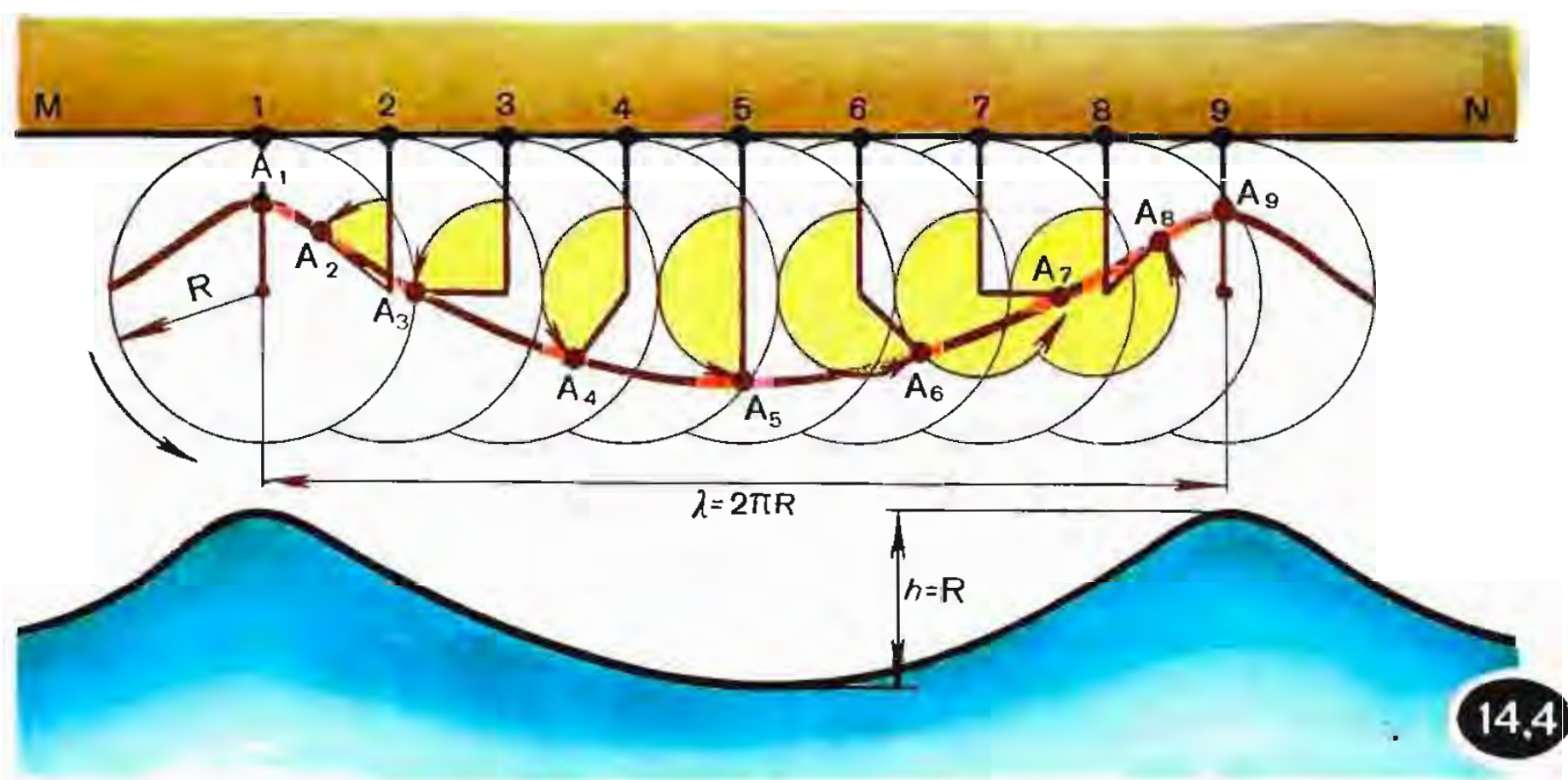
Холмилась и росла лиловая волна.

С холма на холм лилось оранжевое золото,  
И глубь небес была прозрачно-зелена.

Профиль волны мертвой зыби можно приближенно описать кривой, называемой *трохоидой*. На рисунке 14.4 показано, как можно построить трохойду. Представим себе колесо радиусом  $R$ , которое катится по плоскости  $MN$ . Выберем на колесе точку, находящуюся на расстоянии  $R/2$  от центра колеса. Пусть она занимает положение  $A_1$  в тот момент, когда колесо соприкасается с плоскостью в точке  $1$ . Колесо катится по плоскости; на рисунке показаны разные его положения и соответствующие положения рассматриваемой точки колеса:  $A_2, A_3, A_4, \dots$ . Красная кривая, проведенная через эти положения, и есть трохойда.

Если бы волна имела профиль трохойды, то ее крутизна, как легко видеть, равнялась бы  $R/2\pi R = 1/2\pi$ . В действительности же согласно наблюдениям максимальная крутизна волн мертвой зыби составляет  $1/7$ . Это близко к значению  $1/2\pi$ , но все же меньше. Отсюда видно, что профиль реальной вол-





ны, хотя и близок к трохоиде, тем не менее отличен от нее. В частности, он имеет меньшую крутизну, более пологую ложбину.

Скорость волны зависит от скорости ветра и длительности его воздействия на волну, причем скорость волны всегда меньше скорости ветра. Создается впечатление, что ветер как бы гонит волну, разгоняет ее. Между прочим, именно так обычно и говорят. Забегая вперед, заметим, что такое представление неверно с физической точки зрения. При постоянном ветре скорость установившихся волн составляет 0,8 от скорости ветра. Свежий ветер силой 5 баллов (такой ветер хорошо ощущается рукой, он качает тонкие стволы деревьев) имеет скорость около 10 м/с. Скорость сильного ветра силой 8 баллов (ломаются ветви и сучья) доходит до 20 м/с. Таким образом, волна может перемещаться довольно быстро — со скоростью порядка 10 м/с и более. При этом важно иметь в виду, что стремительный бег волн отнюдь не означает, что столь же стремительно переносит-

ся вещество, в данном случае вода. Бросьте в волну пробку и наблюдайте за ней. Когда под пробкой проходит гребень, она устремляется вместе с ним вперед, однако тут же соскальзывает с него, отстает и, попадая в ложбину волны, начинает двигаться назад, пока ее не подхватит следующий гребень. Затем все повторяется. Впрочем, повторяется не полностью: всякий раз пробка смещается немного вперед.

Именно так и ведут себя частицы воды; волна бежит вперед, а водная масса совершает перемещения «на одном месте», слегка смещаясь по направлению движения волны.

До сих пор мы рассматривали морские волны *вдали от берега* — там, где море достаточно глубоко (позднее мы уточним, что означает «глубоко»). Теперь обратимся к волнам на мелководье с плавно поднимающимся дном, т. е. к волнам в непосредственной близости от берега. Здесь мы видим существенно иную картину. При очень слабом ветре волны лижут кромку



берега, то набегаая на нее, то отступая назад. Ветер крепчает — и волны начинают накатываться на берег, с шумом обрушиваясь, разбиваясь на мириады брызг и покрывая кромку берега пеной. При еще более сильном ветре картина прибоя становится более впечатляющей. Вблизи линии берега вырастают высокие волны с белыми гребнями (*буруны*). Они с грохотом опрокидываются на берег, выбрасывая на него потоки воды и обильную пену (рис. 14.5).

В картине морских волн у берега следует выделить две основные черты. Во-первых, *подходя к берегу, волны становятся выше и в то же время короче*, т. е. резко возрастает крутизна волн. Опытные моряки легко определяют мели и подводные рифы по особенно высоким волнам, возникающим над ними. Увеличение крутизны этих волн делает их неустойчивыми, их гребни начинают разрушаться, покрываясь белыми шапками пены. Буруны — верный признак мелководья. Во-вторых, при подходе к берегу (как и при прохождении над подводным рифом) *качественно изменяется профиль волны*. На глубоких местах профиль волны всегда симметричен относительно вертикальной плоскости, проходящей через верхнюю точку гребня. Теперь же такой симметрии нет.

Верхняя часть гребня смещается вперед сильнее, чем нижняя часть; в результате волна как бы опрокидывается вперед, обрушиваясь на берег. Как образно сказал один из исследователей морских волн, «волна встает на дыбы, как только почувствует почву под ногами, т. е. дно, а затем летит кувырком, разбиваясь на прибрежной отмели или рифах».

Все это хорошо видно на рисунке 14.2, в.

Дополнительно заметим, что, приближаясь к берегу, волны замедляют свое движение. Кроме того, их движение явно упорядочивается. Вдали от берега картина волн может быть весьма неупорядоченной, однако в непосредственной близости от берега мы наблюдаем регулярные волны, ориентированные, как правило, параллельно линии берега.

**Скорость волн на глубокой и мелкой воде.** Пусть  $H$  — глубина, т. е. расстояние от поверхности воды до дна (имеется в виду поверхность воды в спокойном состоянии). Если  $H \approx \lambda$ , а тем более если  $H > \lambda$ , то говорят о глубокой воде. Если же  $H \ll \lambda$  (на практике часто используют условие  $H < \lambda/10$ ), то говорят о мелкой воде. На глубокой воде волна распространяется, не «чувствуя» дна; в волнении участвует лишь приповерхностный слой воды толщиной не более половины длины волны. Иное дело волна на мелкой воде. Теперь в движение вовлекается вся масса воды, волна «чувствует» дно; ее скорость зависит от глубины. Скорость волны на глубокой воде описывается формулой

$$v = \sqrt{g\lambda/2\pi}, \quad (14.1)$$

14.5





а на мелкой воде

$$v = \sqrt{gH}. \quad (14.2)$$

Здесь  $g$  — ускорение свободного падения.

Рассмотрим задачу. Исходя из размерности физических величин показать, что скорость волны на глубокой воде должна быть пропорциональна  $\sqrt{g\lambda}$ . Прежде всего, сообразим, какие величины могут входить в формулу для скорости волны. Таких величин четыре: длина волны  $\lambda$ , глубина водоема  $H$ , плотность воды  $\rho$ , ускорение свободного падения  $g$  (величину  $g$  следует принимать во внимание по той причине, что сила тяжести играет роль возвращающей силы для колебаний водной поверхности). Учитывая, что рассматривается глубокая вода, сразу исключим глубину  $H$ ; ведь в данном случае волна не «чувствует» дна, так что величина  $H$  не может влиять на ее скорость. Из трех оставшихся величин ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $g$ ) надо образовать величину, имеющую размерность скорости. В размерность плотности  $\rho$  входит масса; размерности же остальных величин, включая и скорость, массы не содержат. Следовательно, величину  $\rho$  тоже надо исключить. В итоге остаются две величины:  $\lambda$  и  $g$ . Единственная комбинация из этих величин, имеющая размерность скорости, есть, очевидно,  $\sqrt{g\lambda}$ . Итак, исходя только из общих физических соображений и учитывая размерности величин, мы получили формулу (14.1) с точностью до безразмерного множителя  $\sqrt{1/2\pi}$ .

Из формулы (14.1) следует важный вывод: на глубокой воде скорость волн зависит от их длины. Более длинные волны бегут быстрее коротких. В этом, кстати говоря, нетрудно убедиться, бросив камень в воду. От брошенного камня побегут кругами волны. Первыми достигнут берега более длинные волны (рис. 14.6).

Внимательный читатель может вспомнить, что ранее, говоря о вол-

нах ряби, мы утверждали нечто противоположное. Мы говорили, что быстрее бегут более короткие волны. Дело в том, что формулы (14.1) и (14.2) относятся к не слишком коротким волнам, а именно к волнам, длина которых больше нескольких сантиметров. Если же длина волны оказывается меньше примерно 2 см (а именно таковы волны ряби), то в этом случае необходимо принимать во внимание поверхностное натяжение воды. Такие волны называют капиллярными, для них роль возвращающей силы при колебаниях поверхности играет сила поверхностного натяжения (по сравнению с ней влияние силы тяжести становится несущественным). Пусть  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения; он измеряется в Н/м. Скорость капиллярной волны описывается формулой

$$v = \sqrt{2\pi\sigma/\rho\lambda}. \quad (14.3)$$

Заметим, что для капиллярных волн величина  $g$ , являющаяся как бы «представителем» силы тяжести, никакой роли не играет; несущественна для них и величина  $H$  — ведь для столь мелких волн любая вода глубокая. Остаются три величины:  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ . Единственная комбинация этих величин, имеющая размерность скорости, есть  $\sqrt{\sigma/\rho\lambda}$ .

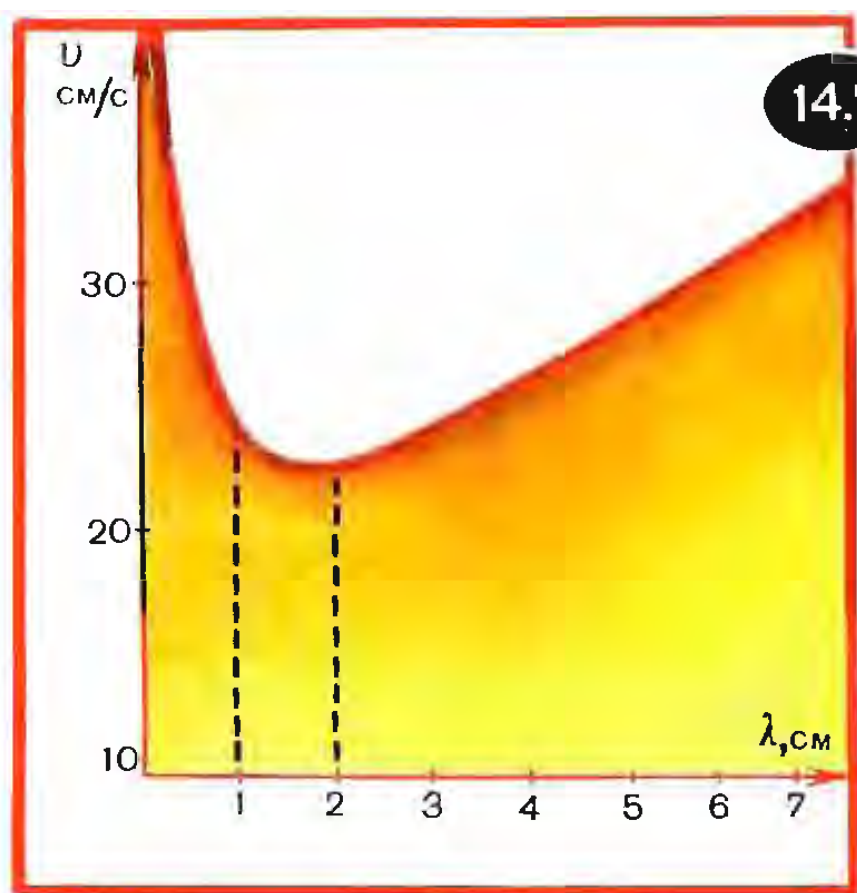


На рисунке 14.7 изображена зависимость  $v$  от  $\lambda$  для глубокой воды. При  $\lambda > 2$  см эта зависимость описывается формулой (14.1), а при  $\lambda < 1$  см — формулой (14.3).

Тот факт, что скорость волны изменяется с ее длиной, в значительной мере определяет неупорядоченность и изменчивость картины волн на глубокой воде. Одни волны догоняют другие, волны сливаются друг с другом и волны распадаются, волны складываются в фазе и волны складываются в противофазе — в итоге создается впечатление общей неразберихи. *Взаимодействие волн друг с другом* приводит к тому, что одна волна оказывается непохожей на другую; время от времени возникают особо высокие волны. Что же касается волн на мелководье, то эти волны, независимо от своей длины, бегут с одной и той же скоростью. Поэтому картина волн вблизи берега становится *упорядоченной*.

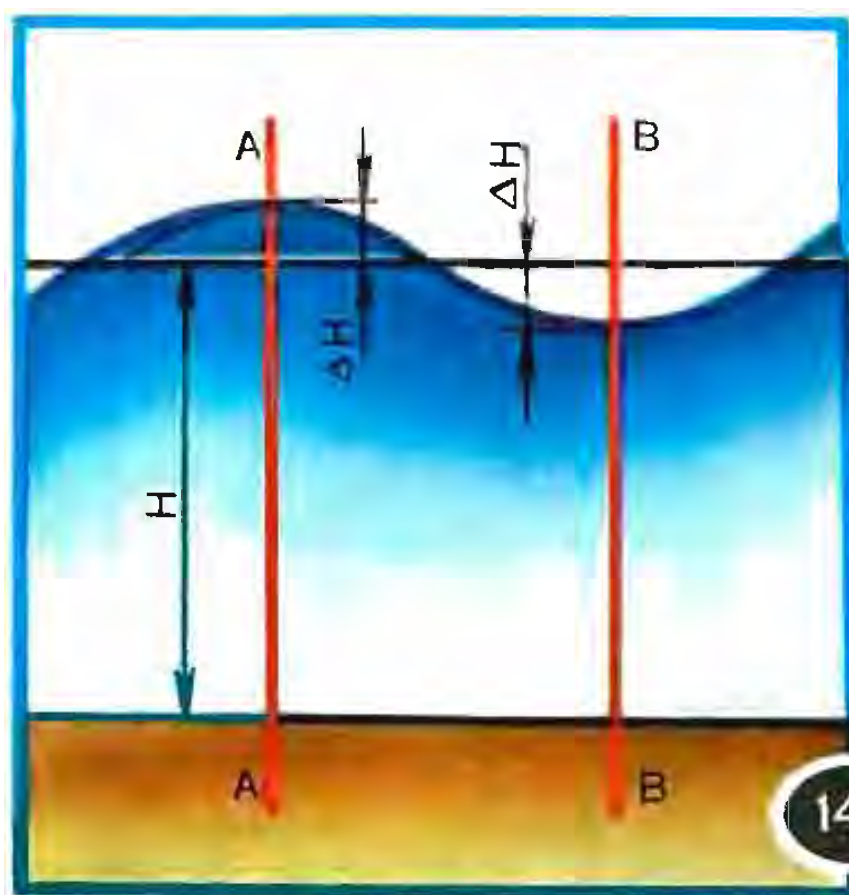
**Движение частиц в волне.** В главе 12 мы встречались с *продольными* и *поперечными* волнами. В продольной волне, напоминаем, частицы среды движутся вперед и назад по отношению к направлению волны, создавая чередующиеся сжатия и разрежения; таковы звуковые волны в воздухе. В твердых телах, наряду с продольными, распространяются также поперечные звуковые волны. В них частицы среды совершают колебания поперек направления распространения волны.

На первый взгляд волна на поверхности воды представляется поперечной. Но это не так. Достаточно посмотреть на рисунок 14.8, чтобы сообразить: частицы воды не могут перемещаться только по вертикалям. Это означало бы, что слой

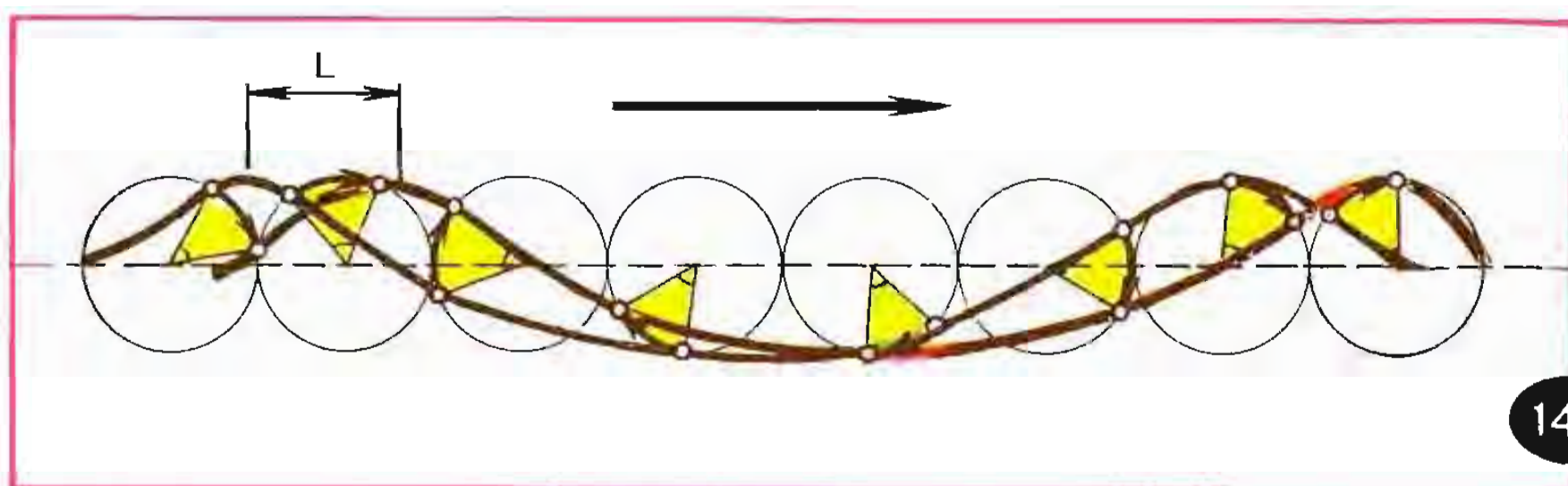


воды толщиной  $H$  должен был бы оказаться растянутым по линии  $AA$  на величину  $\Delta H$  и, напротив, сжатым по линии  $BB$  на ту же величину. Вода, очевидно, не может так сильно растягиваться и сжиматься; хорошо известно, что вода практически *несжимаема*.

Вспомним движение пробки на волне. Как мы уже отмечали, попадая на гребень, пробка движется







14.9

вперед, а соскальзывая затем в ложбину волны, движется назад. Итак, вперед и назад. И при этом одновременно поднимается на гребне и опускается в ложбину. В результате пробка описывает в вертикальной плоскости траекторию, которая, как оказывается, близка к окружности. Таким же образом движутся и частицы воды в волне. Следовательно, *волны на поверхности воды — это не поперечные и не продольные волны. Каждая частица в такой волне движется приблизительно по окружности в вертикальной плоскости, параллельной направлению распространения волны.*

На рисунке 14.9 зеленым цветом показан профиль волны в некоторый момент времени. На профиле выбраны восемь частиц, выделенных на рисунке маленькими кружочками. Каждая частица движется по своей окружности диаметром, равным высоте волны; движение происходит по направлению часовой стрелки. За некоторый промежуток времени каждая частица описала дугу, соответствующую углу, окрашенному на рисунке в желтый цвет. Проведем через новые положения рассматриваемых точек плавную кривую (красная кривая на рисунке). Легко видеть, что это есть профиль нашей волны, сместившийся по отноше-

нию к исходному профилю на расстояние  $L$  вправо. Таким образом, мы убеждаемся, что *движение частиц по окружностям действительно согласуется с волновым движением.*

Мы все время говорим здесь не просто о частицах воды, а о «частицах воды в волне». Что скрывается за таким уточнением? Известно, что волнение быстро уменьшается по мере погружения. Наверху, вблизи поверхности может происходить сильное волнение, а в то же самое время внизу, в глубине будет царить полный покой. Например, у К. Д. Бальмонта:

На этом темном влажном дне  
Нет волн и нет лучей...

Волнение на море затрагивает лишь приповерхностные слои воды. Поэтому и не «чувствует» дно волна на глубокой воде.

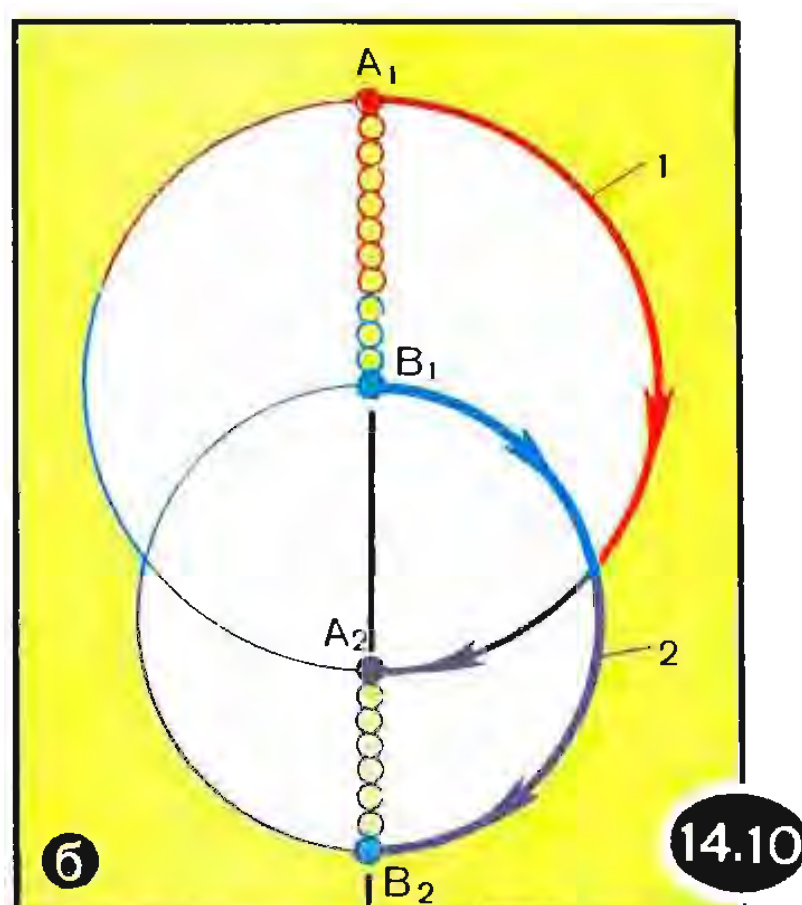
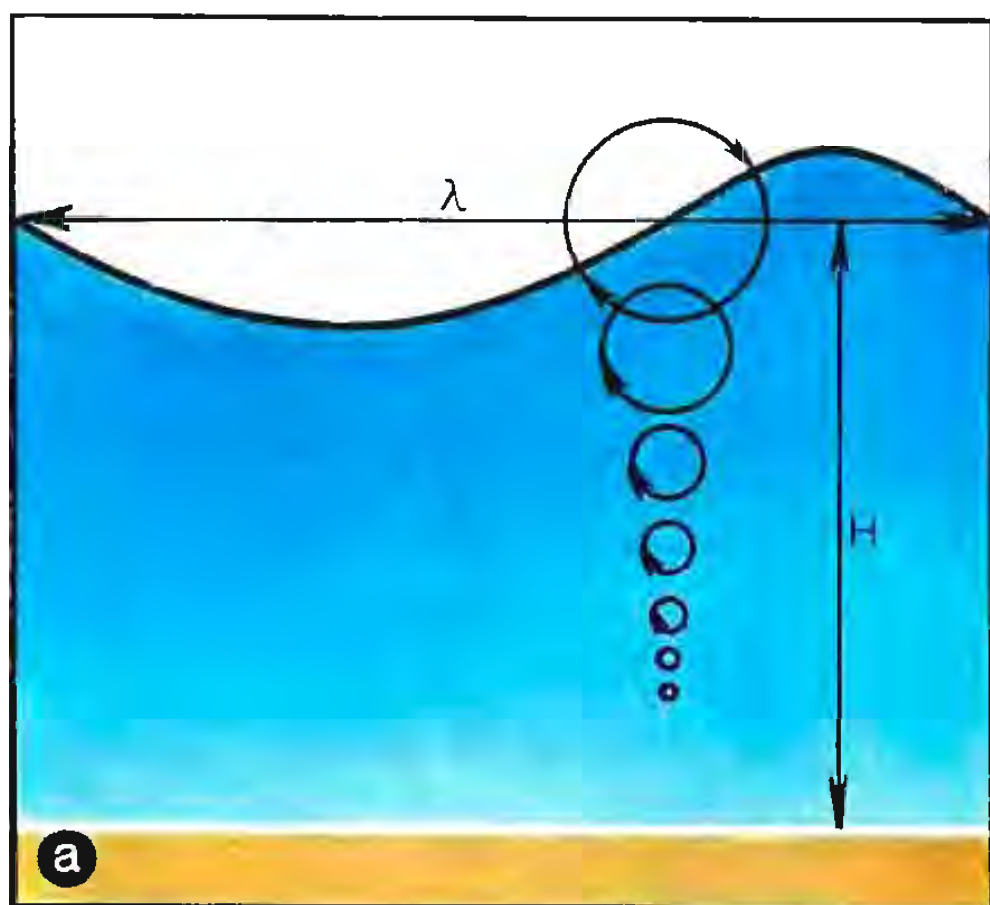
Рассмотрим, как движутся частицы воды на разных глубинах, когда по поверхности воды бежит волна. Орбиты частиц изображены на рисунке 14.10,а. Чем дальше от поверхности воды, тем меньше радиусы окружностей, описываемых частицами. Уменьшение радиуса с глубиной происходит очень быстро. Уже на глубине в половину длины волны радиус уменьшается в 23 раза, а на глубине, равной одной длине волны, он уменьшает-

ся более чем в 500 раз. Таким образом, *опустившись на глубину всего в половину длины волны, мы практически уже не ощутим волнения.* Поэтому понятие глубокой воды можно спокойно применять, начиная с глубин порядка длины волны.

Все сказанное о движении частиц в волне верно, как говорят, в первом приближении. При более строгом рассмотрении этого вопроса выясняется, что центры окружностей, описываемых частицами, вовсе не неподвижны, а медленно перемещаются по направлению волны. Действительное движение частиц следует рассматривать как *наложение двух движений*: быстрого кругового и медленного прямолинейного. Получается, что частицы движутся в действительности не по замкнутым траекториям, а по *разомкнутым*. Так как скорость кругового движения существенно больше скорости прямолинейного, то поэтому и возможно в первом приближении говорить об окружностях и использовать рисунки 14.9 и 14.10. Однако сделанное уточнение относительно

перемещения центров окружностей достаточно принципиально. Оно указывает на то, что приповерхностные водяные массы все же *перемещаются* в направлении волны, хотя, конечно, с гораздо меньшей скоростью, нежели сама волна. Именно это перемещение вод масс позволяет жителям побережий собирать всевозможные дары моря. Ранее мы не раз подчеркивали появление у морских волн острых гребней. Оказывается, что *заострение гребней* связано с перемещением частиц воды по направлению волны. Наконец, заметим, что указанное направление есть необходимое условие уменьшения радиуса орбит частиц воды по мере погружения.

Рассмотрим задачу. *Показать, что уменьшение радиусов орбит частиц с глубиной предполагает разомкнутость круговых траекторий частиц, что связано с их перемещением по направлению волны.* В этом нетрудно убедиться, если воспользоваться рисунком 14.10,б. На нем изображены две окружности: 1 — орбита А-частицы и 2 — орбита В-частицы. Радиус второй орбиты



14.10



меньше радиуса первой. Предположим, что в какой-то момент  $A$ -частица находится в точке  $A_1$ , а  $B$ -частица в точке  $B_1$ ; при этом между данными частицами помещаются, скажем, десять других частиц. Совершив половину оборота по своей орбите,  $A$ -частица приходит в точку  $A_2$ , соответственно  $B$ -частица оказывается в точке  $B_2$ . Остальные десять частиц также должны совершить свои пол-оборота и разместиться между  $A_2$  и  $B_2$ . Но вот беда: между  $A_2$  и  $B_2$  могут разместиться, как видно из рисунка, всего шесть частиц — ведь радиус орбиты 2 меньше радиуса орбиты 1. Напомним, что вода практически несжимаема, поэтому рассматриваемые здесь частицы не могут сжиматься. Получается, что не поместившиеся между  $A_2$  и  $B_2$  частицы оказались как бы выброшенными со своих круговых орбит. Так как все частицы одинаковы, то вывод о выбрасывании частиц с круговых орбит или, что то же самое, вывод о разомкнутости траекторий частиц, должен быть распространен на все частицы, включая, в частности, также  $A$ -частицу и  $B$ -частицу.

**Ветер и волны.** С детства все мы помним пушкинские строки:

Ветер по морю гуляет  
И кораблик подгоняет...

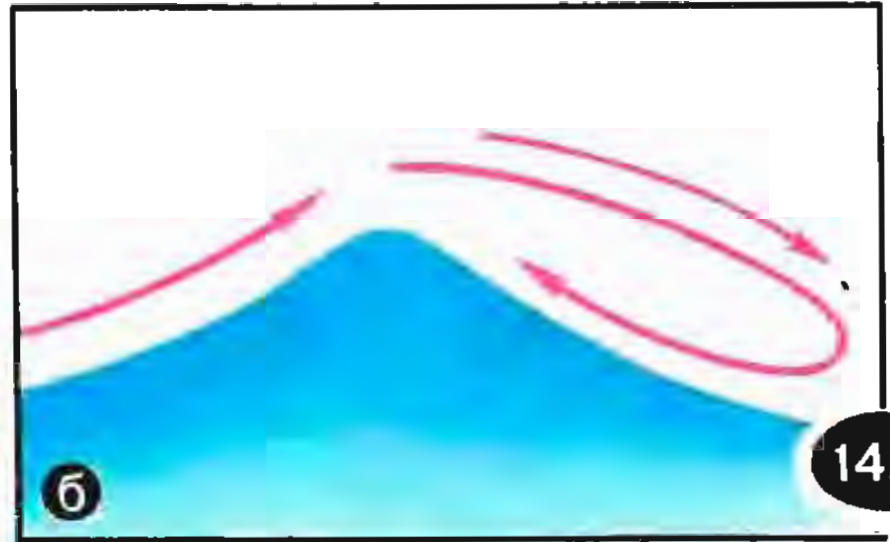
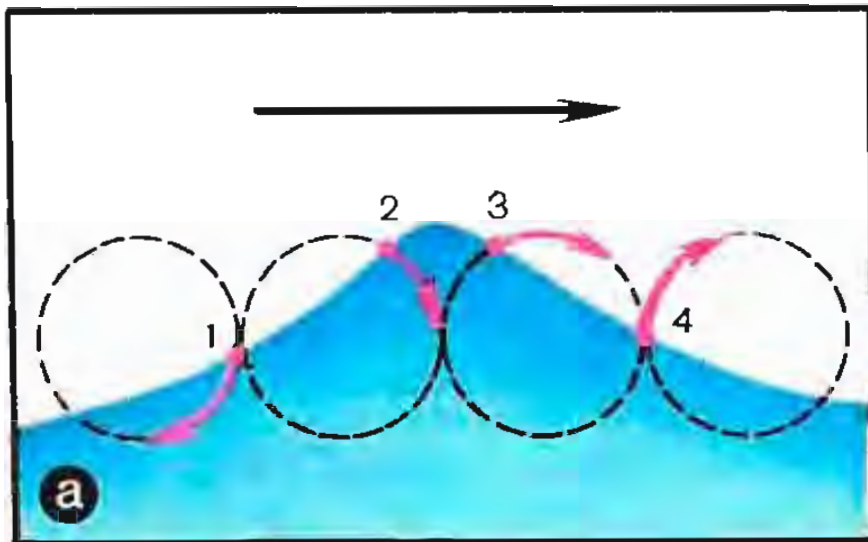
Примерно так представляли себе раньше возникновение ветровых волн. Но мы уже знаем, что быстрое движение волны — это всего лишь *движение волнового фронта*, а не частиц воды. Частицы при этом движутся приблизительно по окружностям и довольно медленно перемещаются по направлению волны. Так что нельзя считать, будто ветер подгоняет волну, толкая ее подобно тому, как он толкает парусник.

Как же передается волнам энергия ветра? Оказалось, что физический механизм передачи энер-

гии от ветра к волнам достаточно сложен. Ученые смогли более или менее разобраться в нем лишь в середине нынешнего столетия. Очевидно, что в рамках данной книги невозможно уделить этому вопросу должного внимания; в частности, мы не можем останавливаться на математической стороне дела. Ограничимся несколькими замечаниями качественного характера, позволяющими, как нам кажется, представить в общих чертах физику возникновения и нарастания ветровых волн.

Начнем с замечания о том, как *зарождается волна*. Представим себе идеальную горизонтальную поверхность воды, параллельно которой начинает перемещаться воздух (над спокойной водной гладью подул легкий ветерок). Мы знаем, что при этом поверхность воды начнет искривляться — на ней возникнут вспучивания и впадины, которые будут перемещаться по направлению ветра. Что же именно заставляет искривляться водную поверхность? Ответ на этот вопрос был найден, когда присмотрелись к «микроструктуре» воздушных потоков, возникающих над водой при появлении ветра.

Дело в том, что в действительности любой даже слабенький воздушный поток, строго говоря, не является ровным и плавным; в нем всегда присутствуют всевозможные *завихрения*, которые могут быть очень небольшими. Когда подобный маленький вихрь возникает вблизи поверхности воды, давление воздуха на поверхность в данном месте сразу же уменьшается. Таким образом, давление воздуха за пределами вихря оказывается больше, чем в области вихря. Вот это различие давлений



14.11

и приводит к тому, что доколе ровная поверхность воды *искривляется*. В том месте, где возник воздушный вихрь, поверхность слегка вспучивается, образуется водяной горбик. Так зарождается ветровая волна.

Теперь коснемся вопроса о том, как совершается передача энергии ветра в уже существующую волну. Пусть волна бежит слева направо (рис. 14.11, а). Выберем на гребне волны, рассматриваемом в некоторый момент времени, четыре частицы — две на левой стороне гребня (частицы 1 и 2) и две на правой (частицы 3 и 4). Частицы движутся по своим круговым траекториям, показанным на рисунке штриховыми линиями, при этом частицы 1 и 2 уходят в глубь водной массы, тогда как частицы 3 и 4, напротив, стремятся выйти из воды наружу (напомним в связи с этим рисунок 14.9). Ветер дует слева направо, поэтому его давление на левый склон гребня волны (на наветренный склон) будет больше, чем на правый (подветренный) склон. Следовательно, ветер будет подталкивать частицы 1 и 2 внутрь воды сильнее, чем тормозить выход частиц 3 и 4 из воды. Лучше сказать, что энергия, передаваемая ветром частицам 1 и 2 (точнее говоря, всем частицам на наветренном склоне гребня

волны), будет больше энергии, получаемой ветром от частиц 3 и 4 (от частиц подветренного склона гребня). Тем самым и осуществляется *накачка волны энергией ветра*.

Реальная картина передачи энергии от ветра к волнам осложняется тем, что волна, в свою очередь, воздействует на воздушный поток, распространяющийся над ней. Как показали исследования, за подветренной стороной гребня волны воздушный поток «заворачивается», образуя завихрение, показанное на рисунке 14.11, б. У самой поверхности воды воздух в этом вихре движется назад по отношению к направлению волны. Туда же, как мы уже отмечали, движутся и частицы воды, оказавшиеся в ложбине волны. Следовательно, эти частицы будут эффективно подгоняться воздушным потоком; в результате гребень волны будет *увеличиваться*, энергия волны будет *расти*.

Заметим, что одни ученые считают напор ветра на наветренные склоны гребней главной причиной роста ветровых волн, тогда как другие полагают, что главную роль играет передача энергии волне за счет возникновения завихрений над подветренными склонами гребней. Во всяком случае, необходимо принимать во внимание

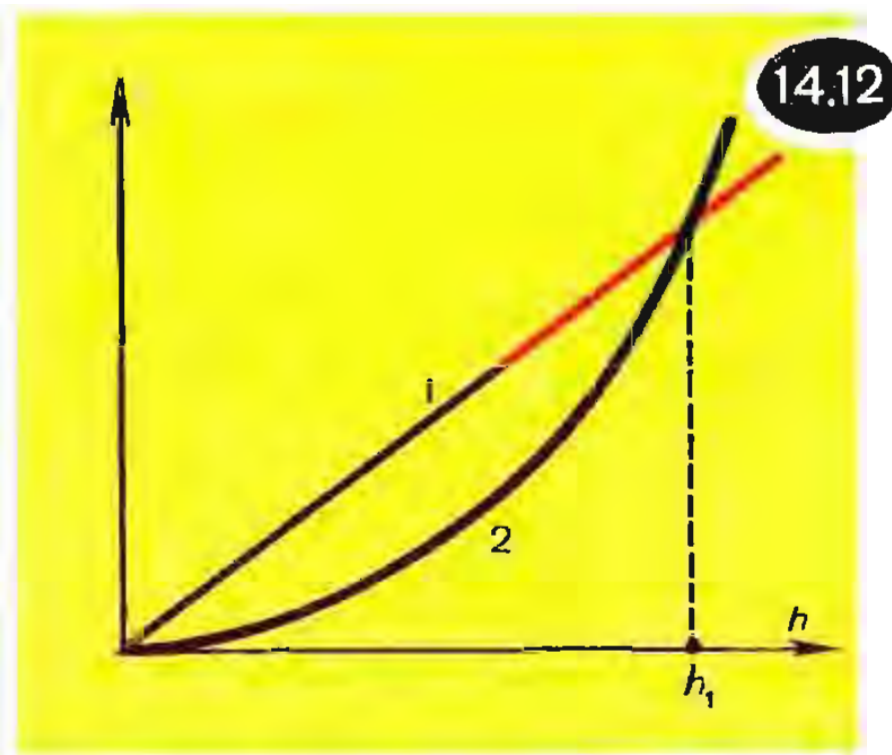


оба физических механизма передачи энергии от ветра к волнам.

Физически очевидно, что передача энергии волнам должна происходить тем интенсивнее, чем больше скорость ветра по сравнению со скоростью волны и чем выше гребень волны. Напомним, что на глубокой воде скорость волны тем меньше, чем меньше ее длина (см. (14.1)). Значит, при данной скорости ветра должны развиваться прежде всего более короткие волны, причем волнам «выгодно» расти в высоту, оставаясь при этом относительно короткими. Вначале все так и происходит, до тех пор, пока не включаются в игру два существенных фактора.

Первый фактор — неустойчивость волн. Волны с крутизной выше  $1/7$  оказываются неустойчивыми, они немедленно разрушаются. Второй фактор — быстрое увеличение с ростом высоты волн потерь, связанных с внутренним трением, т. е., проще говоря, потерь на нагревание воды (во время шторма море теплее, чем в штиль). Эти потери растут пропорционально квадрату высоты волны, в то время как поступление энергии ветра в волну растет пропорционально высоте. Отсюда следует, что на начальной стадии развития волн потери на трение несущественны, однако, по мере нарастания волн они начинают играть все более возрастающую роль, так что рано или поздно потери энергии на трение становятся равными поступлению энергии от ветра. И тогда дальнейшее развитие волн данной длины прекращается. Сказанное поясняет рисунок 14.12. Прямая показывает качественно, как меняется с высотой волн энергия, которая поступает в волны от

ветра. Кривая иллюстрирует зависимость от высоты волн энергии, теряемой на трение в воде. Графики относятся к волнам определенной длины и предполагают неизменность скорости ветра. Развитие волн прекращается, когда их высота достигает значения, отвечающего точке пересечения (если до этого не произойдет разрушение волн вследствие неустойчивости).



Отмеченные два фактора — неустойчивость волн и возрастание энергетических потерь за счет трения — объясняют, почему, в конечном счете, в общей картине развитого волнения преобладают не короткие высокие волны, а волны длинные пологие. Конечно, длинные пологие волны менее эффективно отбирают энергию у ветра, но зато они более устойчивы и, кроме того, у них заметно ниже потери на внутреннее трение. Последние два обстоятельства оказываются в итоге решающими. Относительно короткие волны рождаются и растут первыми, и первыми же они разрушаются, достигнув предельной высоты. Их энергия передается более длинным волнам.



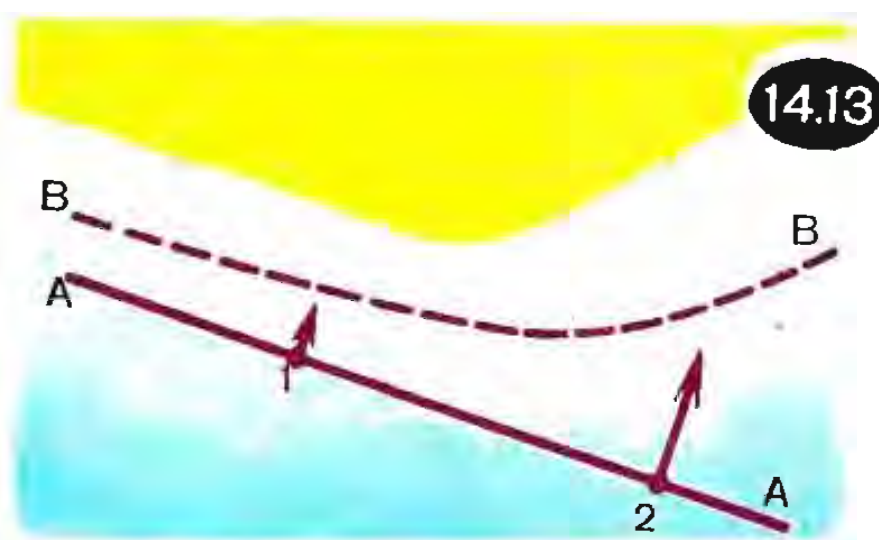
**Волны на мелководье.** Мы уже отмечали, что, приближаясь на мелководье к берегу, волна становится короче и выше, при этом верхняя часть гребня резко смещается вперед по ходу волны. В результате волна немедленно разрушается, производя шум, обильную пену, множество брызг. Все это нетрудно объяснить с физической точки зрения.

Как известно, на мелкой воде скорость волны определяется формулой (14.2). Из нее следует, что по мере уменьшения глубины  $H$ , т. е. по мере приближения волны к линии берега, скорость волны уменьшается. Это означает, что уменьшается кинетическая энергия волны. Уменьшение происходит за счет частичного превращения кинетической энергии в теплоту (в результате внутреннего трения в воде и трения воды о поверхность дна), а также за счет некоторого увеличения потенциальной энергии волны. Последнее как раз и связано с ростом высоты волн. Одновременно с ростом высоты наблюдается сокращение длины волн, что следует непосредственно из соотношения

$$\lambda = vT = T\sqrt{gH}, \quad (14.4)$$

где  $T$  — период волны,  $v$  — ее скорость, определяемая по формуле (14.2).

В движении волны на мелководье участвует вся масса воды — от поверхности до дна. В этом случае становится существенным трение воды о дно. Оно приводит к тому, что нижние слои воды (придонные слои) сильно затормаживаются и не успевают за верхними слоями. Именно поэтому гребень волны утрачивает симметричную форму, характерную для волн на глубокой воде.



Нетрудно объяснить также тот факт, что вблизи берега волны ориентируются, как правило, параллельно береговой линии. Это связано с рефракцией волн на мелководье — явлением оптической и акустической рефракции. Рисунок 14.13 поясняет, в чем заключается рефракция волн. Прямая — фронт идущей к берегу волны, рассматриваемый в некоторый момент времени. Выберем две точки на этом фронте. Правая точка находится на более глубоком месте, чем левая, поэтому скорость движения фронта вблизи первой





точки выше, чем вблизи второй. В результате происходит рефракция — фронт волны искривляется, принимая форму пунктирной линии, которая копирует форму береговой линии.

**Рифели.** В заключение отметим одно интересное явление, наблюдаемое на песчаном мелководье при слабом волнении. Дно покрывается множеством застывших песчаных волн, образующих довольно регулярные ряды, ориентированные параллельно берегу; эти неподвижные волны называют *рифелями*. На рисунке 14.14,а показана картина рифелей на морском дне, сфотографированная во время отлива.

На первый взгляд образование рифелей может показаться странным. Перемещающиеся на мелководье водные массы совершают попеременно движения к берегу и от берега. Двигаясь к берегу, вода увлекает песчинки поверхности дна вперед, а двигаясь от берега, она увлекает их назад. Казалось бы, результат одного движения должен уничтожаться

встречным движением. Откуда же берутся рифели?

Предположим, что горизонтальный поток воды, распространяющийся вместе с волной, скажем, слева направо, встречает небольшую песчаную горку — зародыш будущего рифеля. На левый склон зародившегося рифеля вода принесет песчинки, которые она увлекает за собой благодаря трению. В то же время над правым склоном рифеля возникает водяное завихрение, аналогичное воздушному завихрению, изображенному на рисунке 14.11,б. Это завихрение будет наметать песчинки со стороны правого склона к вершине рифеля. Таким образом, рифель будет расти как слева, так и справа. При этом, как легко видеть из рисунка 14.14,б, он должен приобретать асимметричный профиль. Но вот волна движется назад — справа налево. Теперь правая сторона рифеля будет расти за счет песчинок, увлекаемых завихрением. В результате профиль сформировавшихся рифелей оказывается не асимметричным, а таким, как он показан на рисунке 14.14,в.

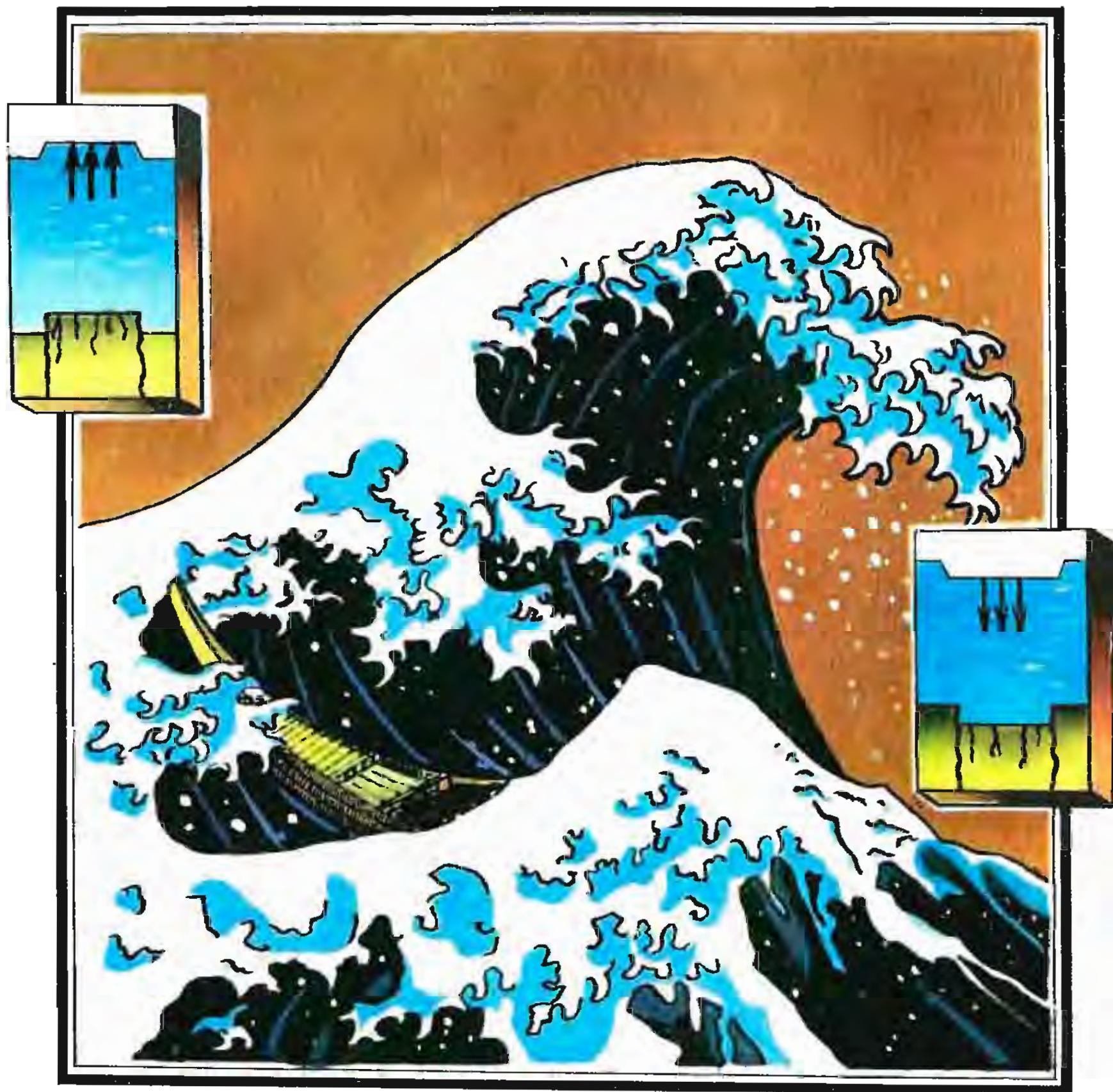
Глава

# 15

## нашествие волн

Вздымаются волны как горы  
И к тверди возносятся звездной,  
И с ужасом падают взоры  
В мгновенно разрытые бездны...

*А. К. Толстой*





Существует старинная литовская легенда о рыбацкой дочери Неринге и ее женихе отважном охотнике Наглисе.

Много горя приносил людям злобный король моря и ветров Гальвирдас — девятиглавый змей. Любил он гнать на берег высокие волны, заливать поля и луга, смывать в море дома вместе с людьми. И вот придумала Неринга насыпать в море длинный вал и отгородиться им от коварного Гальвирдаса. Всем людям понравилась эта мысль. Сообща взялись они за дело и построили в море как раз поперек устья Нямунаса песчаную косу. Но не утихомирился Гальвирдас — с удвоенной яростью стал бушевать в открытом море, без счета топить корабли. Тогда на помощь людям пришел молодой охотник Наглис, жених Неринги. Вызвал он девятиглавого змея на бой и победил его — срубил ему волшебным топором все девять голов. С тех пор перестали волны нападать на литовские берега и опустошать их. В благодарность люди назвали именем Неринги узкую песчаную косу, которая и поныне отделяет Куршский залив от Балтийского моря, а именем Наглиса назвали гору вблизи Паланги.

Такова легенда о том, как люди защитились от нападения морской стихии. К сожалению, в действительности человек часто оказывается бессильным перед внезапным и мощным нашествием морских волн.

Издавна эти нашествия приносили людям неисчислимые бедствия. Опасны разгулявшиеся волны в открытом море, но во много раз страшнее и опаснее они тогда, когда внезапно набрасываются на берег.

Я трепещу, когда, валы вздымая,  
Ты восстаешь кичливо до небес  
И, облака волнами подпирая,  
Шумишь, как вихрь, волнуешься, как лес.  
О, если б знать мне мысль твою, стихия,  
Что волны мне так шумно говорят,  
О чем режут их вопли вековые!

Так обращался к разбушевавшемуся морю русский поэт Н. Ф. Щербина.

Многие легенды рассказывают о гибели в морских волнах городов и даже целых стран. Согласно одной из таких легенд был поглощен морем Дваравати — священный город Индии. Со слов Платона человечество узнало о существовании и внезапной гибели в морских волнах могущественной Атлантиды.

Благодаря исследованиям историков, археологов, геологов, океанологов мы теперь знаем, что в основе многих легенд лежат действительные события. Так, установлено, что описание потопа в Библии является пересказом шумеро-вавилонского предания об исключительно сильном наводнении, случившемся в давние времена в нижнем течении Евфрата и затопившем почти всю Месопотамскую низменность. По-видимому, такое наводнение действительно произошло. Причиной его был, по всей вероятности, мощный тропический циклон в Персидском заливе, который вызвал обильные дожди и нагнал огромные волны из залива в устье Евфрата, а затем и в долину реки.

Легендарная Атлантида, по имеющимся сегодня данным, существовала на самом деле. Только не в Атлантическом океане, как полагали ранее, а в Средиземноморье, точнее, в Эгейском море. Ее центром являлась группа остро-

вов, примыкавшая к острову Крит с северной стороны. Атлантида была процветающим государством с необычайно высокой для того времени культурой. Археологи назвали ее *критомикенской культурой*; она была открыта лишь в начале XX в. (честь открытия принадлежит Артуру Эвансу). Поразительнее любой легенды оказался тот факт, что четыре тысячи лет назад жил народ, имевший письменность, законы и деньги, построивший прекрасные дворцы, города с мощеными улицами и многоэтажными домами, огромный морской флот, создавший замечательные изделия из глины, золота, олова, меди. Искусство Атлантиды оказало огромное влияние на классическое искусство Древней Греции, достигшее своего расцвета значительно позднее — спустя тысячу лет. И вот такая удивительная цивилизация внезапно погибла! Это произошло примерно 3,5 тысячи лет назад. Основным событием, приведшим к катастрофе, было извержение вулкана Санторин, сопровождавшееся взрывом и мгновенным опусканием вниз, в морскую пучину значительных участков суши. При этом произошло сильное землетрясение, возникли гигантские морские волны цунами, выпал обильный пепел. Атлантида частично провалилась в море, частично была смыта гигантскими волнами, частично засыпана толстым слоем пепла.

«Всемирный потоп» и гибель Атлантиды — это были, пожалуй, наиболее крупные нападения морской стихии на сушу. Недаром они породили легенды. А сколько же было не столь масштабных, но тем не менее весьма разрушительных нашествий морских волн, сопро-

вождавшихся многочисленными человеческими жертвами! По своей физической природе все эти нашествия можно разделить на две группы. К одной группе следует отнести огромные волны, обрушивающиеся на берега после того, как в море произошло сильное землетрясение. Японцы дали этим волнам название *цунами*, что дословно означает «большая волна в гавани». К другой группе отнесем *катастрофические наводнения* в прибрежных районах, в частности в устьях и низовьях рек, вызванные действием *сильных циклонов*.

**Бедствия, причиняемые волнами цунами.** В результате археологических раскопок холма Рас-Шамра вблизи города Латакия в Сирии были найдены глиняные таблички, поведавшие нам об уничтожении древнего финикийского города Угарит огромной морской волной. Эти таблички — одно из наиболее древних сообщений о цунами. В них шла речь о цунами, которая возникла в восточной части Средиземного моря при взрыве вулкана Санторин в XV в. до н. э. Этот взрыв как раз и был главной причиной гибели Атлантиды.

Тридцать пять столетий отделяют нас от того времени, когда погибла Атлантида. В течение этих столетий крупные цунами много раз обрушивались на берега, унося всякий раз тысячи и даже десятки тысяч человеческих жизней. Чаще всего цунами возникают у берегов Тихого океана — на побережье Южной Америки, Новой Зеландии, Индонезии, Японии, на Алеутских островах и Камчатке (около 75% всех случаев). Реже они наблюдаются в Средиземном море (12%) и у берегов





Центральной Атлантики (10%). Все эти районы являются районами *повышенной сейсмичности*, т. е. районами, где относительно часто происходят землетрясения.

Приведем данные о некоторых наиболее разрушительных цунами.

В августе 1863 г. в Индонезии в результате землетрясения, связанного с извержением вулкана Кракатау, возникла волна высотой 30 м (у берегов Зондского пролива). Погибло 35 тыс. человек.

В августе 1868 г. после сильного землетрясения возникла катастрофическая волна цунами с очагом вблизи южного побережья Перу и северного побережья Чили. Высота волны, которая обрушилась на побережье от Чалы до Икике, превышала 10 м. В Арике волна оказалась высотой 18 м, она полностью смыла город в море, оставив на его месте песчаную долину без следов застройки. Три военных корабля, стоявших на рейде, были выброшены на берег. Погибло 25 тыс. человек. Цунами прокатилась от берегов Южной

Америки через весь Тихий океан; на побережье Новой Зеландии высота волны достигла 5 м.

В июне 1896 г. катастрофическая цунами обрушилась на остров Хонсю в Японии. Наибольший подъем воды составил 30 м. Волна смыла в море 10 тыс. зданий, унесла более 30 тыс. человеческих жизней. Примерно через сорок лет, в марте 1933 г. остров Хонсю снова пострадал от сильной цунами.

В мае 1960 г. после сильнейшего землетрясения на побережье Чили обрушилась катастрофическая цунами. Высота волны достигала 20 м. Оказался полностью разрушенным город Консепсьон. Были превращены в развалины Вальдивия, Пуэрто-Монт и ряд других городов. Землетрясение и цунами превратили в руины территорию, превышающую по площади Великобританию.

В марте 1964 г. огромная цунами возникла у берегов Аляски и Алеутских островов. Максимальный подъем воды равнялся 30 м. На рисунке 15.1 можно видеть некоторые последствия этой цунами в прибрежном районе Аляски: исковерканные железнодорожные пути, остатки поезда, сброшенного волной с рельсов.

На нашем Тихоокеанском побережье с начала XVIII в. по 1980 г. зарегистрировано 60 случаев цунами, из них 30 разрушительных — с подъемом воды, составляющим несколько метров. Одной из наиболее сильных оказалась цунами, возникшая 5 ноября 1952 г. Вот подробное описание произошедших событий, опубликованное в Бюллетене Совета по сейсмологии АН СССР. Оно интересно тем, что дает наглядное представление об этом грозном природном явлении.

«В ночь с 4 на 5 ноября 1952 г. около 4 час по местному времени жители Северо-Курильска были разбужены семибалльным землетрясением. Разрушались печи, падали печные трубы, люстры сильно раскачивались. Перепуганные люди выбегали из домов. После прекращения толчков бóльшая часть населения стала возвращаться в дома. Лишь те, кто раньше был знаком с цунами, в том числе корейцы-рыбаки, несмотря на спокойное море, после первого же толчка бросились к горам. Через 45 мин после начала землетрясения послышался громкий гул со стороны океана, и через несколько секунд на город обрушилась высокая волна, двигавшаяся с огромной скоростью и имевшая наибольшую высоту (более 5 м) в центральной части города, где она катилась по долине речки. Через несколько минут волна отхлынула в море, унося с собой все разрушенное. Отступление волны было столь интенсивным, что обнажилось дно на протяжении нескольких сотен метров. Наступило затишье. Через 15 мин на город обрушилась вторая, еще более высокая волна; она достигала высоты 10 м. Эта волна нанесла особо сильные разрушения, смывая все постройки по пути. Позади волны на месте оставались лишь цементные фундаменты домов. Прошедшая через город волна достигла склонов окружающих гор, после чего начала скатываться обратно в котловину, расположенную ближе к центру города. Здесь образовался огромный водоворот, в котором с большой скоростью вращались всевозможные обломки строений и мелкие суда. В течение нескольких минут в этом водовороте погибло много людей.



Откатываясь, волна ударила с тыла в береговой вал, на котором сохранилось несколько домов, и в обход горы прорвалась в Курильский пролив. Участок берегового вала и гора на несколько минут стали островом. Через несколько минут после второй волны пришла более слабая третья волна, которая вынесла на берег много обломков. В 9 час утра наблюдались сильные колебания уровня океана, которые, слабея, повторялись в течение всего дня 5 ноября».

На рисунке 15.2 дана фотография волны цунами, приближающейся к берегу. Волна выглядит как высокий и ровный водяной вал, протянувшийся в длину на многие километры.

**Закономерности цунами.** Цунами — длинные морские (лучше сказать, океанские) волны, возникающие главным образом при подводных землетрясениях, когда происходят быстрые смещения участков морского дна. Цунами



могут возникать также в результате взрывов подводных вулканов и сильных обвалов. *Длина волн цунами составляет десятки и даже сотни километров.*

Подчеркнем, что в открытом море цунами не только не разрушительны, но, более того, они незаметны. Чтобы зарегистрировать их, нужны специальные приборы. Дело в том, что в открытом море высота волн цунами не превышает 1...3 м. В то же время, как мы уже говорили, длина волны измеряется десятками и сотнями километров. Если такая волна, обладающая огромным запасом энергии, стремительно пронесется под кораблем, тот всего лишь плавно приподнимется, а затем столь же плавно опустится (иногда наоборот — сначала опустится, а затем приподнимется). А проносится волна цунами по океанским просторам *поистине стремительно*: со скоростью 700...1000 км/ч. С такой же скоростью, кстати говоря, летит современный реактивный лайнер.

Возникнув, волна цунами способна пройти по океану тысячи и десятки тысяч километров, *почти не ослабевая*. Так, зародившись у побережья Южной Америки, цунами может через 20 ч достичь берегов Японии и при этом натворить там немало бед.

*Будучи совершенно безопасной в открытом океане, волна цунами становится крайне опасной в прибрежной полосе.* Всю свою неистощенную огромную энергию вкладывает она в сокрушительный удар по берегу. При этом скорость волны снижается до 100...200 км/ч, существенно уменьшается ее длина; высота же возрастает до десятков метров. Вода, которую волна выплескивает на берег, может

достигать точек, находящихся на высоте нескольких сотен метров над уровнем моря.

Появлению цунами предшествуют подземные толчки. Кроме того, может наблюдаться довольно интенсивное свечение моря, о чем мы уже говорили в главе 11. В одних случаях непосредственно перед приходом цунами море сильно отступает от берега; при этом дно может обнажиться на сотни метров. В других случаях этого не происходит, гребень волны появляется у берега без предшествующего его появлению кратковременного отлива. Обычно цунами приходит в виде не одной, а нескольких волн, следующих одна за другой. Наиболее разрушительными оказываются первая либо вторая волна.

Полезно провести сравнение волн цунами с сильными ветровыми (штормовыми) волнами. Прежде всего они различаются по скорости распространения и притом довольно существенно. Как отмечалось ранее, скорость установившихся штормовых волн составляет 0,8 от скорости ветра. Скорость сильного ветра (8...10 баллов) равна 20...30 м/с. Значит, скорость штормовых волн следует оценить 60...90 км/ч. Это, конечно, большая скорость. Однако скорость цунами на порядок выше (700...1000 км/ч). Длина штормовых волн не превышает 100...500 м, длина же цунами в 100...1000 раз больше. В то же время высота штормовых волн в открытом океане не доходит до 10...20 м, а высота цунами не превышает 1...3 м. Следовательно, крутизна штормовых волн оказывается в тысячи и десятки тысяч раз больше крутизны волн цунами. Поэтому опасны для судов в открытом океане именно

штормовые волны; что же касается волн цунами, то, как мы уже говорили, без специальных приборов их даже обнаружить практически невозможно.

Совсем иное дело — волны в прибрежной полосе. Теперь по степени опасности на первое место выходят волны цунами. Штормовые волны в прибрежной полосе производят куда меньше разрушений, нежели цунами. Было бы неправильно объяснять это только тем, что высота волн цунами может увеличиться при подходе к берегу до 40...50 м, тогда как высота штормовых волн в прибрежной полосе редко превышает 20...30 м. Волна цунами высотой всего 10 м во много раз более опасна, чем штормовая волна высотой 20 м. Дело в том, что штормовые волны имеют существенно меньшую длину и скорость по сравнению с цунами; кроме того, они наносят по берегу разрозненные удары, каждый из которых приходится на маленький участок береговой линии. Волна же цунами стремительно подходит к берегу *единым водяным валом (водяной стеной)* протяженностью в десятки километров и более, в результате на берег сразу обрушиваются огромные массы воды. Вот эта монолитность прибрежной волны цунами в сочетании с ее высотой, огромной длиной, а также большой скоростью движения и делает ее удар столь катастрофическим для береговых построек, судов, стоящих на рейде, и, разумеется, людей, оказавшихся в пределах досягаемости волны.

**Физика цунами.** Наверное, все знают сказку о Садко. Вспомним, как попал Садко в подводный дво-

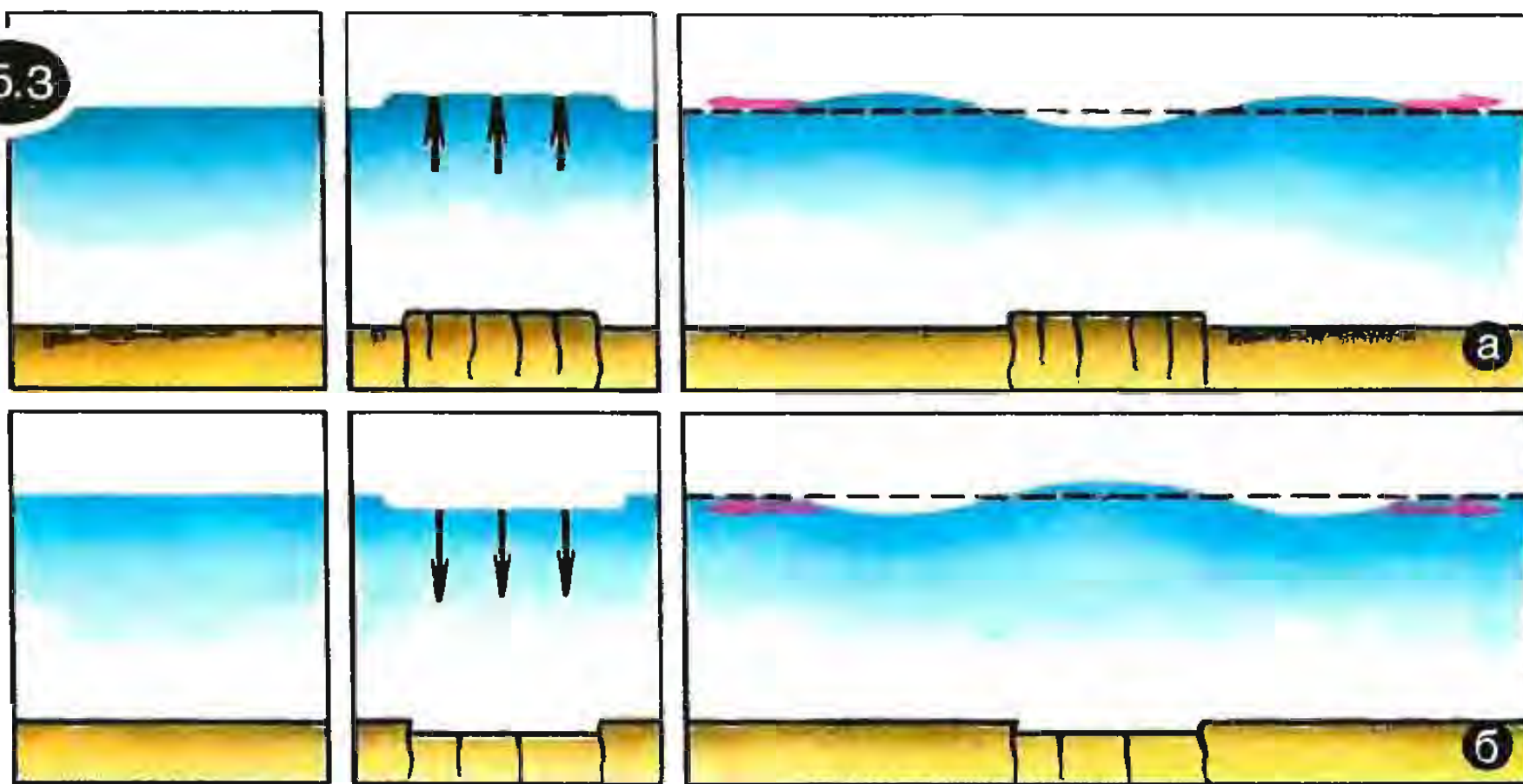
рец морского царя и как пришлось ему, по требованию хозяина дворца, играть на гуслях. «Заиграл Садко задорно, весело. Гости за столом усидеть не могли, выскочили из-за столов да и в пляс пустились. И так расплясались, что на море-океане великая буря началась. И много в ту ночь кораблей сгинуло. Страсть сколько людей потонуло!» Как говорится, «сказка ложь, да в ней намек». Помня об этом, попробуем оценить с позиции физики, что верно и что неверно в описанной сцене из сказки. Пляску гостей в подводном царстве можно сопоставить с подводным землетрясением. Согласно сказке, сотрясения на дне передались на поверхность моря и вызвали там сильное волнение.

Передача сотрясения от дна к поверхности моря действительно происходит; именно так и зарождается волна цунами. Неправильно, однако, то, что эта передача вызвала сильное волнение в открытом море. Мы уже знаем, что в открытом море волна цунами совершенно безобидна; ее крутой нрав обнаружится лишь тогда, когда она добежит до берега.

Итак, предположим, что вследствие землетрясения, взрыва подводного вулкана или сильного обвала некоторый участок морского дна быстро сместился, например, вверх. Поскольку вода практически несжимаема, то почти тотчас сместится вверх и соответствующий участок поверхности моря — на водной поверхности возникнет небольшой по высоте холм. Это и есть очаг цунами; от него, как от брошенного в воду камня, побежит во все стороны волна. На рисунке 15.3 схематически показано, как зарождается цунами в



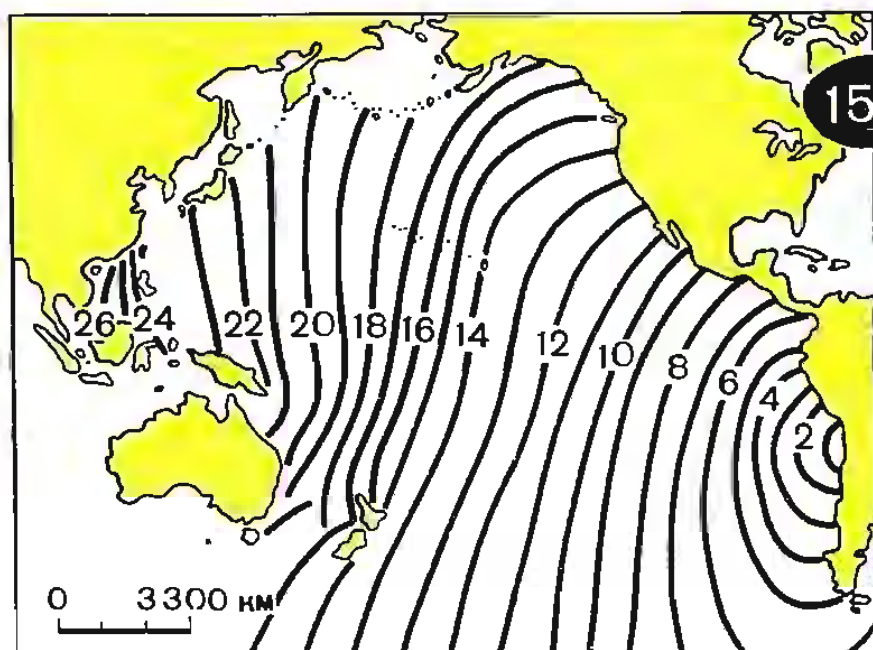
15.3



двух случаях: а) участок дна сместился *вверх*, б) участок дна сместился *вниз*. В первом случае цунами распространяется *приливной волной вперед*, а во втором случае — *отливной волной вперед*. Именно во втором случае наблюдается кратковременное отступление моря от берега непосредственно перед появлением гребня волны цунами.

Вся жизнь волны цунами может быть разделена на четыре последовательных этапа. Первый этап — *зарождение волны*. Второй этап — *движение волны по просторам океана*. Третий — *взаимодействие волны с прибрежной зоной*. Четвертый — *обрушивание гребня волны на береговую полосу*, перемещение водных масс над сушей.

О зарождении цунами мы уже говорили. Рассматривая движение цунами по океанским просторам, необходимо принять во внимание огромную длину этих волн, во много раз превышающую глубины океанов. Для волн цунами все моря и океаны являются мелкой



водой. Поэтому скорость распространения цунами описывается формулой (14.2):  $v = \sqrt{gH}$ . Допустим, что глубина океана равна 4 км. Подставляя в упомянутую формулу значения  $g = 10 \text{ м/с}^2$  и  $H = 4000 \text{ м}$ , получаем

$$v = 200 \text{ м/с} = 720 \text{ км/ч.}$$

Высота и длина волны цунами (а значит, и ее энергия) зависят от силы подземных толчков, от того, насколько близко к поверхности дна находится эпицентр землетрясения, от глубины моря в данном районе. Очевидно, что

волна цунами будет тем мощнее, чем крупнее масштабы смещения дна и чем быстрее совершаются эти смещения. Все это, однако, не влияет на скорость волны цунами, которая определяется фактически только глубиной океана. В разных точках океана глубина различна; соответствующим образом будет изменяться и скорость цунами. Зная рельеф океанского дна и место зарождения цунами, можно рассчитать, через какое время волна добежит до того или иного побережья.

На рисунке 15.4 приведены полученные с использованием ЭВМ последовательные положения фронта чилийского цунами 22 мая 1960 г. Видно, что через 14 ч волна пришла на Гавайские острова и к Новой Зеландии, через 19 ч она достигла берегов Австралии, а через 22 ч берегов Японии.

Рассмотрим задачу. Как будут отличаться моменты прихода волны цунами в пункты  $B$  и  $C$ , отстоящие от очага цунами  $A$  на 1000 км (рис. 15.5), если к северу от  $A$  глубина океана  $H_1=4$  км, а к югу  $H_2=1$  км?

Обозначим расстояния  $|AB|$  и  $|AC|$  через  $L$ . В пункт  $B$  волна придет через время  $t_1=L/\sqrt{gH_1}$ , а в пункт  $C$  через время  $t_2=L/\sqrt{gH_2}$ . Используя численные значения величин, находим:  $t_1=5000$  с=83,5 мин;  $t_2=10^4$  с=167 мин. Таким образом, в пункт  $C$  цунами придет на  $t_2-t_1=83,5$  мин позже, чем в пункт  $B$ .

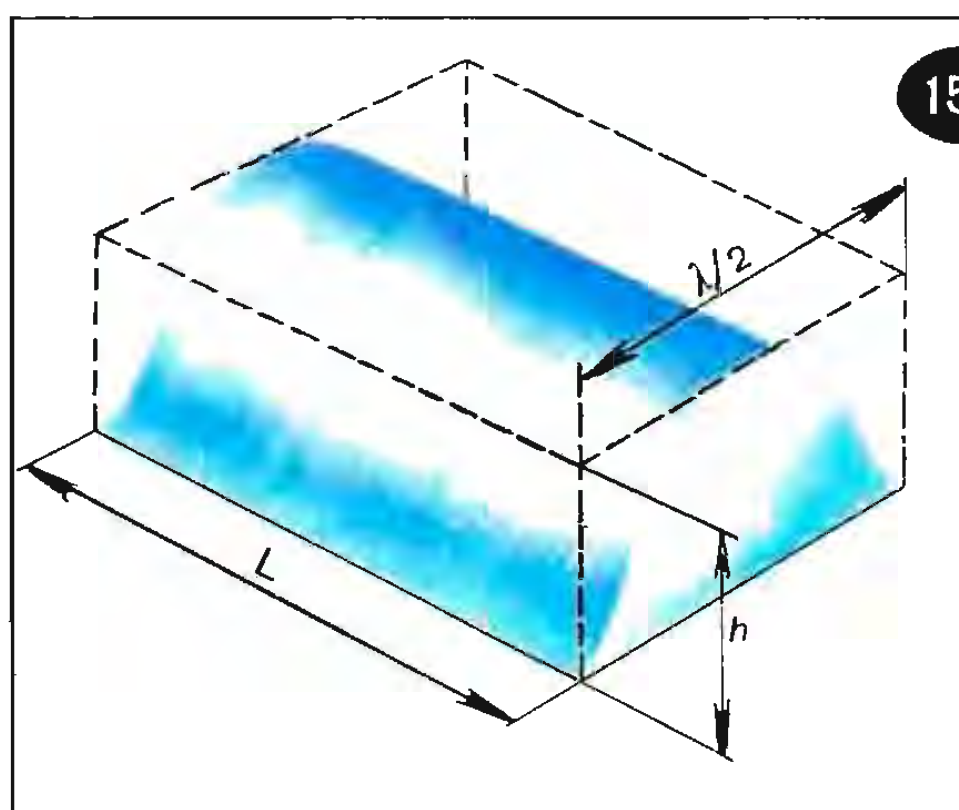
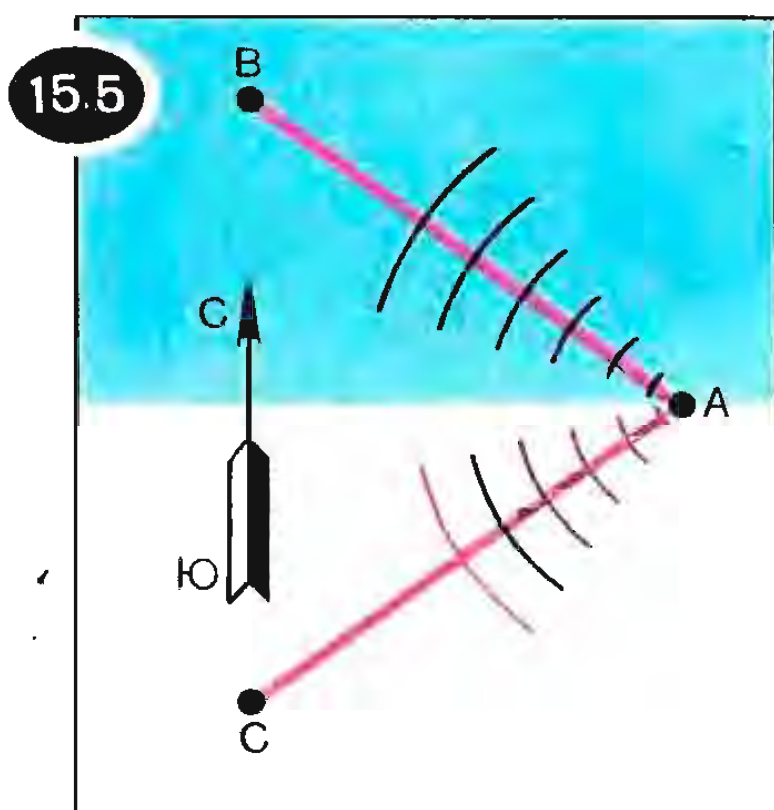
Когда цунами приближается к побережью, начинается третий этап ее жизни — существенно уменьшаются скорость и длина волны, начинает расти ее высота. Предположим, что волна переместилась от линии, где глубина  $H_1$ , к линии, где глубина  $H_2$  ( $H_2 < H_1$ ). Скорость волны уменьшится при этом на величину

$$\Delta v = \sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2}, \quad (15.1)$$

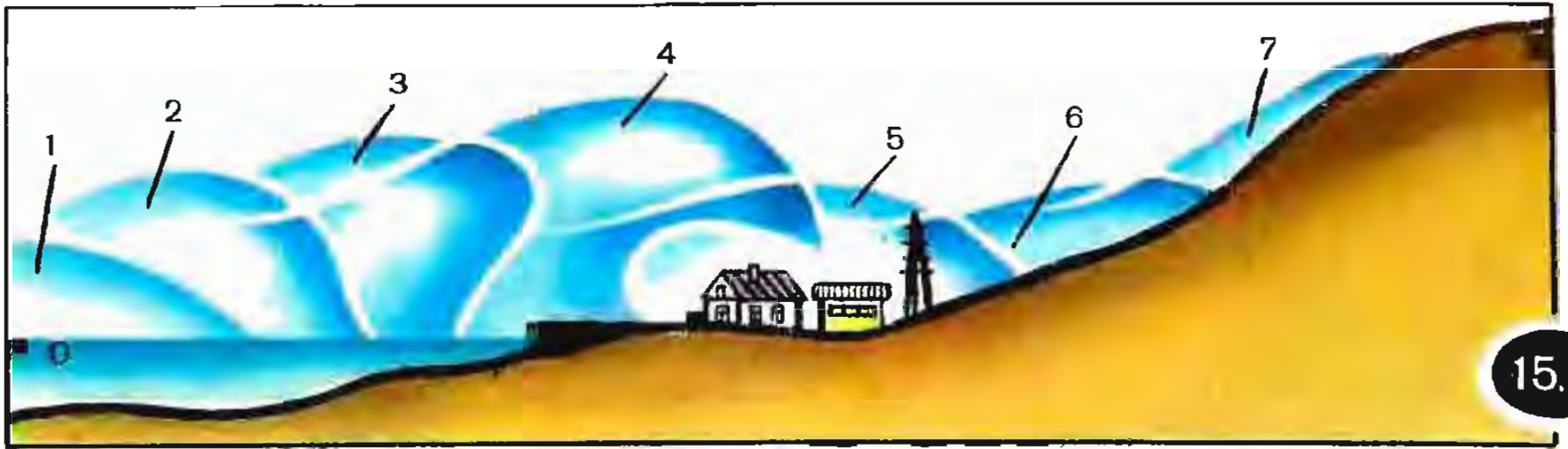
а длина волны сократится на величину

$$\Delta \lambda = T(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2}). \quad (15.2)$$

Записывая последнее выражение, мы воспользовались формулой 14.4 и считали при этом, что период волны  $T$  остается неизмен-







15.7

ным. Чтобы оценить увеличение высоты волны, будем рассуждать следующим образом. Выделим участок волнового фронта протяженностью  $L$  и оценим потенциальную энергию массы воды, поднятой гребнем волны, имеющим высоту  $h$  (рис. 15.6). Если бы гребень волны имел прямоугольную форму, изображенную на рисунке штриховыми прямыми, то искомая потенциальная энергия была бы равна

$$E = mg \frac{h}{2} = \left( \rho L h \frac{\lambda}{2} \right) g \frac{h}{2} = \frac{1}{4} \rho L g h^2 \lambda, \quad (15.3)$$

где  $m$  — масса воды в объеме гребня волны,  $\rho$  — плотность воды. Но гребень волны, конечно, не имеет прямоугольной формы, поэтому вместо (15.3) запишем

$$E = \alpha \rho L g h^2 \lambda, \quad (15.4)$$

где  $\alpha$  — некоторое число (очевидно, что  $\alpha < 1/4$ ). Будем полагать, что по мере перемещения с относительно глубокого места (где параметры волны есть  $h_1$  и  $\lambda_1$ ) на более мелкое (где параметры волны  $h_2$  и  $\lambda_2$ ) сохраняется величина  $E$ , которую можно рассматривать как меру энергии, запасенной в волне. Тогда из (15.4) получаем

$$h_1^2 \lambda_1 = h_2^2 \lambda_2. \quad (15.5)$$

С учетом формулы  $\lambda = T \sqrt{gH}$  находим отсюда

$$h_1^2 \sqrt{H_1} = h_2^2 \sqrt{H_2}$$

и, следовательно,

$$h_2/h_1 = \sqrt[4]{H_1/H_2}. \quad (15.6)$$

Это соотношение известно как закон Эри — Грина.

Рассмотрим задачу. Во сколько раз изменятся скорость, длина и высота волны цунами при ее перемещении от линии, где глубина  $H_1 = 5$  км, к линии, где глубина  $H_2 = 50$  м?

Обозначим параметры волны для глубины  $H_1$  через  $v_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $h_1$ , а для глубины  $H_2$  через  $v_2$ ,  $\lambda_2$ ,  $h_2$ . В данном случае  $H_1/H_2 = 100$  и поэтому, согласно (15.6),  $h_2/h_1 = 3,16$ . Исходя из того, что  $v = \sqrt{gH}$ , находим  $v_1/v_2 = \sqrt{H_1/H_2} = 10$ . Аналогично для длин волн:  $\lambda_1/\lambda_2 = 10$ . Предположим, что вдали от берега волна цунами имела скорость 1000 км/ч, длину 10 км, высоту 2 м. При приближении к берегу, на глубине 50 м, ее скорость уменьшится до 100 км/ч, длина сократится до 1 км, а высота увеличится до 6,3 м.

Заметим, что все эти расчеты являются приближенными. В частности, они явно не годятся, когда глубина воды становится порядка нескольких метров. В этом случае уже нельзя пренебрегать трением воды о поверхность дна и, кроме того, необходимо принимать во внимание, что теперь волна стано-

вится неустойчивой. Она обрушивается на берег — начинается последний (четвертый) этап в ее жизни.

На рисунке 15.7 показано в общих чертах, как изменяется профиль волны цунами на последнем этапе. Здесь 0 — уровень спокойного моря, 1—7 последовательные профили волны, обрушивающейся на берег и выбрасывающей на него огромные массы воды.

**Бедствия, причиняемые тропическими циклонами.** Жители Японии, Кореи, Китая, Австралии, Индии, южных районов США, Центральной Америки, островов Карибского моря знакомы с исключительно грозным природным явлением — *тропическими циклонами*. В Америке их называют *ураганами*, а на западном побережье Тихого океана *тайфунами*. Название «ураган» связано с именем бога бурь у древнего народа майя. «Тайфун» в переводе с китайского означает «очень большой ветер».

Великий тайфун 1281 г. уничтожил флот Хубилая, потомка Чингис-хана, и тем самым предотвратил завоевание монголами Японии. Это был, наверное, единственный случай, когда тропический циклон сыграл положительную роль. Все остальные циклоны причиняли только бедствия, разрушая города, затопляя огромные территории, унося многие тысячи человеческих жизней.

Отметим некоторые мощные тропические циклоны, зарегистрированные во второй половине нашего столетия.

В сентябре 1959 г. на Японию обрушился тайфун «Вера» (по странной иронии, тайфунам и ураганам дают женские имена). Насе-

ление Японии было предупреждено о приближении тайфуна, принимались все возможные меры предосторожности. И тем не менее погибли 5 тыс. человек, были ранены 32 тыс., остались без крова 1,5 млн. Тайфун уничтожил либо выбросил на берег более 400 судов, в том числе 12 океанских судов большого тоннажа. Более чем в 100 местах были разрушены железные дороги, огромное число автомобилей было сброшено с дороги, разбито вдребезги. На рисунке 15.8,а приведена фотография бывшей деревни в провинции Нагоя (Япония) после тайфуна «Вера»: остались лишь следы фундаментов домов.

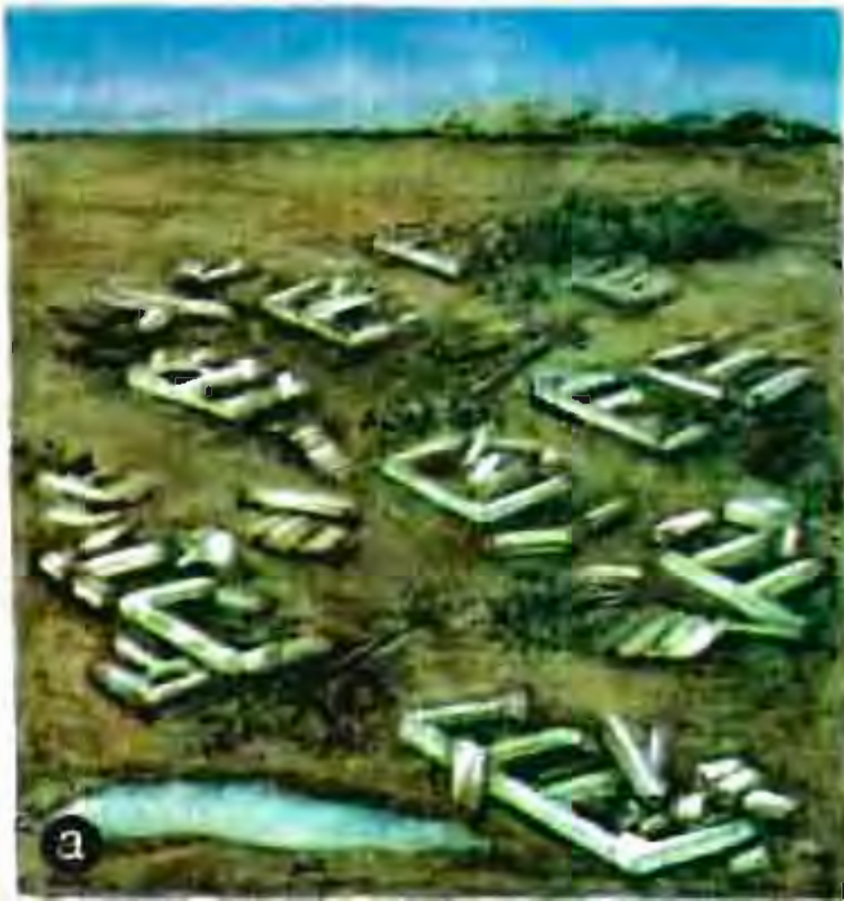
На рисунке 15,8,б можно видеть большое судно, выброшенное тайфуном на берег.

В июне 1962 г. мощный тропический циклон опустошил побережье Бенгальского залива в районе от Дакки до Читтагонга. Он унес 22 тыс. человеческих жизней.

13 ноября 1970 г. мощный тайфун обрушился на побережье Пакистана. Поднятая тайфуном волна высотой до 8 м прошла над густонаселенными островами и ударила по прибрежной полосе материка. Гигантская волна и ураганные ветры вызвали катастрофические разрушения. По официальным данным погибло более 300 тыс. человек.

Поистине, тропические циклоны представляют одно из наиболее грозных и разрушительных явлений природы. Они достаточно регулярно посещают определенные районы земного шара, при этом охватывают всякий раз значительные территории и могут существовать от нескольких суток до нескольких недель. Их исключительно высокую способность к





разрушению обуславливают три одновременно действующих фактора: ураганные ветры, скорость которых может достигать 400...500 км/ч; обильные и продолжительные ливни (до  $10^3$  мм за сутки и даже более); нагон на побережье гигантских штормовых волн (штормовые приливы).

Что же это такое — тропический циклон?

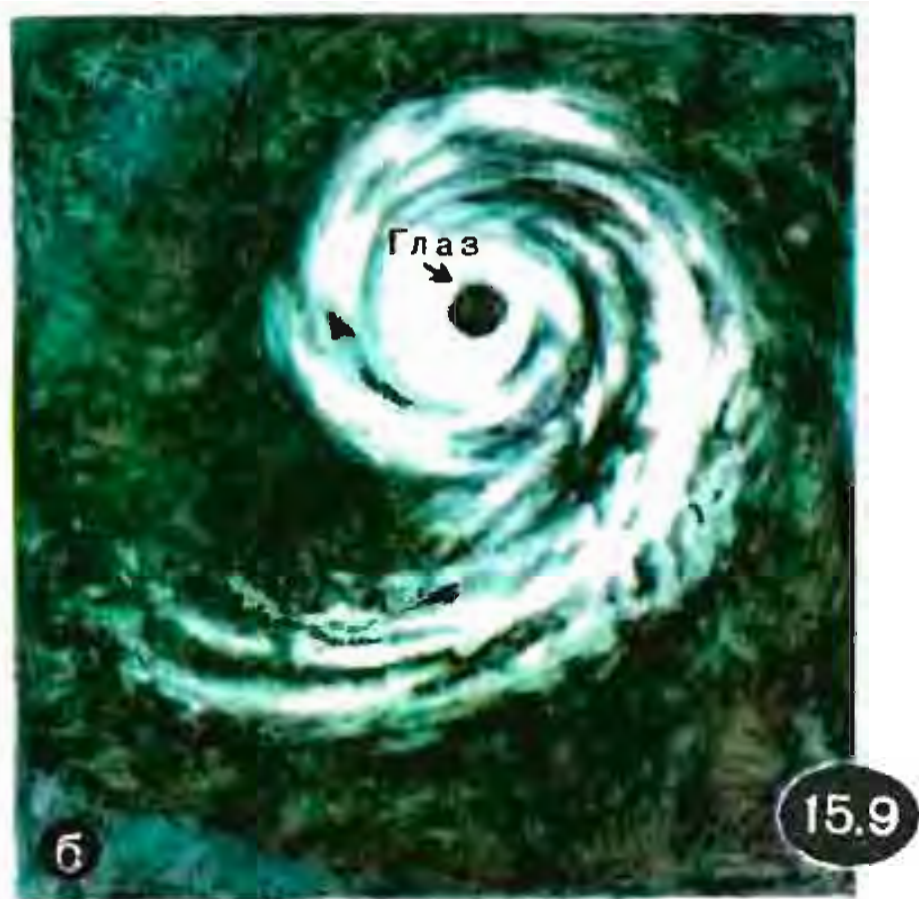
Чем он отличается от обычного циклона?

**Физика тропического циклона.** В главе 4 мы говорили об обычных (внетропических) циклонах. Обычный циклон возникает в результате взаимодействия друг с другом холодного и теплого воздушных фронтов. Он представляет собой крупномасштабный вихрь диаметром порядка 1000 км (он может быть и значительно больше — до 2000 км) и высотой от 2 до 20 км. Воздушные массы движутся в области циклона по спирали, закручивающейся к его центру (против часовой стрелки в

Северном полушарии и по часовой стрелке в Южном). В центре циклона давление воздуха ниже, чем на периферии, именно поэтомудвигающиеся по спирали воздушные массы стремятся к центру, где они затем поднимаются вверх, порождая сильную облачность. Скорость ветров в обычном циклоне не превышает, как правило, 50...70 км/ч.

Внетропические циклоны обычно не причиняют серьезных неприятностей. Лишь в редких случаях они сопровождаются очень сильными ветрами — вроде тех, которые возникли летом 1984 г. в центральном районе европейской части СССР. Кроме того, они могут вызывать опасные наводнения в устьях некоторых рек — таковы *ленинградские наводнения*, о которых мы поговорим отдельно. В остальном внетропические циклоны достаточно безобидны. Вполне понятно, почему жители средних и северных широт остаются совершенно спокойными, услышав сообщение метеослужбы о том, например, что в Северной





Атлантике зародился обширный циклон, который перемещается на юго-восток и в ближайшие сутки захватит северные районы Европы, Прибалтику, север европейской части СССР. Это означает, что скоро испортится погода, пойдут дожди — только и всего.

Совсем иное дело — тропический циклон. Мы уже познакомились с результатами деятельности некоторых таких циклонов. Тропический циклон поистине страшен — это ураганные ветры, ливни, наводнения, разрушения и многочисленные смерти.

Теперь посмотрим, как выглядят обычный и тропический циклоны сверху, например с орбитальной космической станции; соответствующие фотографии даны на рисунке 15.9: а) обычный циклон, б) тропический циклон. На обеих фотографиях хорошо видны вихри, сворачивающиеся по спирали в направлении против часовой стрелки (оба циклона наблюдались в Северном полушарии). Нетрудно заметить два различия на фотографиях: во-первых, тропи-

ческий циклон имеет меньший диаметр и более четкие очертания по сравнению с обычным циклоном, во-вторых, в центре тропического циклона есть небольшое темное пятно (его называют «глазом тайфуна»), тогда как, в свою очередь, у обычного циклона такого «глаза» нет.

Вот вроде бы и все различия. Как будто немного.

Однако в этом «немногом» отразилось то, что принципиально отличает тропический циклон от обычного.

Если в центре обычного циклона давление воздуха понижается до  $(9,5...9,6) \cdot 10^4$  Па, реже до  $9,3 \times 10^4$  Па (это соответствует 713...720 мм рт. ст. и 698 мм рт. ст., так как  $1 \text{ Па} = 0,75 \text{ мм рт. ст.}$ ), то в центре тропического циклона давление падает более сильно — до  $9 \cdot 10^4$  Па (675 мм рт. ст.). Диаметр области тропического циклона, как правило, в несколько раз меньше характерного диаметра обычных циклонов — он составляет 200...500 км. Сильное снижение давления в центре и отно-



сительно малый диаметр области тропического циклона указывают на наличие большого перепада (лучше сказать, градиента) давления в радиальном направлении. Поэтому ветер в тропическом циклоне достигает исключительно огромной силы — его скорость, как мы уже отмечали, может стать равной 400...500 км/ч.

При подобных скоростях воздух воспринимается как некая твердая субстанция, наносящая удары, подобные ударам пушечных ядер. Как писал исследователь тайфунов Пьер Андре Молэн, «Такие ветры вызывают пугающее ощущение, что рушатся все нормальные отношения между живым существом и окружающим его миром... При тайфуне воздух, извечный источник жизни, ее постоянная поддержка и пища, внезапно становится врагом. Мирная кормилица превращается в безумную фурию... И действительно, пушечный выстрел — это, пожалуй, единственное подходящее сравнение такого ветра».

Скорость ветра возрастает по мере приближения к центру циклона. Ветры бешено крутятся, но не могут перейти некоторого предела, оставляя в самом центре циклона область диаметром 10...40 км, где царит затишье — знаменитый глаз тайфуна. Область глаза характеризуется наиболее низким атмосферным давлением и повышенной температурой. Вдоль границы этой области с внешней стороны возникает особенно сильный восходящий поток теплого воздуха.

В книге П. А. Молэна «Охотники за тайфунами» есть очень яркое описание внутренней области глаза: «Мы летим на 3 км в колодце диаметром 22 км, в ко-

тором плавают несколько перистых облаков, мирных, как игрушки. Стены этого колодца представляет как бы недвижимая буря, удерживаемая таинственной причиной. Она наполнена кипящими облаками, охваченными жесточайшими конвульсиями. Когда самолет кренится на виражах, глаза поднимаются к верхушке стены, выходу из этого колодца в 15 км над нами. И перед нашим удивленным взором разворачиваются эти кипящие стены, эта гигантская бездна, это крупное отверстие, которое и заставило назвать все явление глазом тайфуна».

Тропические циклоны зарождаются в низких широтах субтропических областей океанов в результате взаимодействия дующих в этих областях постоянных ветров (пассатов) с мощными конвекционными восходящими потоками воздуха, возникающими над сильно нагретой поверхностью океана. *Основной источник энергии тропических циклонов — выделение огромных количеств скрытой теплоты при конденсации водяных паров в восходящих воздушных потоках.* Возникнув, циклон начинает перемещаться над земной поверхностью, скорость этого перемещения невелика — обычно она составляет десятки километров в час. Иногда циклон может на некоторое время зависать над какой-нибудь местностью. Как правило, циклоны перемещаются в направлении от низких к более высоким широтам, их траектории могут быть достаточно сложными.

**Штормовые приливы.** Подъем уровня воды в океане при прохождении тайфуна связан с су-

ществленным понижением давления в центре тайфуна. В связи с этим иногда ссылаются на следующий простой опыт.

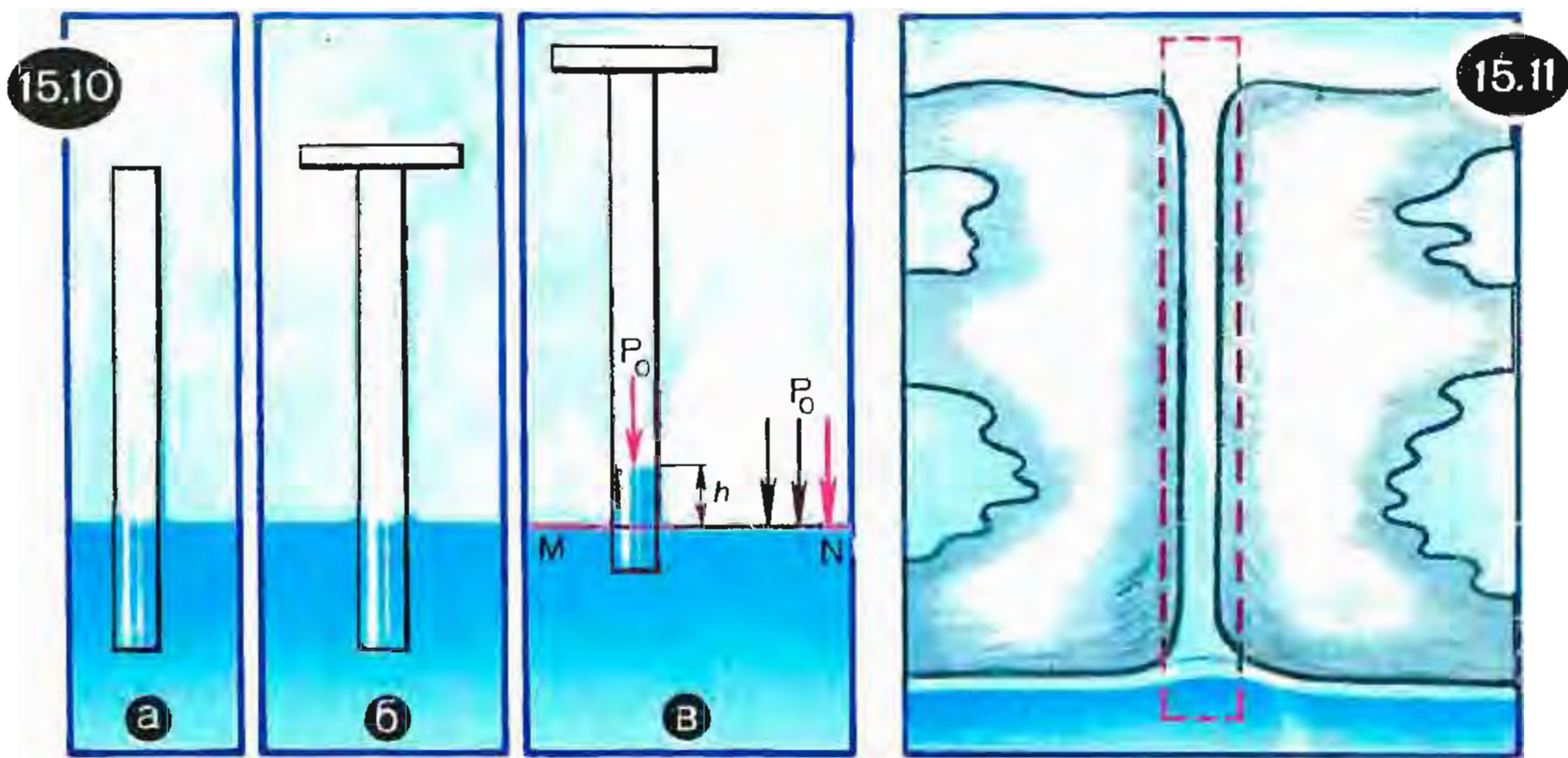
Погрузим стеклянную трубку одним концом в воду, как это показано на рисунке 15.10,а. Плотнo закроем верхний конец трубки и тем самым изолируем содержащийся внутри нее воздух от остальной атмосферы (рис.15.10,б). Затем приподнимем трубку, оставляя нижний ее конец под водой. Объем воздуха в трубке увеличится и, значит, давление его уменьшится, оно станет ниже атмосферного. В результате уровень воды внутри трубки немного повысится (рис.15.10,в). Рассмотрим давление на мысленно выделенную поверхность  $MN$ . Вне трубки оно равно атмосферному давлению  $p_0$ , а внутри складывается из давления воздуха в трубке  $p_1$  и гидростатического давления водяного столба высотой  $h$ , равного  $\rho gh$ . Давления вне и внутри трубки взаимно уравновешены:  $p_0 = p_1 + \rho gh$ . Отсюда находим, как приподнимется уровень воды в труб-

ке, когда давление воздуха в ней понизится с  $p_0$  до  $p_1$ :

$$h = \frac{(p_0 - p_1)}{\rho g} \quad (15.7)$$

А теперь вернемся к тайфуну. Бешено крутящиеся вокруг его центра ветры как бы отгораживают центральную область от окружающего пространства, изолируют ее от остальной атмосферы. В этой области поддерживается относительно низкое давление. В целом тайфун напоминает ту самую трубку, которую мы только что рассматривали. Только эта трубка имеет гигантские размеры: ее диаметр измеряется десятками (а в отдельных случаях сотнями) километров. Ее можно представить примерно так, как это сделано при помощи штриховых линий на рисунке 15.11, где дан вертикальный разрез облачности при тайфуне.

Намного ли поднимется уровень океана в центральной области тайфуна? Оценим высоту этого подъема (его называют ба-





рическим подъемом уровня океана), приняв давление на периферии тайфуна равным  $10,05 \cdot 10^4$  Па (754 мм рт. ст.), а в центре  $9 \times 10^4$  Па (675 мм рт. ст.). Используя эти значения соответственно для давлений  $p_0$  и  $p_1$  в формуле (15.7), находим  $h=1,1$  м.

Как будто бы немного. Но надо принять во внимание, что барический подъем уровня океана происходит сразу на огромной площади, измеряемой тысячами квадратных километров, и что, будучи незаметным в открытом океане, этот подъем становится опасным, когда глаз тайфуна приближается к побережью.

Опасность штормовых приливов еще более усиливается, когда они совпадают с обычным (астрономическим) приливом.

Кроме того, необходимо иметь в виду, что над поверхностью океана во время тайфуна бушуют сильнейшие ветры. В отличие от ситуации, рассматривавшейся в опыте с трубкой, мы здесь имеем дело не со спокойной водой, а с высокими волнами, поднятыми ураганным ветром. Эти волны могут стать выше, чем обычные ветровые волны во время шторма. Их высота уже в открытом океане может достигать 20...30 м. Ясно, что они существенно увеличивают мощь, а значит, и разрушительную силу штормовых приливов. В результате эти приливы оказываются для жителей побережья не менее грозным явлением природы, чем огромные волны цунами. Во многих случаях они более грозны, так как могут продолжаться в течение сравнительно длительного времени, измеряемого десятками часов и даже сутками.

Отметим, что, в отличие от волн цунами, волны, поднимаемые

тайфуном, очень опасны не только в прибрежной полосе, но и в открытом океане. Отметим некоторые особенности этих волн, для чего обратимся к рисунку 15.12. В левой половине рисунка показано положение глаза тайфуна по отношению к точке наблюдения  $A$  для трех моментов времени:  $t_1, t_2, t_3$ .

Тайфун перемещается слева направо. В момент  $t_1$  глаз тайфуна находится слева от точки  $A$ .

В этой точке дует ураганный ветер в направлении, обозначенном стрелкой 1, он поднимает высокие волны. В момент  $t_2$  точка  $A$  оказывается внутри глаза тайфуна; ветер стих, а волны достигли наибольшей высоты. Картина огромных волн, сшибающихся друг с другом под ясным небом в отсутствие ветра, представляется особенно устрашающей. Но вот тайфун сместился, и теперь (в момент  $t_3$ ) его глаз находится уже справа от точки наблюдения  $A$ . Снова дует ураганный ветер, но уже в обратном направлении (в направлении стрелки 2), встречный ветер быстро гасит огромные волны. Сказанное поясняет правая половина рисунка, где показано изменение со временем скорости ветра  $v$  и высоты штормовых волн  $h$  в точке  $A$ ; изменение знака скорости ветра соответствует смене первоначального направления ветра на противоположное. Изображенные на рисунке зависимости  $v(t)$  и  $h(t)$  вычислены для некоторой реальной ситуации, здесь время от момента  $t_1$  до момента  $t_2$  и от  $t_2$  до  $t_3$  составляет 4 ч. Ветер нарастает в течение примерно 10 ч, а затем почти сразу прекращается. В течение трех часов огромные волны бушуют в безветрие (прохождение глаза тайфуна),

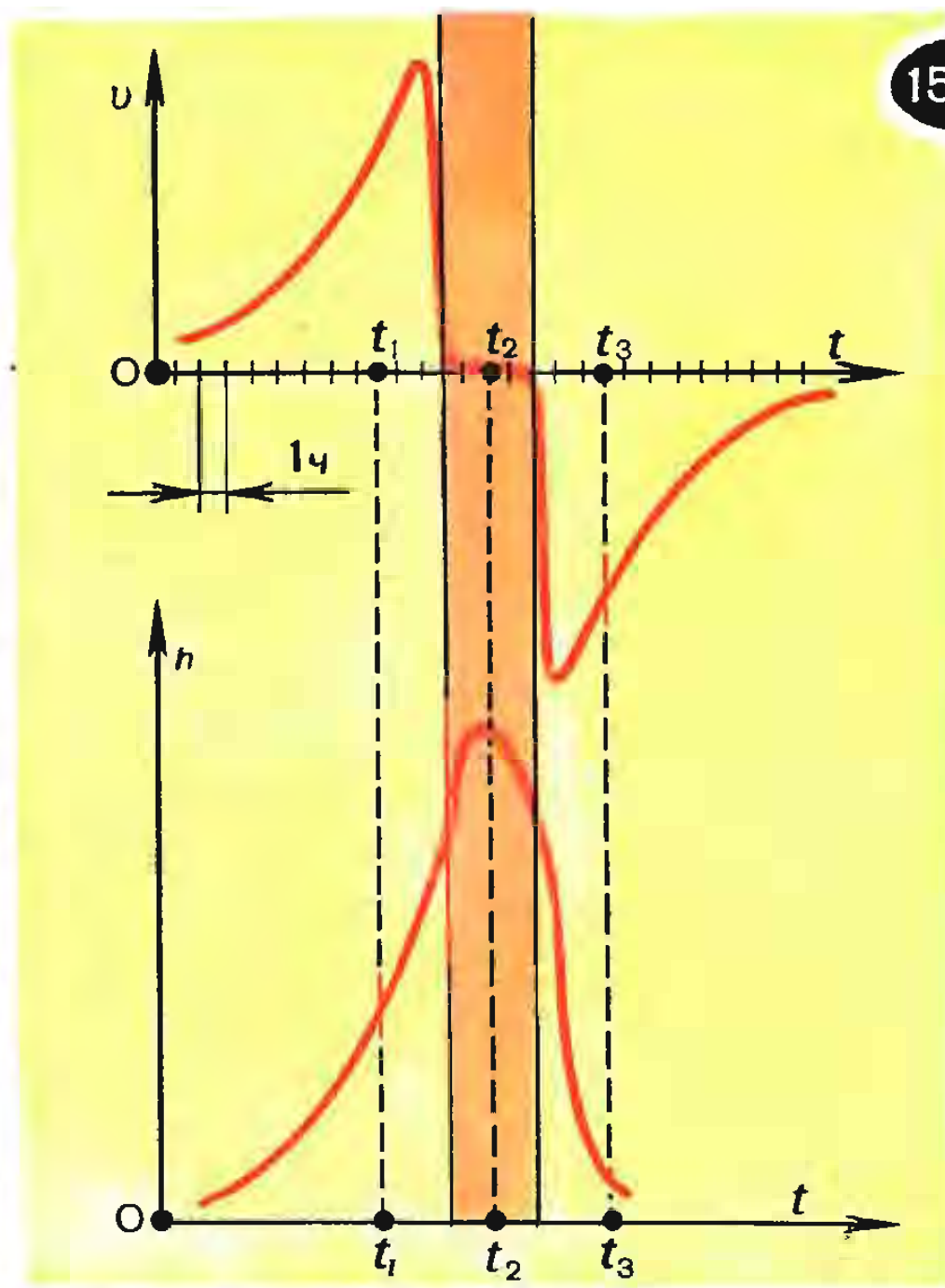
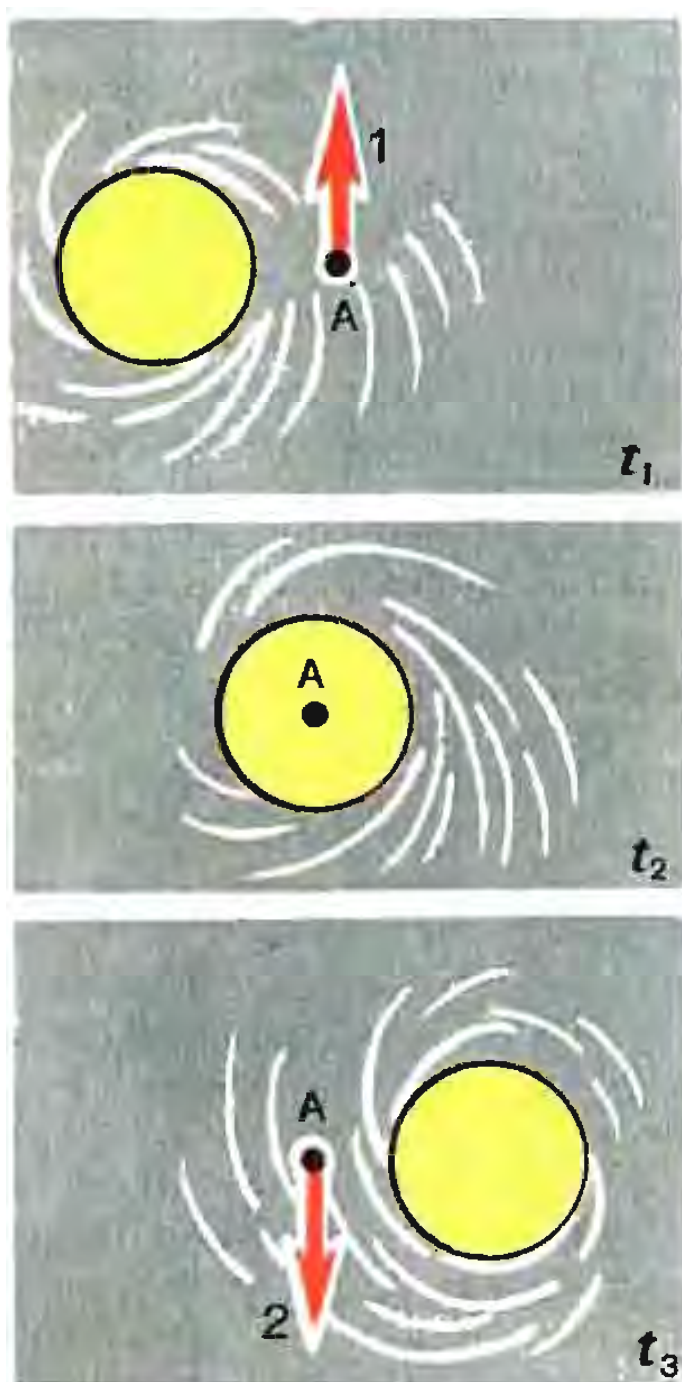
после чего ветер столь же быстро возобновляется, но уже в обратном направлении; он постепенно затихает в течение 10 ч.

Описанная картина развивающихся вблизи глаза тайфуна высоких волн, очевидно, перемещается вместе с тайфуном и, в частности, может «зацепить» побережье. В результате и разыгрывается разрушительный *штормовой прилив*, в котором поднятые ураганным ветром волны объединяются с барическим подъемом уровня океана, а, возможно, также и с обычным приливом. В результате на берег обрушиваются огромные массы воды, производя катастрофические разрушения. «Если такие волны,— замечает

Молэн,— попадают к тому же в теснину, в долину реки, то вся их мощь, вместо того чтобы разлиться и рассеяться по большой поверхности, соединяется, приобретает целеустремленность ядра в жерле орудия, такие волны похожи на дальнобойные снаряды».

В заключение заметим, что высота наводнений, вызванных штормовыми приливами, в значительной мере увеличивается за счет обильных ливней, которые обычно сопровождают тайфун.

**Ленинградские наводнения.** Вот уже почти три столетия стоит в устье Невы наш знаменитый город. За это время уровень воды в





Неве в черте города 250 раз поднимался более чем на 1,5 м выше обычного (как говорят, более чем на 1,5 м над ординаром). При больших подъемах воды происходили наводнения, причинявшие значительные разрушения, уносившие многие человеческие жизни. В сентябре 1777 г. вода поднималась на 3,1 м над ординаром, в ноябре 1824 г. — на 4,1 м, в сентябре 1924 г. — на 3,7 м, в сентябре 1975 г. — на 2,7 м.

Наводнение 1824 г. ярко описано А. С. Пушкиным в поэме «Медный Всадник»:

Но силой ветров от залива  
Перегражденная Нева  
Обратно шла, гневна, бурлива,  
И затопляла острова.  
Погода пуще свирепела,  
Нева вздувалась и ревела,  
Котлом клокоча и клубясь.  
И вдруг, как зверь остервенясь,  
На город кинулась...

Поэт правильно указывает причину наводнения: сильные ветры в Финском заливе «переградили» Неву, заставили ее воды *идти вспять*.

Представим себе циклон, центр которого медленно перемещается вдоль Финского залива с запада на восток. Понижение давления в центре циклона приводит, как мы уже знаем, к барическому подъему уровня воды; поверхность залива в центре циклона слегка вспучивается. Этому способствуют ветры, которые, крутясь, сгоняют воду к центру циклона. По мере перемещения к более мелководной восточной части залива вспучивание водной поверхности нарастает — возникает довольно высокая *приливная волна*, которая входит в устье Невы и как бы вынуждает ее повернуть обратно. В результате уровень воды в реке существенно поднимается — начинается наводнение.

глава

# 16

## Вулканы и гейзеры

Везувий зев открыл — дым хлынул клубом — пламя  
Широко развилось, как боевое знамя.

Земля волнуется — с шатнувшихся колонн  
Кумиры падают! Народ, гонимый страхом,  
Под каменным дождем, под воспаленным прахом,  
Толпами, стар и млад, бежит из града вон.

*А. С. Пушкин*





Есть у японцев «священная гора» — Фудзияма, символ силы и красоты, объект особого поклонения. Фудзияма — уснувший вулкан; последнее извержение его происходило в 1707 г. Он действительно необычайно красив. Его изящный силуэт конической формы высотой 3780 м величественно возвышается над окрестностями, в ясную погоду он хорошо виден из Токио, который находится в 90 км к востоку от вулкана.

На многих японских картинах отображен старинный ритуал поклонения Фудзияме; это можно видеть, например, на гравюрах Хокуся (рис. 16.1).

С давних времен люди поклонялись вулканам, обожествляли их. В Древней Греции был бог огня Гефест, сын Зевса и Геры. Греки считали его покровителем кузнечного ремесла и искусным кузнецом. Глядя на дымящуюся вершину вулкана на острове Гиеру (в группе Липарских островов Средиземного моря), они верили, что там, в глубине горы, Гефест кует оружие. В кузнице Гефеста, по преданию, были созданы стрелы Аполлона, щит Ахилла, панцирь Геракла. Позднее римляне стали называть бога огня Вулканом (по-латыни *vulcanus* — огонь, пламя), а остров Гиеру переименовали в Вулькано.

Название «вулкан» стало применяться впоследствии ко всем горам, извергавшим огонь, лаву, пепел.

У древних греков и римлян существовало немало поэтических легенд, связанных с извержениями вулканов.

В одной из таких легенд рассказывается о борьбе Зевса с огнедышащим чудовищем Тифоном, который у древних греков счи-

тался олицетворением вулканов и землетрясений. «...Поднялся Тифон из недр земли. Диким воем всколебал он воздух. Бурное пламя клубилось вокруг Тифона, и земля качалась под его тяжелыми шагами. Боги содрогнулись от ужаса. Но смело ринулся на него Зевс-громовержец, и загорелся бой... Земля и небесный свод потрясались до основания. Ярким пламенем вспыхнула опять земля. Моря кипели. Сотнями сыпались огненные стрелы-молнии Зевса, казалось, что от их огня горит самый воздух и горят темные грозовые тучи... Рухнул Тифон на землю, от его тела исходил такой жар, что плавилось все вокруг. Зевс поднял тело Тифона и низверг его в мрачный Тартар, породивший его».

В этом мифе получила отражение грозная картина вулканического извержения. Даже современного человека, вооруженного научными знаниями, невольно охватывает трепет, когда он видит черный столб, поднимающийся в высоту на несколько километров, огненные потоки лавы, обильный дождь из камней и пепла, когда он слышит оглушительные раскаты вулканических взрывов. Что же говорить о людях, живших в древние и средние века? Вполне понятно, что они считали вулкан жилищем бога огня или огнедышащего дракона, а извержение вулкана воспринимали как гнев божий, как кару небесную.

Боги огня существовали не только у народов Средиземноморья, но также и у других народов — везде, где наблюдалась вулканическая деятельность. Например, жители Исландии верили в существование огнедышащего великана Суртура. На Гавайских

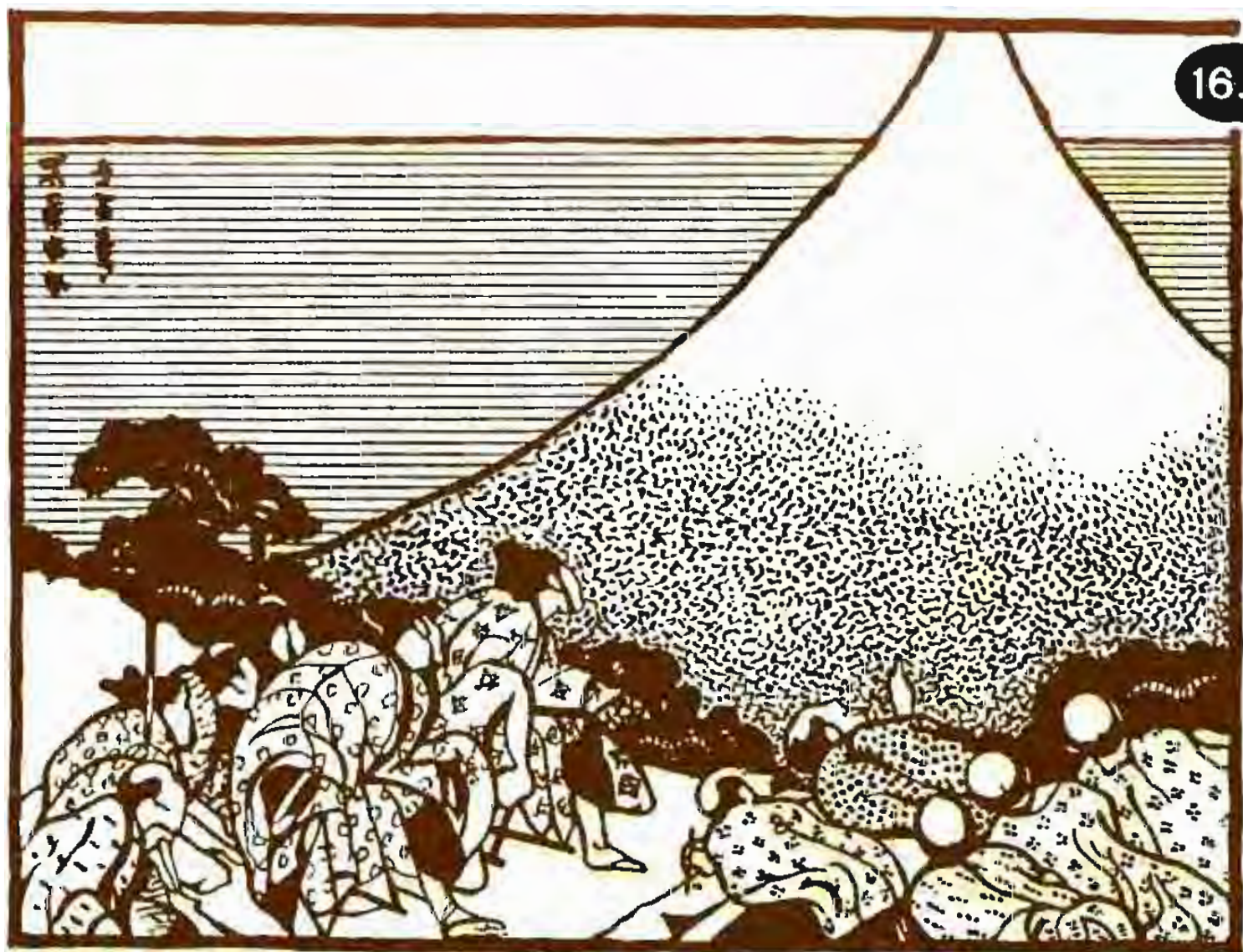


островах до сих пор сохранился культ богини огня Пеле. По преданию, она живет в озере жидкой лавы, называемом Халемаумау (что переводится как «дом вечного огня»), и появляется всякий раз перед извержением вулкана в облике старой женщины. Гавайцы собирают и хранят нити и капельки застывшей лавы, они называют их «волосами Пеле», «слезами Пеле».

Стремясь задобрить богиню огня, они бросают в лавовое озеро жертвоприношения — ягоды огело, похожие на нашу чернику, живых кур.

Первые попытки научного объяснения вулканизма предпринимались уже древнегреческими мыслителями. Демокрит полагал, что внутри земли существуют каналы и что извержения вулканов вызываются движением воздуха по этим каналам. Платон считал,

что по каналам движется не только воздух, но также огонь. Римский философ Сенека высказал догадку, соответствующую современным представлениям. Он предположил, что вулканы — это отверстия в земле, по которым расплавленные массы выходят наружу из земных недр. Естественными, а не божественными причинами пытался объяснить возникновение и деятельность вулканов М. В. Ломоносов. «Огнедышащие горы, — писал он, — как бы некие проломы в теле, показывают излишество материи, которая, подобно внутренней болезни выходя наружу, движет и надувает приближенные части... Горы таким же образом то, вновь поднявшись, загораются на некоторое время, то погасают. Иные старую силу отрыгают, иные, совсем обрушившись, кончают свое свирепство вовсе...»





**Некоторые вулканические катастрофы.** В предыдущей главе мы рассказывали о случившейся в XV в. до н. э. природной катастрофе, уничтожившей Атлантиду. Эта катастрофа была связана со взрывом вулкана Санторин, сильнейшим землетрясением, возникновением гигантских цунами. Расскажем теперь о некоторых других вулканических катастрофах.

В Италии на берегу Неаполитанского залива находится вулкан Везувий. В I в. н. э. произошло мощное извержение этого вулкана, в результате которого погибли древнеримские города — Помпеи, Геркуланум, Стабия. Геркуланум был затоплен потоками горячей грязи, образовавшейся из лавы, воды и пепла. Поднимаясь, грязь заливала дома, проникала в окна и двери и в конце концов замуровала весь город вместе с жителями, не успевшими спастись бегством. На Помпеи и Стабию вулкан обрушил тучи пепла и камней, одновременно на оба города опустились пары ядовитых газов. Люди пытались укрыться в домах и погибали там от удушья либо в результате обрушивания кровли под тяжестью скопившихся на крышах камней и пепла. В течение двух суток продолжалось извержение Везувия, а когда, наконец, оно прекратилось, трех цветущих городов более не существовало — они оказались полностью погребенными под пеплом и грязью. Спустя много веков археологи откопали эти города и обнаружили прекрасно сохранившиеся под вулканическим пеплом образцы древнеримской архитектуры, скульптуры, домашней утвари и т. п. На рисунке 16.2 можно видеть гипсовый слепок одного из жителей Помпей, погибшего во

время извержения вулкана; форма его тела сохранилась в виде пустоты в затвердевшем пепле.

Извержения Везувия происходили и в последующие века. На рисунке 16.3 можно видеть одно из таких извержений (апрель 1872 г.). На снимке видно огромное облако пепла и облака пара высотой до километра, поднимающиеся над потоками лавы, которые стекают по склонам вулкана.

Особый характер носило мощное извержение в Исландии, начавшееся в июне 1783 г. После сильных землетрясений, продолжавшихся 8 дней, раскрылась трещина протяженностью свыше 25 км (трещина Лаки), и началось истечение лавы сразу из 22 отверстий. Одновременно произошла серия взрывов, выбросивших в воздух большие массы пепла. Лава достигла ущелья реки Скафтау глубиной до 180 м, полностью заполнила его на протяжении 80 км и, переливаясь через края, распространилась далее. Между тем извержение лавы из отверстий вдоль щели Лаки продолжалось с неослабевающей силой. 3 августа поток лавы достиг долины реки Хвервисфольоут, полностью заполнил ее на протяжении 60 км (как и долину Скафтау), перелился через края и затопил окружающую местность. В результате извержения Лаки погибло около 10 тыс. человек (пятая часть населения Исландии).

В 1902 г. произошло катастрофическое извержение вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника (в группе Малых Антильских островов). Оно началось с подземных толчков и выпадения пепла в последней неделе апреля. Утром 8 мая наступило внезапное затишье. И вдруг со страшным гро-

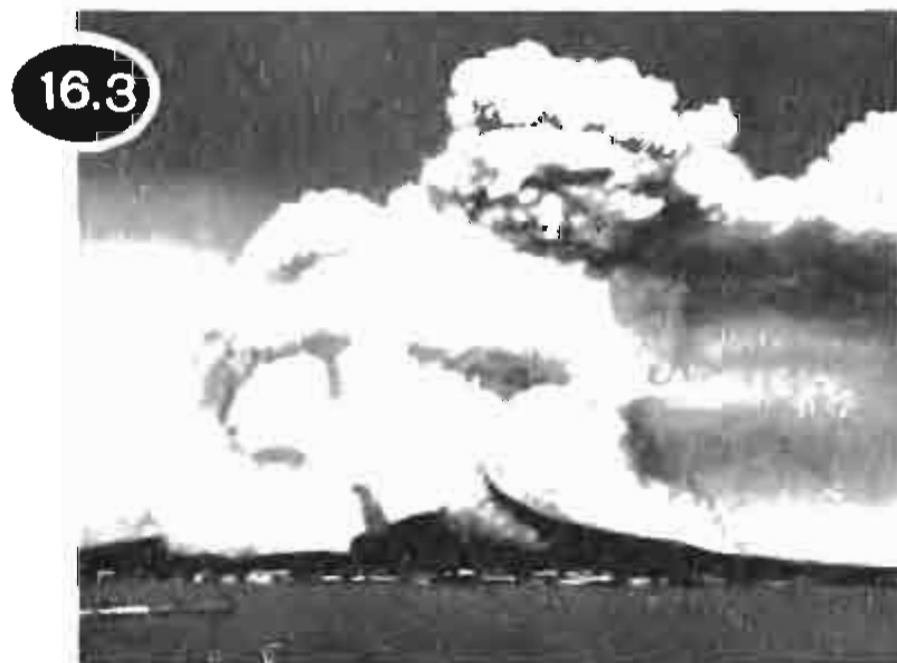
хотом треснула вершина горы, и наружу вырвалась огромная палящая туча раскаленных газов — огненная стена, с бешеной скоростью (свыше 500 км/ч) помчавшаяся вниз по склону (рис.16.4). В считанные минуты она достигла города Сен-Пьер, и тот исчез в ее пламени. В течение нескольких минут погибло около 40 тыс. человек.

В ноябре 1985 г. началось мощное извержение вулкана Аренас в Колумбии. Этот вулкан «дремал» в течение пяти столетий. Его кратер, находящийся на высоте 5400 м, был окружен ледником Дель-Руис. Извержение вызвало бурное таяние льда и вечных снегов, мощные потоки грязи, пепла, камней хлынули в долины. Они затопили ряд селений, в том числе город Армеро, где сразу погибло около 70% жителей. Большие разрушения произошли также в городе Чинчина. В результате тая-

ния снегов вышли из берегов реки. Общее число погибших превысило 25 тыс. человек.

**Путешествие в недра Земли.** Предположим, что в некоторой точке Земли произошло землетрясение. Тотчас во все стороны от очага землетрясения побегут сквозь земную толщу *упругие волны*. Они воспринимаются приборами сейсмологических лабораторий в отдаленных районах. Исследуя эти волны и, в частности, измеряя их скорость, можно тем самым как бы прослушивать недра Земли.

Накопленные учеными данные сейсмических исследований позволяют нам совершить сегодня мысленное путешествие в глубь Земли. Оно поможет разобраться в физической природе *вулканизма*. Мы спустимся относительно неглубоко — на расстояние примерно до 200 км от земной поверх-

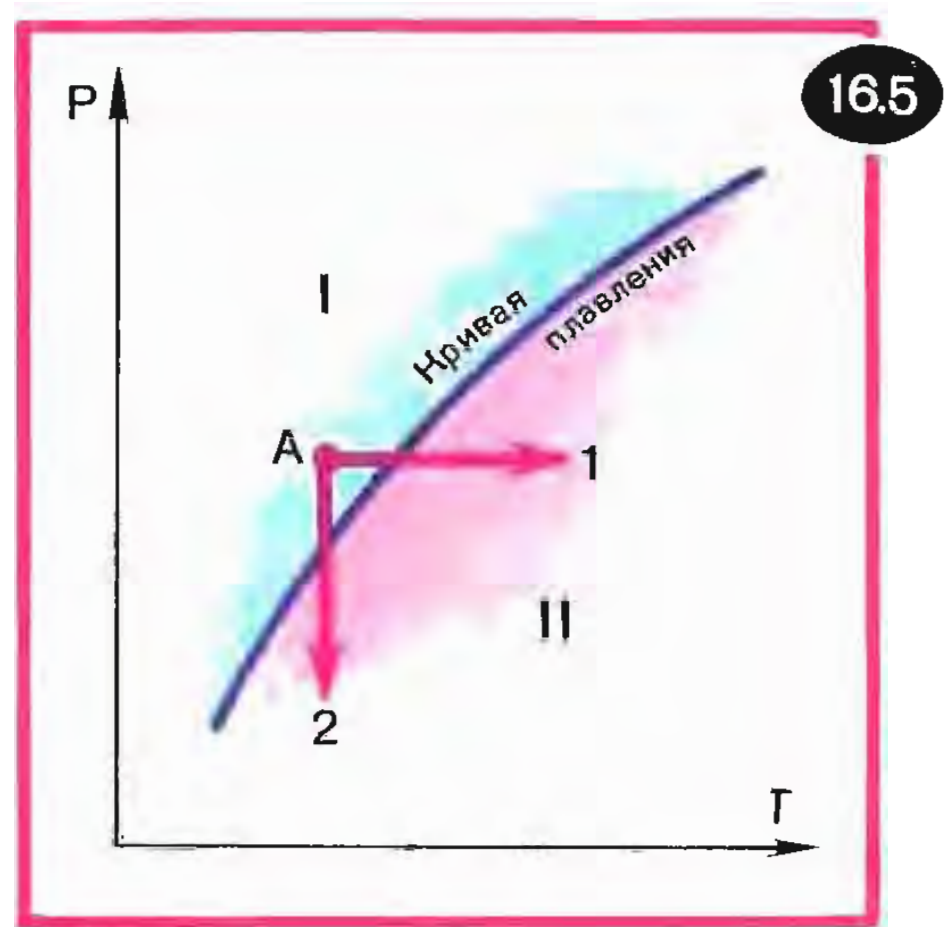




ности. По мере спуска мы пройдем сквозь твердую наружную оболочку земного шара — литосферу, имеющую толщину в среднем около 100 км, и окажемся внутри так называемой астеносферы (от греческого «астенес» — мягкий), простирающейся до глубин в 300 км. В определенном смысле твердая литосфера как бы плавает на мягкой астеносфере. Заметим, что слово «плавает» не следует понимать в буквальном смысле. Здесь следует уточнить, каким в действительности является вещество астеносферы.

Известно, что по мере спуска в недра Земли температура постепенно повышается. Это обстоятельство и сам факт извержения вулканами жидкой лавы невольно наталкивали на мысль, что на определенных глубинах вещество земного шара находится в жидком состоянии. Однако на самом деле все не так просто. Одновременно с повышением температуры растет давление в земных глубинах. А ведь чем больше давление, тем выше температура плавления. Это иллюстрирует типичная кривая плавления, показанная качественно на рисунке 16.5 ( $p$  — давление,  $T$  — температура). В области I на рисунке вещество находится в твердом состоянии, а в области II — в жидком.

Согласно современным научным данным, большая часть земных недр сохраняет твердое состояние, и лишь некоторые отдельные области могут рассматриваться как находящиеся в жидком состоянии. Лучше сказать, что вещество астеносферы находится в почти расплавленном состоянии. Так будем называть твердое состояние, которое легко переходит в жидкое (расплавленное) при не-



большом понижении давления или повышении температуры. На рисунке 16.5 такому состоянию соответствует, например, точка А. Видно, что при небольшом увеличении температуры (стрелка 1) или при небольшом понижении давления (стрелка 2) происходит переход из области I в область II — вещество переходит из твердого состояния в расплавленное, возникает жидкая магма.

Магма и лава... Жидкие расплавы, поднимающиеся по жерлу вулкана, называются *магмой*. Когда магма достигает поверхности и изливается, ее называют уже по-другому — *лава*. Лава отличается от магмы не только температурой, но и по составу: содержащиеся в магме различные газы могут практически отсутствовать в лаве, они выделяются из магмы и поступают в земную атмосферу.

Источником первичных расплавов магмы является астеносфера. Если в каком-то районе вдруг снижается давление (например, при смещении участков литосферы, о чем мы еще поговорим позднее),

твердое вещество астеносферы тотчас превращается в жидкий расплав, т. е. в магму. По глубинным разломам магма может подняться в область литосферы и в конечном счете вызвать вулканические явления на поверхности Земли.

Мысленно поднимаемся вслед за магмой из астеносферы в литосферу и сделаем там остановку, чтобы внимательно оглядеться. Верхний слой литосферы отличается повышенной твердостью, его называют *земной корой*. Толщина земной коры равна 30...50 км на материках и всего 5...10 км под океанами. Материковая часть коры состоит, в свою очередь, из двух слоев. Сверху находится *гранитный слой* толщиной 15...20 км. Он образован горными породами с относительно высоким содержанием кремнезема  $\text{SiO}_2$  (гранитами, гнейсами, различными осадочными породами); плотность гранитного слоя составляет в среднем  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Ниже находится *базальтовый слой*, его плотность в среднем  $3,0 \text{ г/см}^3$ . Под океанами земная кора состоит только из базальтового слоя.

**Концепция тектоники литосферных плит.** С 40-х годов нашего столетия начались интенсивные исследования рельефа дна океана. Применяя эхолокацию, ученые внимательно изучили океаническое дно и составили подробные карты его рельефа. Оказалось, что на дне океанов имеется разветвленная система *подводных горных хребтов*. Общая протяженность хребтов около 100 тыс. км. Их высота изменяется примерно от 3 до 5 км, ширина составляет в среднем 1000 км. Установлено,

что каждый подводный хребет рассечен по своей продольной оси глубокими трещинами — так называемыми *рифтами*. Трещины и разломы пересекают хребет во многих местах также и в поперечном к оси направлении. Геофизические исследования позволили сделать еще одно важное открытие — оказалось, что вблизи некоторых побережий (например, у Тихоокеанского побережья Южной и Северной Америк, вблизи Индонезийского архипелага, Японских, Курильских и Алеутских островов) океаническая литосфера опускается наклонно под материковую область. Здесь материк всей своей тяжестью проминает, как бы подавляет края океанической литосферы. Места, где это наблюдается, стали называть *зонами субдукции* (от английского *subdue* — подавлять) или, проще, *желобами*.

Во второй половине 60-х годов ученые пришли к выводу, получившему название *концепции тектоники плит*. Эта концепция имеет решающее значение для объяснения землетрясений и вулканической деятельности. Ученые пришли к выводу, что *литосфера представляет собой мозаику из отдельных плит больших или меньших размеров*.

Границами соседних плит являются либо рифтовые хребты, либо желоба (зоны субдукции). Именно на границах (краях) плит и располагаются практически все вулканы; в этих районах наиболее часто происходят землетрясения. Подводные вулканы сосредоточены вдоль подводных рифтовых хребтов, а наземные вдоль желобов, а также там, где океанические рифтовые хребты возвышаются над водой (например, Исландия,



Азорские острова) или где существуют материковые рифтовые хребты (восточная часть Африки).

Все это можно видеть на рисунке 16.6. Синими линиями на рисунке выделены центральные части рифтовых хребтов, а красными — желоба. Приведены названия отдельных плит, рифтовых хребтов, желобов, а также некоторых вулканов.

Обратим внимание читателя на стрелки, изображенные зеленым цветом на рисунке 16.6. Они указывают направления, в которых перемещаются литосферные плиты. Перемещаются плиты? Разве они не неподвижны? — может удивиться читатель. Да, они в самом деле *перемещаются*, хотя, конечно, чрезвычайно медленно (перемещения плит надо рассматривать в масштабах геологического времени). Чтобы представить себе, как совершается такое перемещение, обратимся к рисунку 16.7, на котором схематически изображена одна из плит. Вследствие подводной вулканической деятельности вдоль рифтового хребта AA происходит постепенное наращивание рассматриваемой плиты у ее левой границы. Наращивание обусловлено поступлением магмы из верхних областей астеносферы. В результате плита будет понемногу расширяться и, как следствие, отодвигаться вправо — ведь она упирается левым боком в другую плиту, которая, кстати говоря, тоже наращивается. Справа от нашей плиты находится материк. По мере перемещения ее правый край будет все более проникать под материковую плиту (будет как бы подниматься ею). В этом месте — вдоль зоны субдукции BB — происходят многочисленные разломы и разрывы

нашей плиты, а край материковой плиты образует горные складки.

Мы видим, таким образом, что *вулканизм и землетрясения органически связаны друг с другом*. Вулканизм рифтовых хребтов обуславливает перемещение литосферных плит, а это перемещение, естественно, приводит к землетрясениям, которые, в свою очередь, создают новые трещины и разломы в плитах, способствующие усилению вулканической деятельности.

Энергия движения плит, равно как и энергия землетрясений и



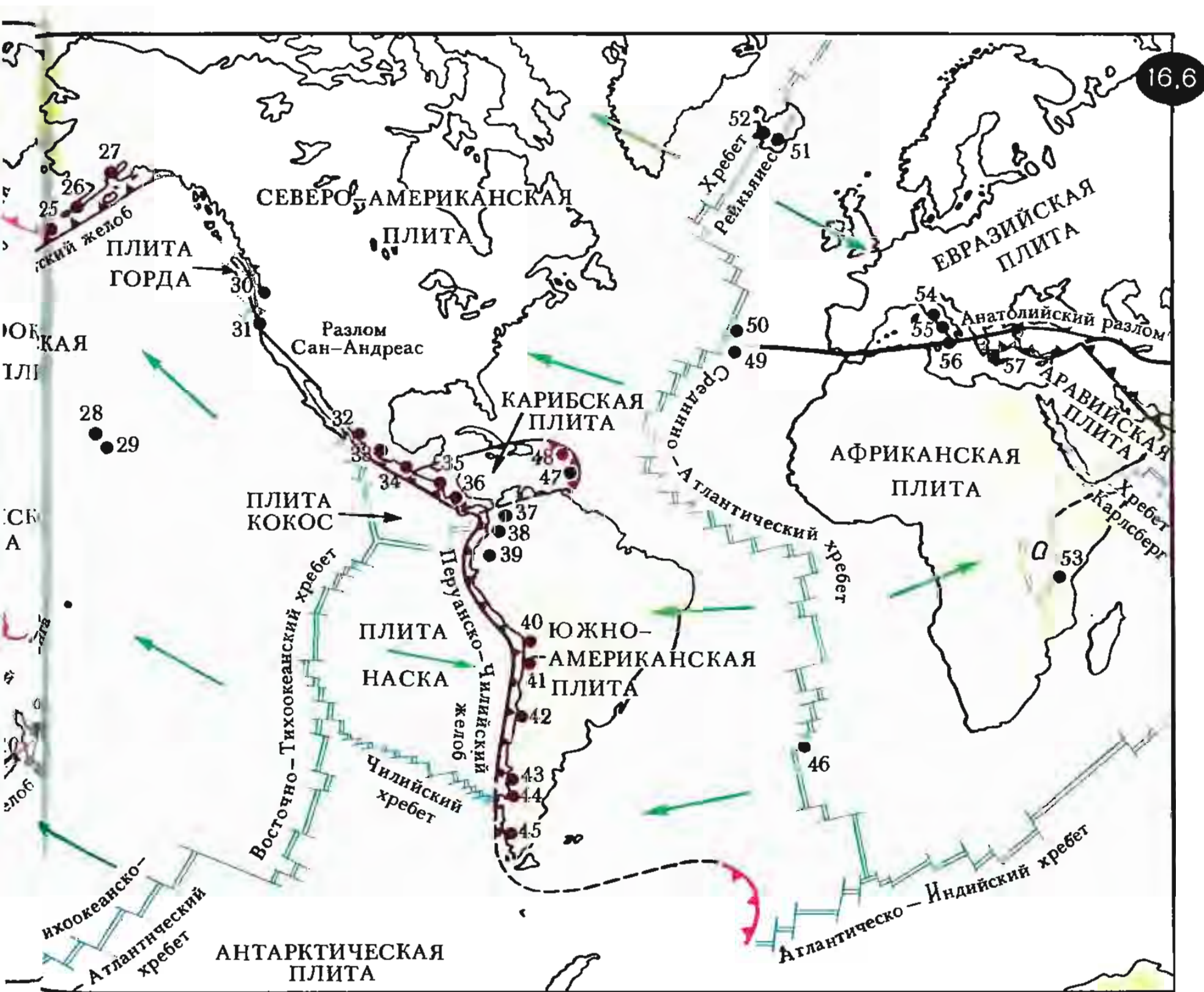
вулканических процессов, черпается, очевидно, из гигантских запасов тепловой энергии земных глубин.

**Вулканы.** В настоящее время на Земле имеется более 400 действующих вулканов. В СССР действующие вулканы находятся на Камчатке и Курильских островах (50 вулканов).

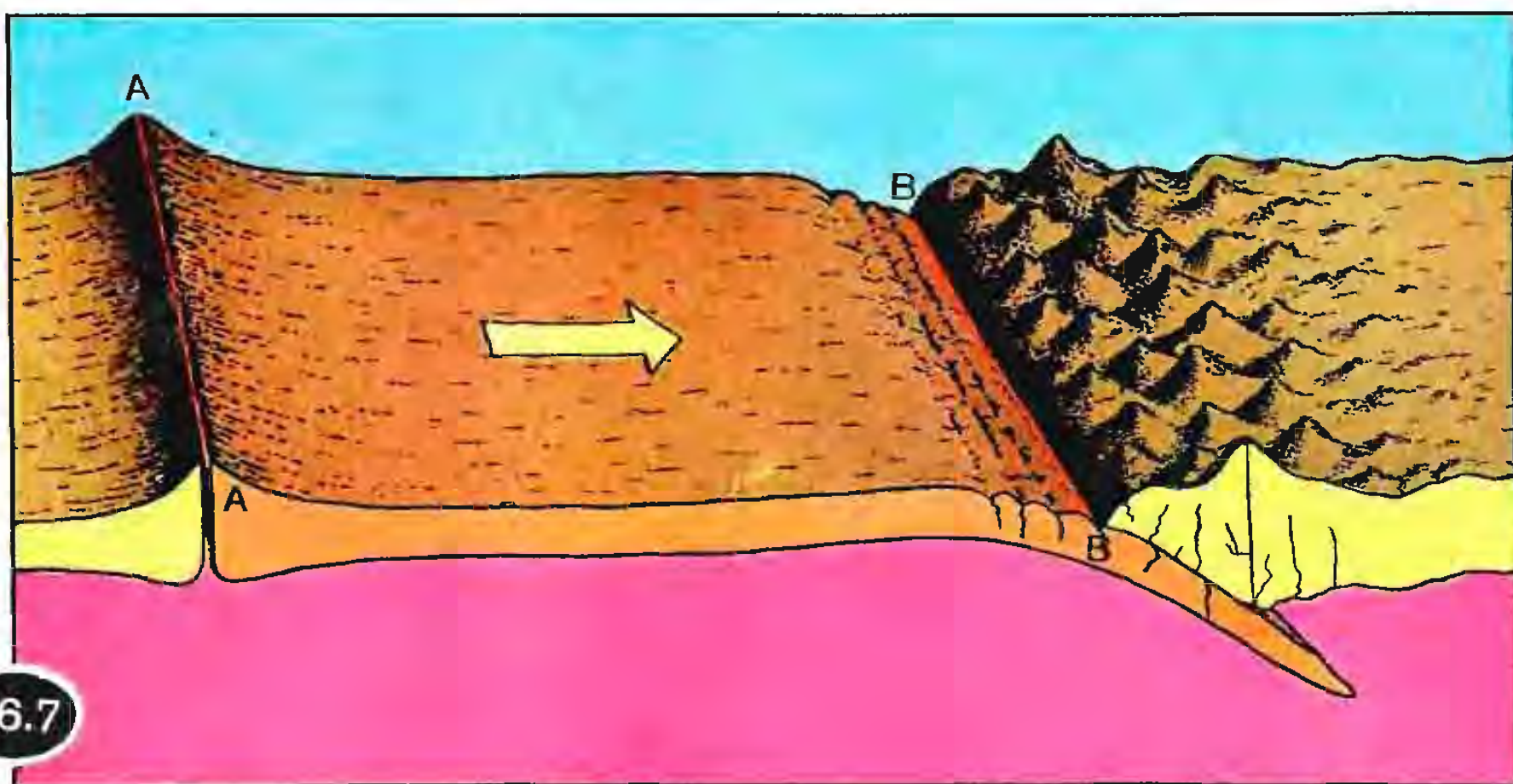
Различают вулканы *центрального* и *линейного* типа. У линейных вулканов магма поднимается к поверхности по трещинам. Тако-

вы, как правило, подводные вулканы океанических рифтовых хребтов. На суше ярким примером линейных вулканов служат вулканы Исландии (например, трещина Лаки).

У вулкана центрального типа роль выводного канала для магмы выполняет не система трещин, а жерло — своеобразная труба, ведущая от подземного *магматического очага* к поверхности. Отметим три разновидности центральных вулканов: *стратовулкан*, *стратовулкан с кальдерой*, *щитовой вулкан*.







16.7

Вертикальный разрез стратовулкана показан на рисунке 16.8,а. Это гора конусообразной формы, состоящая из множества слоев застывшей лавы и относительно рыхлых вулканических выбросов (пепла и камней). Слои накапливались в течение длительного времени в результате извержений вулкана. При каждом извержении застывали потоки лавы, стекавшей по склонам вулкана; на потоках лавы оседал слой пепла и камней различных обломков. Повторялись извержения — и постепенно нарастала гора, напоминающая по своей внутренней структуре слоеный пирог. Отсюда и название — стратовулкан, ведь латинское слово *strata* означает «слой». Сквозь все эти слои снизу доверху проходит жерло стратовулкана. Внизу оно соединяется с магматическим очагом, а вверху заканчивается кратером — характерной впадиной на вершине вулканической горы. Такая структура стратовулкана может рассматриваться как идеальная. В действительности же при извержении вулканов часто,

наряду с главным кратером, начинают действовать несколько побочных кратеров, а также трещины, раскрывающиеся на склоне вулкана (рис.16.8,б). Заметим, что на дне кратера можно наблюдать не одно, а несколько жерл — одно главное и несколько побочных.

Знаменитая Фудзияма — идеальный пример стратовулкана; правда, этот вулкан не действует вот уже почти триста лет. В качестве примера действующего стратовулкана укажем вулкан Ключевская сопка. Это самый высокий вулкан на Камчатке; его высота составляет 4900 м. Он относится к числу наиболее активных вулканов. Циклы извержений Ключевской сопки могут длиться до 2...3 лет и повторяться каждые 7...10 лет. Из главного кратера вулкана даже в периоды затишья непрерывно выделяются водяные пары и различные газы (хлористый водород, азот, пары серы и др.). На восточном склоне вулкана имеется несколько побочных кратеров, расположенных по прямой, что указывает на существ-



16.8



вание трещины, направленной по радиусу от вершины горы. По структуре, степени активности, характеру извержений очень похожа на Ключевскую сопку вулкан Этна на острове Сицилия. Любопытно, что вулканическая деятельность Этны протекает большей частью на склонах вулкана, где раскрываются трещины и образуются побочные кратеры; при этом главный кратер может не проявлять особой активности.

В результате вулканической деятельности форма и размеры вулкана постепенно, на протяжении столетий и тысячелетий, изменяются. Происходит послойное наращивание склонов, увеличивается высота вулкана; на склонах возникают побочные кратеры, вдоль раскрывающихся трещин наблюдаются сдвиги горных пород. При особенно мощном извержении, которое сопровождается сильными подземными толчками, форма вулкана может существенно измениться сразу. Так, вследствие взрыва может обрушиться значительная часть вершины вулкана,

огромные массы пород могут провалиться в находящийся под ними магматический очаг. В подобных случаях вместо обычного кратера образуется широкий (и подчас достаточно глубокий) провал, достигающий в поперечнике десятков километров. Его называют кальдерой (от испанского «кальдера», означающего «котел»). На рисунке 16.9 показан в разрезе стратовулкан с кальдерой, которая возникла вследствие провала значительного участка земной коры в магматический очаг. Такой провал нетрудно объяснить, если предположить, что в результате быстрого истечения больших количеств лавы при боковых извержениях, а также мощных выбросов пепла и камней магматический очаг как бы выкачивается, временно оказывается неполностью заполненным. Надо учесть также, что породы над очагом пронизаны множеством щелей, разломов, дополнительных жерл. Поэтому неудивительно, что сильные подземные толчки, сопровождающие извержение, могут вызвать в данной ситуации



16.9

Провалившаяся  
глыба  
земной коры

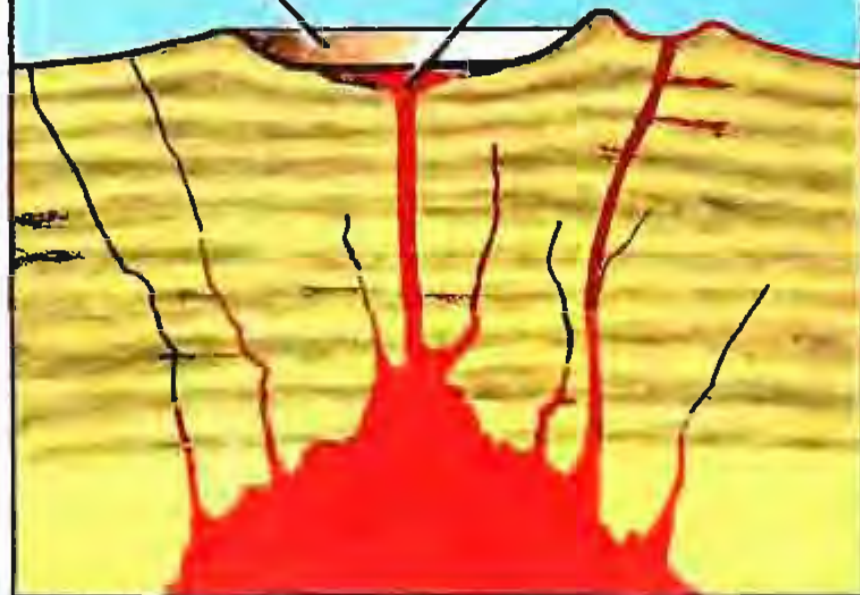
Нальдера



16.10

Лавовое  
озеро

Нальдера



обрушивание вниз огромной глыбы земной коры.

Для роста стратовулкана нужно, чтобы изливающиеся через главный кратер потоки лавы стекали по склонам *достаточно медленно* — настолько, чтобы лава успевала остыть, затвердеть и тем самым задержаться на склоне. А что будет, если лава окажется *легкоподвижной*, с высокой текучестью (низкой вязкостью)? Такая лава, излившись из кратера, *быстро растечется* во все стороны на значительные расстояния, образуя после застывания своеобразный щит. В этом случае и возникают *щитовые вулканы*. На рисунке 16.10 показан разрез подобного вулкана. Кратер щитового вулкана имеет обычно форму широкого котла с плоским дном (форму кальдеры). Котел может время от времени заполняться жидкой лавой — и тогда образуется *кипящее лавовое озеро*. Щитовые вулканы распространены преимущественно в океанических областях. Примером могут служить вулканы Мауна-Лоа и Килауэ на

Гавайских островах. Внутри кальдеры вулкана Килауэ как раз и существует лавовое озеро Халемаумау, являющееся, по преданию, «домом» богини огня Пеле.

**Характер вулканических извержений.** О том, как выглядят мощные вулканические извержения, мы уже рассказывали, приводя примеры вулканических катастроф. Почти все рассмотренные извержения носили бурный взрывной характер, при этом в ряде случаев наблюдалось частичное обрушивание вершины вулкана (извержения Везувия и Этны), иногда возникала палящая туча (извержение вулкана Мон-Пеле). Относительно спокойное и в то же время долго не ослабевающее истечение лавы наблюдалось при извержении трещины Лаки в Исландии.

В настоящее время принято выделять два основных типа вулканических извержений: *извержения в зонах рифтовых хребтов* (большинство их происходит под поверхностью океанов) и *изверже-*

ния в зонах субдукции. Первый тип извержений происходит там, где плиты литосферы давят друг на друга своими краями, а второй тип — там, где одна литосферная плита подавляет, подминает под себя другую плиту. Для первого типа извержений характерно относительно спокойное истечение лавы (именно таково, например, извержение трещины Лаки), тогда как извержения второго типа имеют обычно взрывной характер, происходят бурно, сопровождаясь выбросами в воздух больших количеств пепла и камней, обрушиваниями вершин, возникновением туч из раскаленных газов.

С чем это связано? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что земная кора под дном океанов состоит только из базальтового слоя, тогда как в материковых областях она имеет два слоя — снизу базальтовый, а сверху гранитный. Базальты характеризуются относительно низким содержанием кремнезема  $\text{SiO}_2$  ( $\leq 52\%$ ); состоящую из таких пород магму химики называют основной. Входящие в состав гранитного слоя диориты содержат от 52 до 65% кремнезема; соответствующую магму называют *средней*. Наконец, граниты отличаются высоким содержанием кремнезема ( $\geq 65\%$ ); в этом случае говорят о *кислой* магме.

Базальтовые магмы и лавы характеризуются очень низкой вязкостью, они легкоподвижны, отличаются высокими температурами (на выходе из кратера вулкана), легко выделяют содержащиеся в них газы, способны за короткое время распространиться на большие расстояния. Наибольшая скорость движения базальтовой лавы зарегистрирована для вулкана

Килауэ на Гавайских островах: при крутизне склона  $30^\circ$  скорость лавы достигала 15 м/с. Физико-химические свойства базальтовых магм и лав (и прежде всего их низкая вязкость) как раз и объясняют относительно спокойный характер вулканических извержений в зонах рифтовых хребтов.

Средние и особенно кислые магмы и лавы характеризуются повышенной вязкостью. Они текут медленно, неохотно отдают содержащиеся в них газы. Подъем такой магмы по жерлу вулкана сопровождается образованием «пробок», в результате чего давление газов сильно возрастает, возникают взрывы, раскрываются трещины. Именно поэтому извержения в зонах субдукции протекают бурно, взрывообразно.

Приведем некоторые числа, позволяющие оценить различные свойства основных и средних лав. Лава, изливающаяся из кратера вулкана Килауэ (основная лава), имеет начальную температуру  $1200^\circ\text{C}$ . Она сохраняет текучесть даже при охлаждении до  $600^\circ\text{C}$ . Иное дело средняя лава. Ее начальная температура ниже по сравнению с температурой основной лавы на 200...300 К. При этом вязкость лавы при охлаждении на 50 К возрастает почти в 10 раз. Например, температура лавы, измеренная непосредственно вблизи кратера вулкана Санторин, составляла  $975^\circ\text{C}$ . При небольшом удалении от кратера при температуре  $850^\circ\text{C}$  лава была еще текучей, но уже при температуре  $760^\circ\text{C}$  движение лавы прекратилось и она затвердела. Заметим, что более высокие значения начальных температур основных лав связаны, в частности, с окислением атмосферным кислородом легко выде-



ляющихся из этих лав газов. Реакции окисления идут с выделением теплоты, что и приводит к дополнительному разогреву изливающейся магмы.

**Роль вулканических газов.** Какие физические причины приводят в действие механизм извержения вулкана? Что заставляет жидкую магму, заполняющую магматический очаг, начать вдруг движение вверх по жерлу вулкана? Современные исследователи считают, что решающую роль играют в данном случае *вулканические газы*.

Мы уже отмечали, что в магме наряду с парами воды содержатся различные газы. Это прежде всего углекислый газ  $\text{CO}_2$ . Кроме того, в магме растворены хлористый и фтористый водород ( $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ), оксид углерода  $\text{CO}$ , метан  $\text{CH}_4$ , азот, водород и другие газы. В состоянии равновесия концентрация растворенных в магме газов соответствует при данной температуре определенному внешнему давлению, под которым находится магма на данной глубине. В физике известен закон Генри: *концентрация газа, растворенного в жидкости, пропорциональна его давлению над жидкостью*. Недаром для получения газированной воды углекислый газ подводят к ней под достаточно большим давлением.

Теперь представим, что давление на глубине (например, там, где находится магматический очаг) вдруг уменьшилось. Это может быть связано, в частности, со сдвигом участков коры в результате землетрясения. Сразу же *нарушается состояние равновесия*; газы, растворенные в магме под высоким давлением, переходят в

газообразное состояние, что, естественно, сопровождается значительным увеличением их объема. Магма вспенивается и вместе с выделившимися из нее газами *начинает подниматься вверх*. По мере ее подъема *давление падает еще больше*, поэтому процесс выделения газов из поднимающейся магмы *все время усиливается*, что, в свою очередь, приводит к *ускорению подъема*.

Выше отмечалось, что в основных магмах отделение газов происходит легче, чем в средних и кислых. Значит, основная магма будет быстрее подниматься по жерлу вулкана (или по трещинам), нежели средняя или кислая. В немалой степени этому способствует также меньшая вязкость основной магмы, о чем мы уже говорили. В результате *основные магмы извергаются быстро и сравнительно спокойно*, тогда как *извержения средних и кислых магм происходят медленно, с образованием пробок, со взрывами*.

Итак, выделение газов из магмы является решающим фактором, вызывающим извержение вулкана. Характер же извержения определяется вязкостью магмы и тем, насколько легко выделяются из нее газы, т. е. в конечном счете определяется *содержанием кремнезема в магме*.

В качестве причины, которая нарушила физико-химическое равновесие и привела к выделению газов из магмы, мы указали внезапное уменьшение давления, связанное с землетрясением. В данном случае вулкан был разбужен внешней причиной — землетрясением. Однако извержение может быть вызвано и чисто *внутренними причинами*. Как полагают ученые, отделение газов может про-

исходить вследствие самопроизвольно (спонтанно) возникающих в магме химических процессов полимеризации, когда молекулы  $\text{SiO}_2$  вдруг начинают объединяться в цепочки полимерных молекул.

**Что такое гейзер.** В стихотворении, посвященном Исландии, К. Д. Бальмонт писал:

Валуны и равнины, залитые лавой,  
Сонмы глетчеров, брызги горячих ключей,  
Скалы, полные грусти своей величавой,  
Убеленные холодом бледных лучей...

Картина залитых лавой равнин нам уже знакома (напомним рассказ об извержении трещины Лаки). Глетчеры — это ледники (по-немецки). А вот под горячими ключами поэт подразумевал *гейзеры* — источники, которые периодически, через определенные промежутки времени выбрасывают фонтаны горячей воды и пара. Слово «гейзер» исландского происхождения; происходит от *geysa*, что означает «хлынуть».

Гейзеры встречаются не только в Исландии. Ими можно любоваться также в США (на территории Йеллоустонского национального парка), Новой Зеландии, Японии. В СССР гейзеры сосредоточены, и притом в большом количестве, на Камчатке (около 100 гейзеров). Одна из рек Камчатки так и называется — Гейзерная. В ее долине находится около 20 крупных гейзеров, и среди них самый большой гейзер Камчатки — Великан. Он выбрасывает фонтан воды высотой до 40 м, при этом столб пара поднимается до нескольких сотен метров. Извержение большого гейзера — удивительно красивое зрелище (рис. 16.11). Окутанная паром мощная струя кипя-

щей воды с грохотом взметается вверх, рассыпаясь на большой высоте мириадами брызг. Фонтан бьет некоторое время, затем струя исчезает, рассеивается пар и все успокаивается. Как правило, вокруг гейзера есть небольшой природный бассейн диаметром до нескольких метров. Земля вокруг гейзеров обычно теплая и даже горячая.

Главное, что отличает гейзеры от прочих теплых и горячих источников, — это *периодичность действия*. Промежутки времени между извержениями различны у разных гейзеров. Одни гейзеры извергают струю кипятка через каждые 10...20 мин, другие — всего один-два раза в месяц. Так,



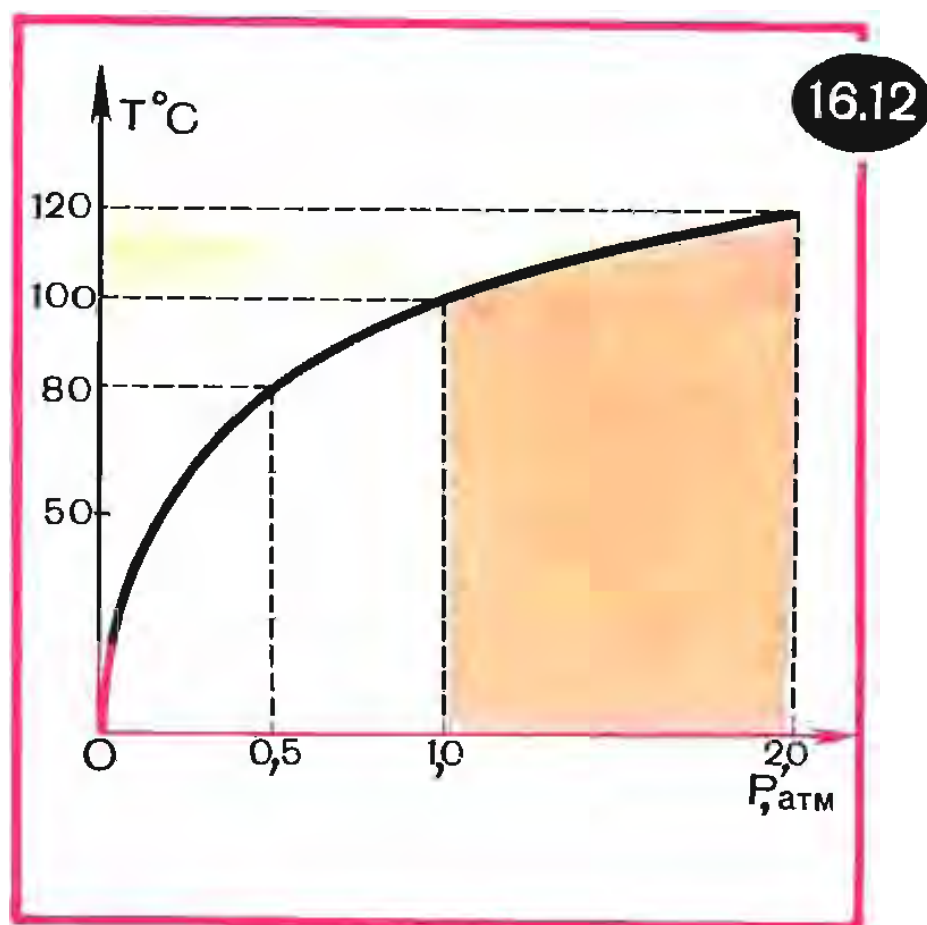


извержения гейзера Старый Служака в США повторяются всякий раз через 50...70 мин. Почти у всех гейзеров извержение длится всего несколько минут.

Заглянем в бассейн гейзера сразу после того, как прекратилось извержение. Мы обнаружим, что воды в нем нет. В центре бассейна хорошо видно отверстие — это уходящий в глубь земли канал, его называют трубкой гейзера. Например, у Большого гейзера в Исландии трубка имеет диаметр 3 м и уходит в глубину на 23 м. Перед началом извержения вода поднимается по трубке, заполняет бассейн, бурлит — и вдруг вверх взмывает фонтан кипятка. После окончания извержения вода из бассейна постепенно снова уходит в трубку.

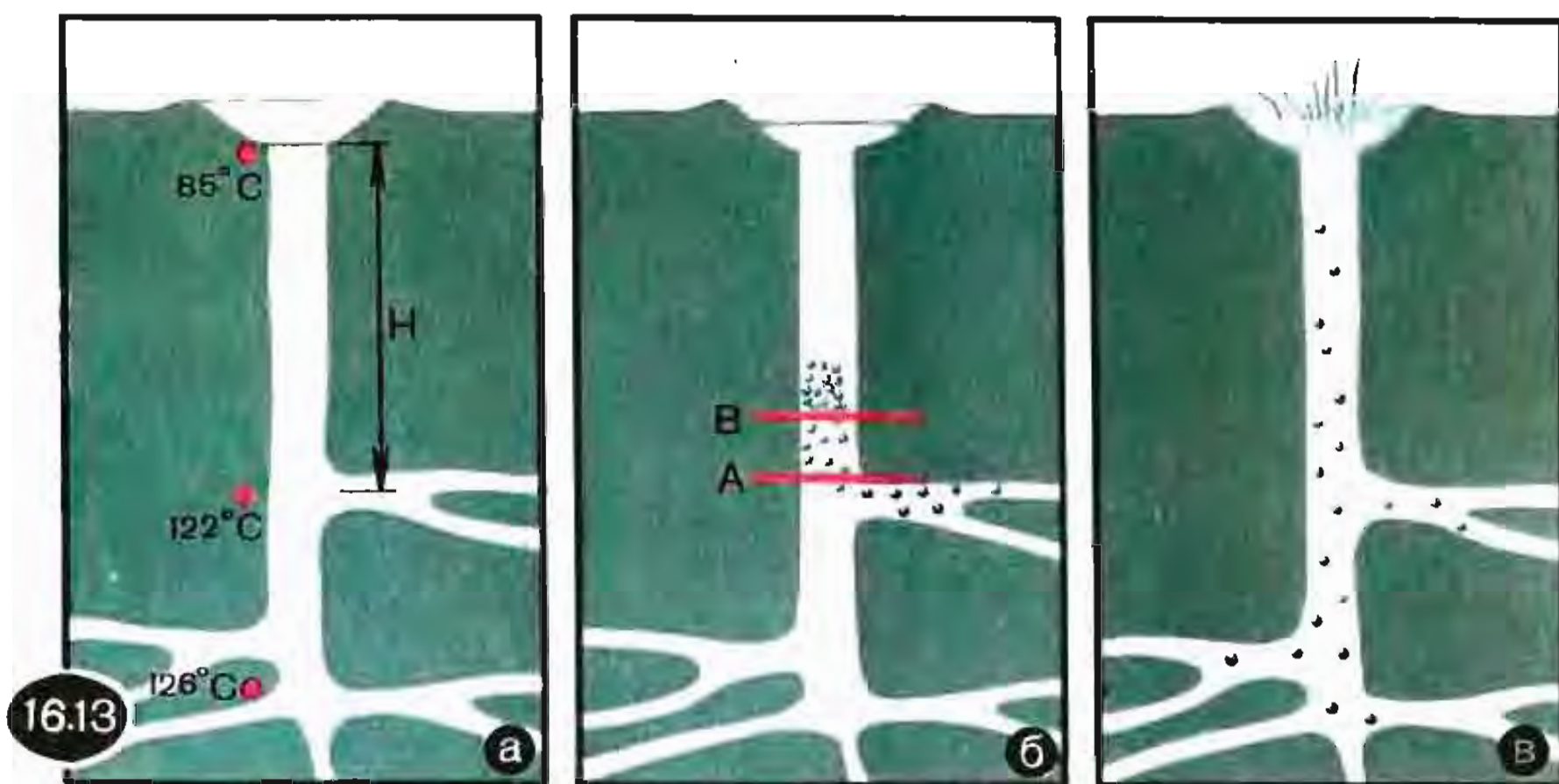
**Физика гейзера.** Гейзеры располагаются вблизи действующих или сравнительно недавно уснувших вулканов. Распространяющаяся от магматического очага теплота нагревает почти до кипения подземные воды, которые заполняют трещины и разломы вблизи земной поверхности. Извержения гейзеров не имеют ничего общего с извержениями вулканов. Однако для извержений гейзеров необходима теплота, поступающая от вулканов. Поэтому гейзеры принято рассматривать как вторичные вулканические явления.

Прежде чем обсуждать физику гейзера, напомним, что температура кипения воды зависит от давления. С увеличением давления температура кипения повышается. На рисунке 16.12 приведен график зависимости температуры кипения  $T$  от давления  $p$ . При  $p=1$  атм имеем  $T=100^\circ\text{C}$ . Когда давление



понижается до 0,5 атм, температура кипения уменьшается до  $80^\circ\text{C}$ . При повышении давления до 2 атм температура кипения увеличивается до  $120^\circ\text{C}$ .

Представим себе 20-метровую гейзерную трубку, наполненную горячей водой (рис.16.13,а). Используя результаты конкретных измерений, выполненных непосредственно перед извержением гейзера, будем считать, что у вершины трубки температура равна  $85^\circ\text{C}$ , на глубине  $H=13$  м она составляет  $122^\circ\text{C}$ , а у самого дна трубки  $126^\circ\text{C}$ . По мере увеличения глубины температура воды в трубке растет. Одновременно возрастает и давление — оно складывается из атмосферного давления и давления столба воды в трубке (с погружением возрастает высота, а значит, и давление столба воды). При этом везде по длине трубки температура воды оказывается немного ниже температуры кипения, соответствующей давлению на той или иной глубине. В частности, на глубине  $H=13$  м давление несколько выше 2 атм,



так что температура кипения равна  $124^{\circ}\text{C}$ , вода же на этой глубине имеет, как мы уже сказали, температуру  $122^{\circ}\text{C}$ , т. е. на два градуса ниже температуры кипения.

Теперь предположим, что по одному из боковых протоков в трубку поступила порция пара. Пар вошел в трубку на глубине  $H=13$  м и поднял воду, находившуюся на уровне А, до уровня В, расположенного двумя метрами выше (рис. 16.13,б); при этом масса воды в объеме, соответствующем двум метрам трубки, перелилась в бассейн. В результате подъема вода, имеющая температуру  $122^{\circ}\text{C}$ , переместилась с глубины 13 м на глубину 11 м, где температура кипения равна  $121^{\circ}\text{C}$ . Теперь температура кипения воды в рассматриваемой области трубки оказывается выше температуры кипения. Вода немедленно закипает.

При кипении образуется пар, который еще выше поднимает воду в верхней половине трубки, заставляя ее выливаться в бассейн. По мере перехода воды из трубки в бассейн давление на нижние

слои воды в трубке продолжает уменьшаться, и наступает момент, когда закипает вся оставшаяся в трубке масса воды. В этот момент образуется сразу большое количество пара; расширяясь, он с огромной скоростью устремляется вверх, выбрасывая остатки воды из трубки и часть воды из бассейна (рис. 16.13,в), — происходит извержение гейзера.

Но вот весь пар из трубки вышел, вода, подброшенная вверх, стекла снова в бассейн, охлаждалась и постепенно снова заполнила трубку. Время от времени внизу слышатся взрывы — это внутри трубки попадают из боковых протоков порции пара. Однако очередной выброс воды начнется лишь тогда, когда вода в трубке нагреется до температуры, близкой к температуре кипения.

**Гейзеры и обычные термальные источники.** Там, где встречаются гейзеры, обязательно имеется большое количество горячих источников и паровых струй. Их



относят к *обычным* термальным источникам; они функционируют практически стабильно. Гейзеры могут быть названы *необычными* термальными источниками: для них характерен периодический взрывной характер функционирования — через определенные промежутки времени происходит бурное извержение.

С точки зрения физики имеется принципиальное различие между гейзерами и обычными термальными источниками, предопределяющее существенно разный характер их функционирования. В обоих случаях действуют процессы подвода теплоты, которая поступает от магматического очага, и процессы отвода теплоты, которая так или иначе передается окружающей среде. В случае обычных термальных источников существует *постоянный баланс между теплоподводом и теплоотводом*: сколько теплоты в единицу времени получает источник, столько же теплоты он в единицу времени теряет. *В случае же гейзера подобного баланса нет.* На всех стадиях деятельности гейзера, за исключением стадии извержения, теплоподвод больше теплоотвода, и поэтому происходит постепенное нагревание воды в

гейзерной трубке. Рано или поздно это приводит к взрыву: процесс теплоотвода вдруг качественно меняется — вода в трубке вскипает, гейзер извергается. На стадии извержения гейзера теплоотвод существенно больше теплоподвода.

Установлено, что гейзеру всегда *предшествует* обычный термальный источник (горячий или кипящий), в котором процессы теплоподвода и теплоотвода сбалансированы. При некоторых условиях баланс нарушается, и источник переходит в гейзерный режим, т. е. превращается в гейзер. Анализ условий такого перехода достаточно сложен. Отметим только, что важную роль играет в данном случае изменение в процессах конвекции, происходящих в водной массе источника, а также возникновение условий, препятствующих свободному выходу пара из системы. Иногда переход в гейзерный режим совершается в результате небольшого уменьшения площади сечения трубки.

В заключение отметим, что по сравнению с обычными термальными источниками гейзеры представляют собой относительно редкое явление.

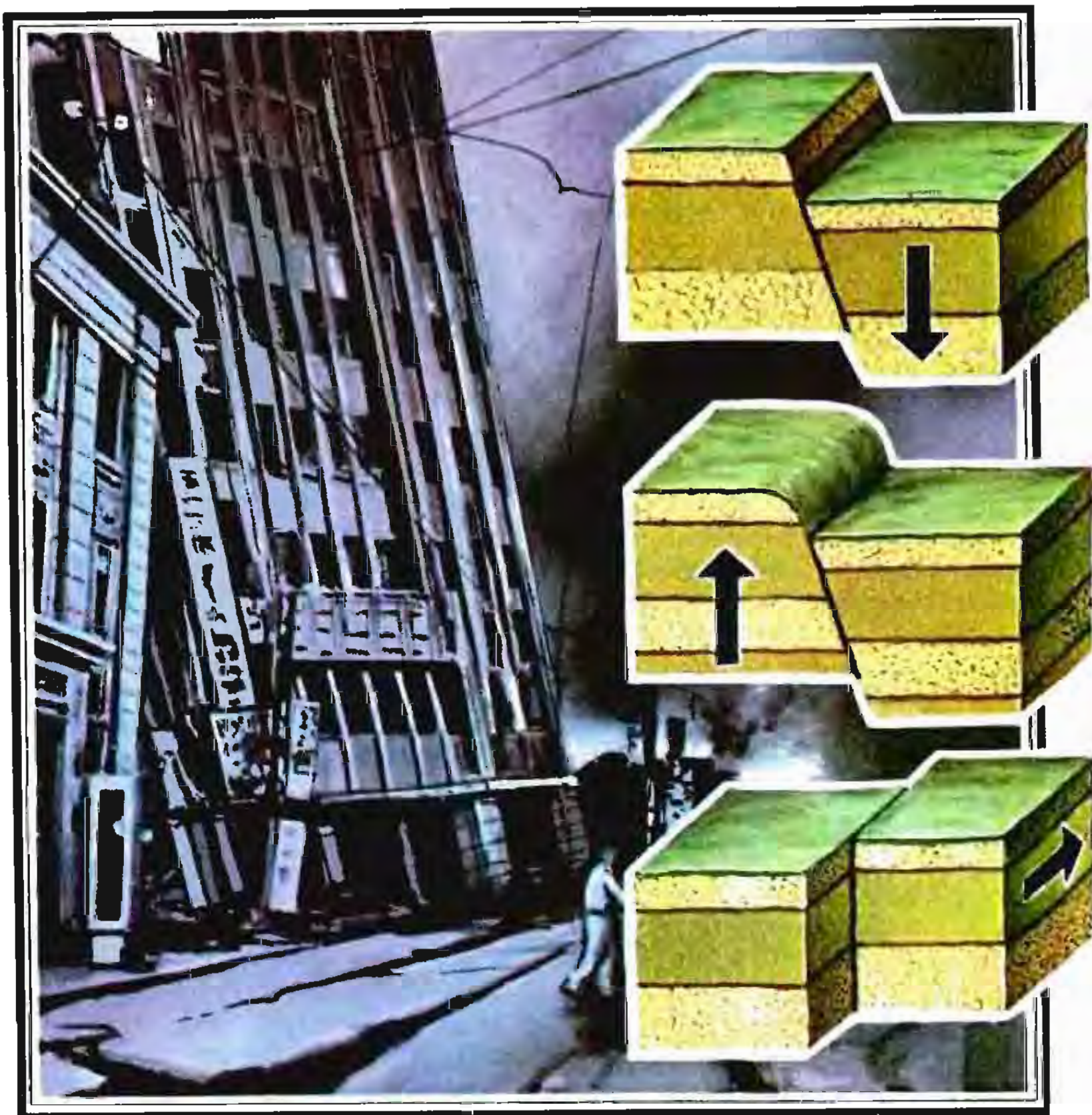
Глава

# 17

## Землетрясение

Вся земля сотряслась, туч метнулась гряда.  
Сотрясенье земли унесло города...  
Все оковы небес разомкнуться смогли.  
Свел разгул сотрясенья суставы земли,  
Сжал он бедную землю в такие тиски,  
Что огромные скалы разбил на куски...

*Низами*





Содрогается земля, раскрываются глубокие трещины, сдвигаются пласты пород, с грохотом разламываются скалы, падают могучие деревья, рушатся дома, мосты, линии коммуникаций, возникают пожары... Земная твердь, эта надежная опора, вдруг предает. Что может быть страшнее? «Сильное землетрясение сразу разрушает наиболее привычные наши представления,— писал Чарлз Дарвин.— Земля — самый символ незыблемости — движется у нас под ногами подобно тонкой корке на жидкости, и этот миг порождает в нашем сознании какое-то необычное ощущение неуверенности...»

Порождаемое землетрясением чувство страха и беспомощности наводило людей на мысли о роке, карающем божь, выпущенных на волю исчадиях ада. Землетрясения нашли отражение во многих мифах, легендах, сказаниях. Вспомним, например, прекрасный древнегреческий миф о титане Прометее, который похитил у богов огонь и передал его людям. За это Прометей по велению Зевса был прикован цепями к скале и обречен на жестокие муки. «...И вот задрожала земля, проревел глухой отголосок грома. Молния блещет огненными извивами, прах взвивается вихрем; все ветры, освобожденные от цепей, рвутся на общую битву; поднятое море сливается с небесами, и скала с титаном низвергается в пропасть. Тысячелетия скованный Прометей томится в мрачной расселине скал...» В предыдущей главе мы упоминали легенду о борьбе Зевса с огнедышащим Тифоном. Это чудовище было у древних греков олицетворением одновременно и вулканов, и зем-

летрясений. В легенде нашли отражение оба грозных явления природы — и извержение вулкана, и сильное землетрясение.

Легенды североамериканских индейцев легли в основу «Песни о Гайавате» Г. Лонгфелло. Постоянно страдая от сильных бурь и ураганов, индейцы создали в своем воображении образ злобного владыки ветров Меджекивиса, восседающего на вершинах Скалистых гор. Но не только бури и ураганы беспокоили индейцев, они были знакомы также с землетрясениями. Индейцы думали, что земля сотрясается, когда начинается борьба добрых сил со злобным Меджекивисом. В «Песне о Гайавате» в борьбу с ним вступает его сын — Гайавата.

Быстро встал тогда, сверкая  
Грозным взором, Гайавата,  
На утес занес он руку...  
Разломил его вершину,  
Раздробил его в осколки,  
Стал в отца швырять свирепо...  
Словно град летели камни  
С треском с Вавбика, утеса,  
И на тяжкий грохот боя  
По горам гремело эхо...

Среди легенд, созданных народами, населявшими Крым, есть легенда о том, как однажды разгневался Аллах на людей, которые перестали повиноваться ему. Аллах решил наказать непокорных и послал на них огромного медведя. «Вышел из моря громадный тяжелый и страшный медведь и двинулся вдоль берега. Своею грузной тяжестью все разрушал он на своем пути. Страшные лапы его раздавливали все, что под них попадало. Под тяжестью медведя поползла земля со склонов гор, обнажились твердые каменные нед-

ра. Но и камень не устоял перед небывалым грузом; рушились с грохотом скалы и целые горы, рассыпая далеко вокруг груды осколков...» Эта легенда имеет интересный конец. Когда медведь вышел к цветущим долинам, он был так очарован их красотой, что тут же забыл о повелении Аллаха и возвратился к морю. Увидел Аллах, что медведь больше не слушается его. «Оставайся же навек на этом месте», — произнес он заклинание. И тогда медведь окаменел — превратился в знаменитую Медведь-гору.

Изучая древние поэтические произведения и сказания, современные исследователи могут во многих случаях установить место, время и последствия отдельных сильных землетрясений. Одно из таких землетрясений, случившееся в V в. до н. э. в Крыму (в древней Тавриде), описано в трагедии Еврипида «Ифигения в Тавриде». В переводе И. Ф. Анненского слова Ифигении звучат так:

И вдруг удар подземный... Выбегаю  
Из терема и вижу, что карниз  
Обрушился, что крыша вся в обломках,  
Вся на земле... и будто из колонн  
Одна всего осталась в нашем доме...

Первоначальные объяснения природы землетрясений основывались на наивных представлениях об устройстве мира. Согласно верованиям древних жителей Алтая, Земля держится на трех огромных китах, плавающих в океане. Когда киты двигаются, покоящаяся на них Земля покачивается, — тогда и происходит землетрясение.

В средние века сформировались более реалистические взгляды на природу землетрясений. Считалось, например, что причи-

ной землетрясений является движение ветров, запертых внутри земных недр. Приведем в связи с этим следующие строки из «Божественной комедии» Данте:

...Внизу трясет, быть может, временами,  
Но здесь ни разу эта вышина  
Не сотряслась подземными ветрами.

О распространенности таких представлений о природе землетрясений свидетельствуют также следующие строки из «Генриха IV» Шекспира:

В природе страждущей бывают часто  
Броженья странные; нередко землю,  
Беременную спазмами, терзают  
В ее утробе замкнутые ветры,  
Которые, стремясь к освобожденью,  
Прабабку нашу землю так трясут,  
Что рушатся замшелые твердыни  
И колокольни...

Конечно, представление о подземных ветрах, вызывающих сотрясение земной поверхности, более реалистично по сравнению с гипотезой о трех китах. Но и оно не соответствует действительности. Не бушуют в недрах земли ветры. Все это оказалось всего лишь фантазией. Ее породила красивая легенда о царе ветров Эоле, который якобы держит все ветры земли скованными в пещере и время от времени выпускает их на свободу (напомним упоминание в мифе о Прометее о «ветрах, освобожденных от цепей»).

Истинную природу землетрясений выявила современная наука, точнее говоря, тесный союз трех наук: геологии, физики и химии. Хотя, надо признать, и по сей день в вопросе о происхождении землетрясений осталось еще много неразгаданного.



**Бедствия, причиняемые землетрясениями.** Цунами, тропические циклоны, извержения вулканов... А теперь еще землетрясения. Да, природа может быть очень суровой по отношению к человеку. Среди ее особенно грозных явлений землетрясения стоят на одном из первых мест. Ежегодно в мире гибнут от землетрясений в среднем около 10 тыс. человек. Отдельные особо катастрофические землетрясения уносят сразу до нескольких сотен тысяч жизней. Каждый год на Земле происходят 100...120 землетрясений, способных вызвать разрушения, из них 10...20 землетрясений оказываются достаточно сильными.

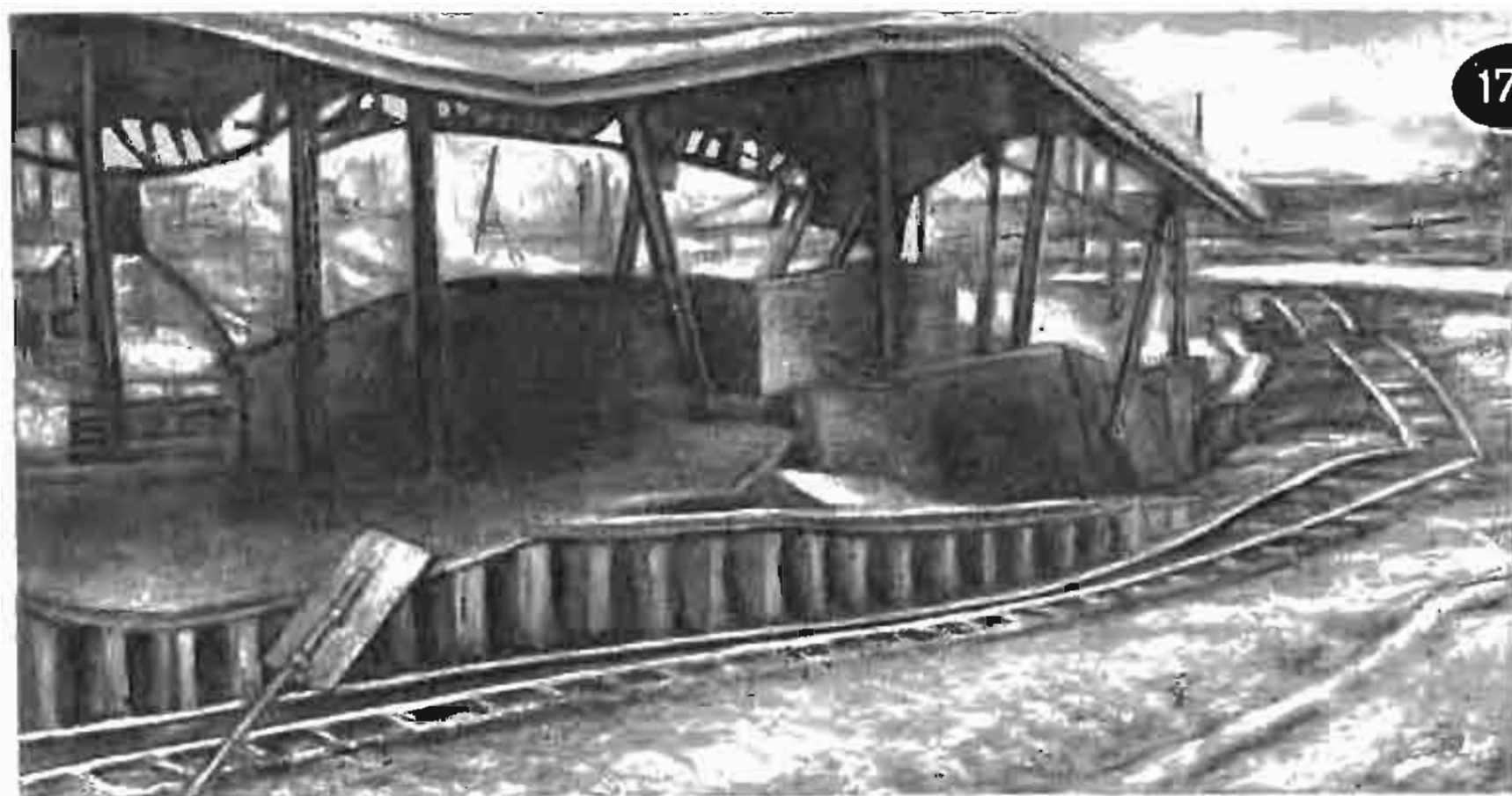
Степень катастрофичности землетрясения измеряется не только числом погибших людей, но также и теми разрушениями, которые оно вызывает или могло бы вызвать. Ниже мы познакомимся с тем, как оценивается интенсивность землетрясения. Пока же заметим, что землетрясение может быть очень сильным, а в то же время число жертв оказывается значительно меньше, чем при сравнительно слабом землетрясении. Просто сильное землетрясение произошло в слабо заселенной местности, а слабое локализовалось в пределах плотно заселенного города. Многие зависят также от характера местности и типа земных пород в данном районе. Большую роль играет и фактор внезапности: при своевременном предупреждении о землетрясении люди эвакуируются из опасной зоны.

Картины разрушений, производимых землетрясениями, подчас очень страшны. Они могут напоминать последствия мощного артиллерийского обстрела или бом-

бардировки — обрушившиеся стены домов, вывороченные с корнями деревья, испещренная глубокими ямами поверхность, всюду горы всевозможных обломков, пожары. Последствия землетрясений могут подчас принимать фантастический вид — как если бы чья-то гигантская рука вдруг смяла рельсы железной дороги, согнула толстые металлические балки, искривила фундаменты. В качестве примера на рисунке 17.1 приведена фотография железнодорожной станции Ниигата (Япония) после землетрясения в июне 1964 г. Фотография наглядно свидетельствует о большой силе землетрясения; к счастью, в Ниигате погибло только 12 человек.

Говоря о последствиях землетрясений, нельзя не вспомнить еще раз о волнах цунами (мы рассказывали о них в главе 15). Между прочим, огромное число жертв в печально знаменитом лиссабонском землетрясении 1755 г. было в значительной мере связано с порожденной этим землетрясением волной цунами. Волна высотой до 30 м обрушилась на Лиссабон и произвела огромные опустошения. Большая волна цунами (высотой более 10 м) возникла и во время катастрофического землетрясения в Японии, случившегося в 1923 г.

Наконец, надо учитывать и такие последствия землетрясений, как массовые пожары. Они являются спутниками очень многих землетрясений, включая упомянутые выше лиссабонское и японское. При японском землетрясении 1923 г. сильно пострадали Токио и Иокогама. На одной из площадей Токио погибло около 40 тыс. человек — они задохнулись в раскаленном воздухе, когда по-



жар охватил окружающие здания. Пожар уничтожил в Токио и Иокогаме сотни тысяч домов.

**Основные понятия и характеристики.** Наверное, все знают, что существует очаг землетрясения. Что это такое? Раньше под очагом землетрясения понимали некоторую точку в земных недрах, откуда во все стороны расходятся упругие волны — так называемые *сейсмические волны* (по-гречески «землетрясение» — «сейсмос»). Оказалось, однако, что сейсмические волны рождаются не в какой-либо точке, а в некотором объеме внутриземного пространства. Именно этот объем и называют теперь *очагом землетрясения*.

В пределах очага происходит *разрыв* подземных пород и *смещение* их по этому разрыву. Разрыв формируется отнюдь не мгновенно, он начинается в какой-то точке — там, где механическое напряжение велико, а сопротивление пород разрыву относительно мало. От этой точки и развивается про-

цесс смещения пород. Указанная точка есть *фокус* или, иначе, *гипоцентр* землетрясения. Геологи говорят, что «вспарывание разрыва» при землетрясении начинается от фокуса (гипоцентра) и происходит в пределах очаговой области. Заметим, что протяженность разрыва (а значит, и очаговой области) может достигать десятков, а в отдельных случаях даже сотен километров. Точка на поверхности земли, находящаяся над фокусом землетрясения, называется *эпицентром*.

Различают два типа сейсмических волн — *объемные* и *поверхностные*. Объемные волны распространяются во все стороны от очага сквозь объем, заполненный подземными породами. Поверхностные волны распространяются в приповерхностных слоях земной оболочки, они порождаются объемными волнами. Таким образом, земной поверхности достается как от объемных волн (когда они достигают ее), так и от поверхностных. Недаром сооружения на поверхности земли страдают от зем-



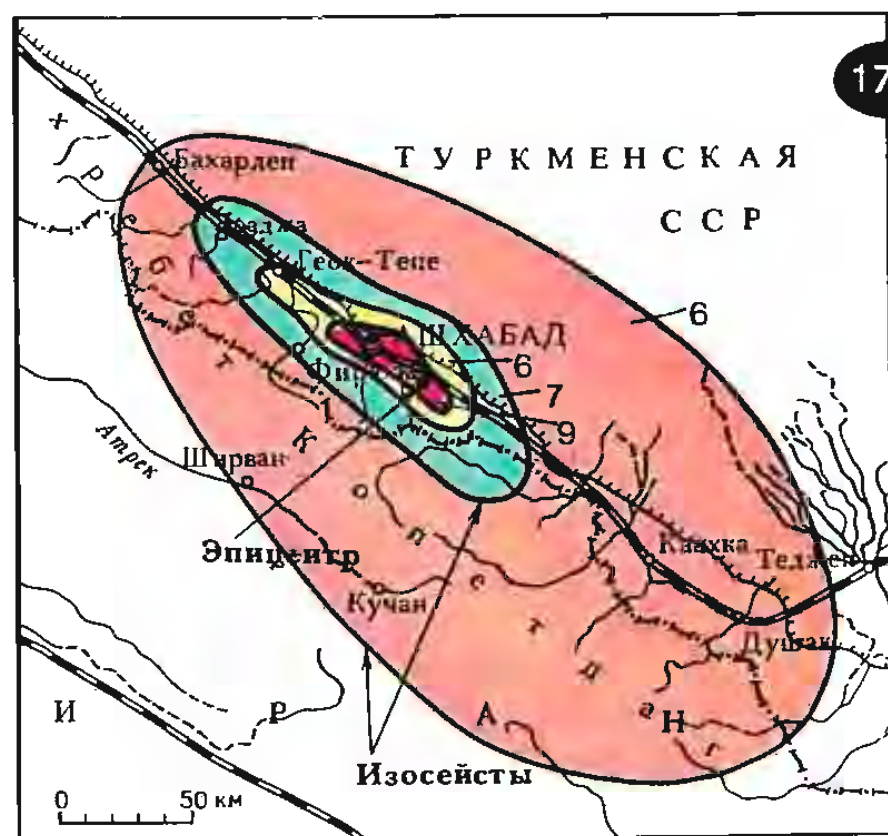
летрясений сильнее, чем подземные сооружения. При этом особенно опасны *поперечные* сейсмические волны (как объемные, так и поверхностные) — именно они раскачивают вверх-вниз, а также из стороны в сторону все, что находится на поверхности. Поперечные сейсмические волны производят значительно больше разрушений, чем продольные. Отметим, что различные сейсмические волны распространяются с разной скоростью. Скорость поперечных объемных волн примерно вдвое меньше скорости продольных объемных; еще медленнее распространяются поверхностные волны. Перед землетрясением часто слышен гул: это достигли поверхности земли наиболее быстрые сейсмические волны — продольные объемные. Позднее приходят поперечные объемные волны, производящие разрушения. Еще позднее приходят поверхностные сейсмические волны, которые довершают картину разрушений.

Интенсивность землетрясений на поверхности земли оценивают в баллах.

В СССР применяется 12-балльная шкала (шкала MSK-64). Различают *слабые* землетрясения (от 1 до 4 баллов), *сильные* (от 5 до 7 баллов) и *разрушительные* (от 8 баллов). Сейсмические колебания при 3 баллах ощущают лишь некоторые люди и только внутри помещения. При 4 баллах начинают качаться висячие предметы, спящие люди просыпаются. При 6 баллах возможно появление легких повреждений в зданиях. Когда интенсивность землетрясения возрастает до 8 баллов, повреждения становятся серьезными — растрескиваются стены, падают трубы и карнизы, обруши-

ваются лестницы и пролеты; начинается всеобщая паника. Практически полное разрушение отдельных зданий наблюдается при 10-балльном землетрясении; при этом происходят значительные сдвиги и изгибы земной поверхности, возникают провалы и глубокие трещины.

Обратим внимание читателя на то, что сама по себе фраза «интенсивность землетрясения оценивается во столько-то баллов» является неточной. Необходимо указать, как далеко от эпицентра находится наблюдатель. Наиболее сильны сейсмические колебания в эпицентре и вблизи него; по мере удаления от эпицентра колебания, естественно, затухают. Данное землетрясение может быть разрушительным вблизи эпицентра; если же мы будем удаляться от эпицентра, то интенсивность землетрясения будет постепенно уменьшаться. На рисунке 17.2 приведена карта, характеризующая ашхабадское землетрясение 1948 г. В области, наиболее близкой к эпицентру (она закрашена красным), интенсивность землетрясе-



ния достигала 9 баллов; в пределах области, показанной на рисунке желтым цветом, интенсивность оценивалась в 8 баллов, в пределах зеленой области — 7 баллов, в пределах оранжевой — 6 баллов. Линии, разграничивающие различные области, называют *изосейстами*. Когда по телевизору сообщают об очередном землетрясении, всегда приводят карту местности с нанесенными на нее изосейстами.

От чего зависит максимальная интенсивность землетрясения, т. е. его интенсивность в эпицентре? Она зависит от ряда факторов: от того, насколько мощным оказался подземный разрыв (как много энергии выделилось внутри очага), от того, насколько глубоко залегает очаг землетрясения, а также от того, каков характер подземных пород в данном месте (как быстро затухают в этих породах сейсмические волны). Количество выделившейся в очаге энергии характеризуется условной безразмерной величиной, называемой *магнитудой*. Чем больше энергия, тем больше магнитуда. У наиболее сильных землетрясений магнитуда равна 8...9. Шкалу значений магнитуд называют также шкалой Рихтера (по имени известного американского сейсмолога). Именно этой шкалой часто пользуются в газетных сообщениях — и, надо сказать, напрасно. Ведь фраза «Вчера в Айзербайджане произошло землетрясение в 6 баллов по шкале Рихтера» ничего не говорит нам до тех пор, пока не будет уточнено, на какой глубине находится очаг данного землетрясения. При магнитуде 6,0 (6 баллов по шкале Рихтера) и глубине очага 10 км сейсмические колебания на поверхности земли в эпицентре

будут оцениваться в 9 баллов (по шкале MSK-64), тогда как при глубине очага 20 км колебания в эпицентре будут существенно слабее — 7 баллов.

**Три типа землетрясений.** Существуют три типа землетрясений: *обвальные, вулканические и тектонические*.

С древних времен вплоть до конца XIX в. полагали, что землетрясения происходят при обвалах в подземных пустотах, причем долгое время считалось, что обвалы вызываются ветрами, бушующими в этих пустотах. Современная наука отвергает такую точку зрения. Обвальные землетрясения действительно существуют, но они редкие и очень слабые, происходят у самой поверхности земли в тех немногих местах, где имеются пещеры. Такие места встречаются, например, в Югославии и на Урале (карстовые области).

Более частыми и более опасными являются вулканические землетрясения. Они начинаются на километровых глубинах и сопутствуют переходу магмы из твердого состояния в жидкое. Особый вид вулканических землетрясений связан со взрывами, которые могут происходить при извержении вулкана.

*Основную группу землетрясений составляют тектонические землетрясения.* Их очаги могут находиться на разных глубинах (от поверхности земли до глубин в десятки километров); они возникают как на суше, так и под дном океанов. Мы уже говорили о том, что внешняя оболочка Земли — литосфера — расчленена на плиты различного размера. Плиты мед-



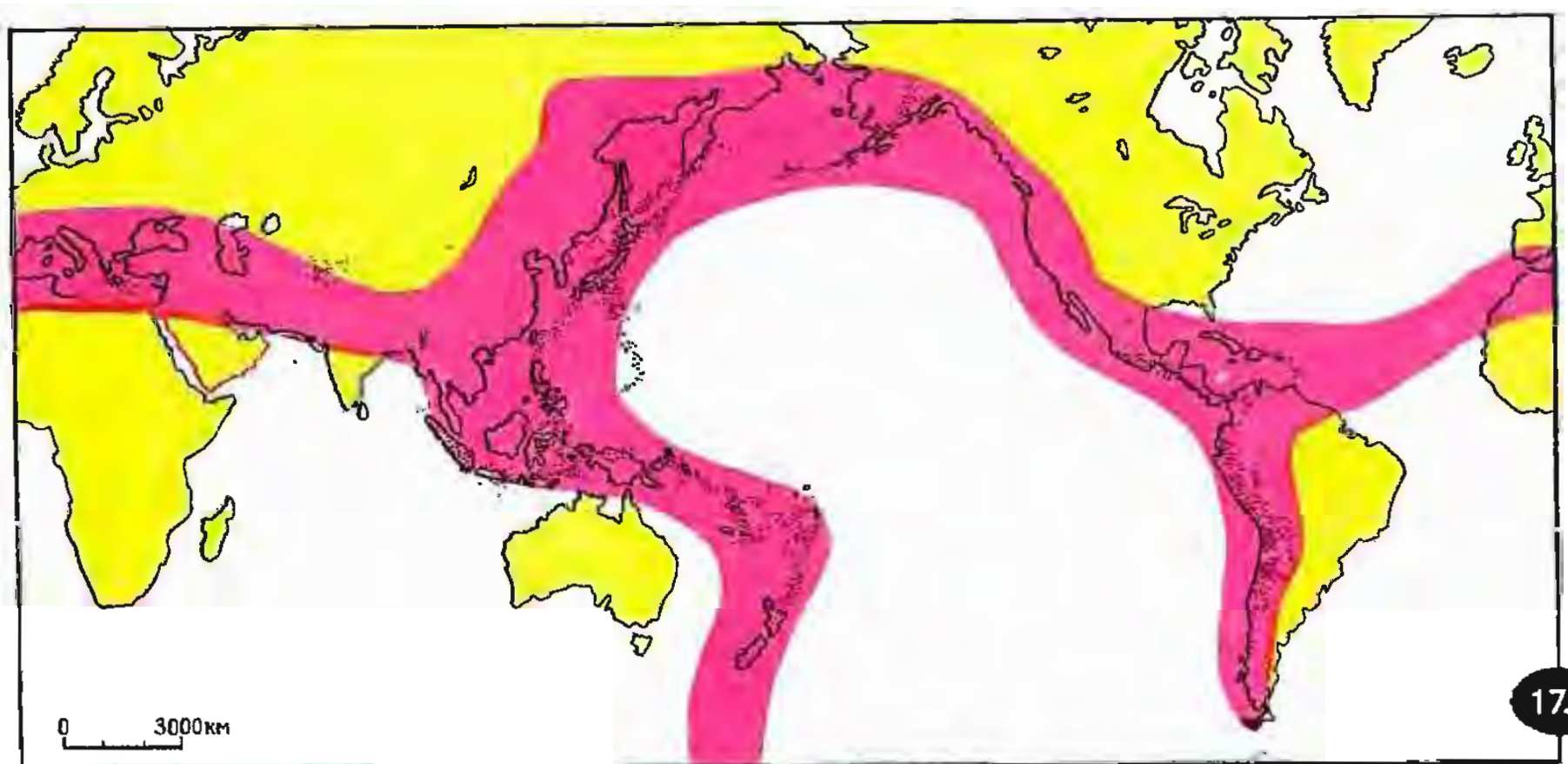
ленно движутся, напирают друг на друга своими краями; края одних плит уходят под края других. В результате на границах литосферных плит возникают огромные механические напряжения; они и приводят к тектоническим землетрясениям.

**География тектонических землетрясений.** На рисунке 17.3 красным цветом отмечены области повышенной сейсмичности на земном шаре, т. е. те области, где тектонические землетрясения происходят относительно часто. Эти области образуют два *сейсмических пояса*: Тихоокеанский и Средиземноморский. Первый кольцом охватывает берега Тихого океана; второй простирается через юг Европы и доходит на востоке до Малайского архипелага. Мелкие точки на рисунке — очаги наиболее сильных землетрясений.

Сравним карту, показанную на рисунке 17.3, с картой литосферных плит и вулканов, которую мы приводили в предыдущей главе. Мы видим, что Тихоокеан-

ский сейсмический пояс проходит вдоль линии желобов, окаймляющих дно Тихого океана; на западе Североамериканского континента он проходит вдоль разлома Сан-Андреас. Средиземноморский сейсмический пояс проходит вдоль Анатолийского разлома, Гималайского и Яванского желобов. (Сущность геологического термина «разлом» мы поясним немного позднее.)

Познакомимся поближе с одной из сейсмически опасных зон земного шара — штатом Калифорния в США. Этот довольно плотно населенный штат находится на Тихоокеанском побережье Америки; его наиболее крупные города — Лос-Анджелес и Сан-Франциско. Наверное, лишь немногие калифорнийцы знают, что они живут как раз на границе двух больших литосферных плит. Между этими плитами вдоль всего побережья тянется разлом Сан-Андреас, рассекающий земную кору Калифорнии на глубине до 20 км. В действительности здесь существует не просто разлом, а целая система разломов, она пока-



зана в упрощенном виде на рисунке 17.4 (см. красные линии). Блоки земной коры время от времени смещаются относительно друг друга вдоль линии разлома — и тогда происходят землетрясения. Красными кружками на рисунке отмечены эпицентры сильных землетрясений; чем больше магнитуда землетрясений, тем крупнее кружок. Указаны годы отдельных землетрясений. Надо сказать, что в Калифорнии ежегодно регистрируется до 300 подземных толчков. Недаром ее называют «страной землетрясений».

**Что происходит в очаге землетрясения?** В общих чертах мы уже дали ответ на этот вопрос: там происходит разрыв подземных пород. В данном случае геологи используют специальный термин — *разлом*. Разлом возникает, когда породы по обе стороны от разрыва смещаются относительно друг друга настолько, что нарушается соответствие слоев.

Разлом может образоваться под действием различных механических усилий — растяжения, сжатия, сдвига. Соответственно различают три основных типа геологических разломов. Растягивающие усилия могут привести к тому, что некоторый объем породы соскользнет вниз — возникнет разлом, называемый *нормальным сбросом*. При сжатии часть породы может быть «выдавлена» вверх, такой разлом называют *обращенным сбросом*. Возможно также перемещение одного объема породы относительно другого при наличии сдвигающих усилий; в этом случае говорят о *поперечном сбросе*. Все три типа сбросов поясняют рисунки, которые можно видеть в

правой части с. 251. Верхний рисунок дает представление о нормальном сбросе, средний — об обращенном сбросе, нижний — поперечном сбросе.

Рассмотрим поперечный сброс, используя так называемую *гипотезу упругой отдачи*. Обратимся в связи с этим к рисунку 17.5. На нем красным цветом показана мысленно выделенная область подземных пород размерами порядка 100 км; вдоль синей линии залегают относительно слабые породы. На рисунке изображены три ситуации. Ситуация 1 — отсутствуют какие-либо механические напряжения. Ситуация 2 — возникли сдвигающие усилия (они показаны на рисунке стрелками). В этом случае происходит искривление границ выделенной области — породы деформируются. По мере нарастания деформаций в породах постепенно накапливается энергия. Это напоминает постепенное накапливание потенциальной энергии в сжимаемом упругом теле, например в пружине. Рано или поздно напряжения в деформированных породах становятся настолько значительными, что слабые породы (залегающие вдоль синей линии) не выдерживают напряжений, и происходит разрыв и сдвиг пород вдоль линии ослабления (ситуация 3 на рисунке 17.5). При этом накопившаяся в деформированных породах энергия немедленно высвобождается (как если бы сжатая пружина вдруг распрямилась), превращаясь в энергию сейсмических волн.

На рисунке 17.6 показан схематически разрез через очаговую область ташкентского землетрясения, случившегося 26 апреля 1966 г. Магнитуда землетрясения 5,3; интенсивность в эпицентре

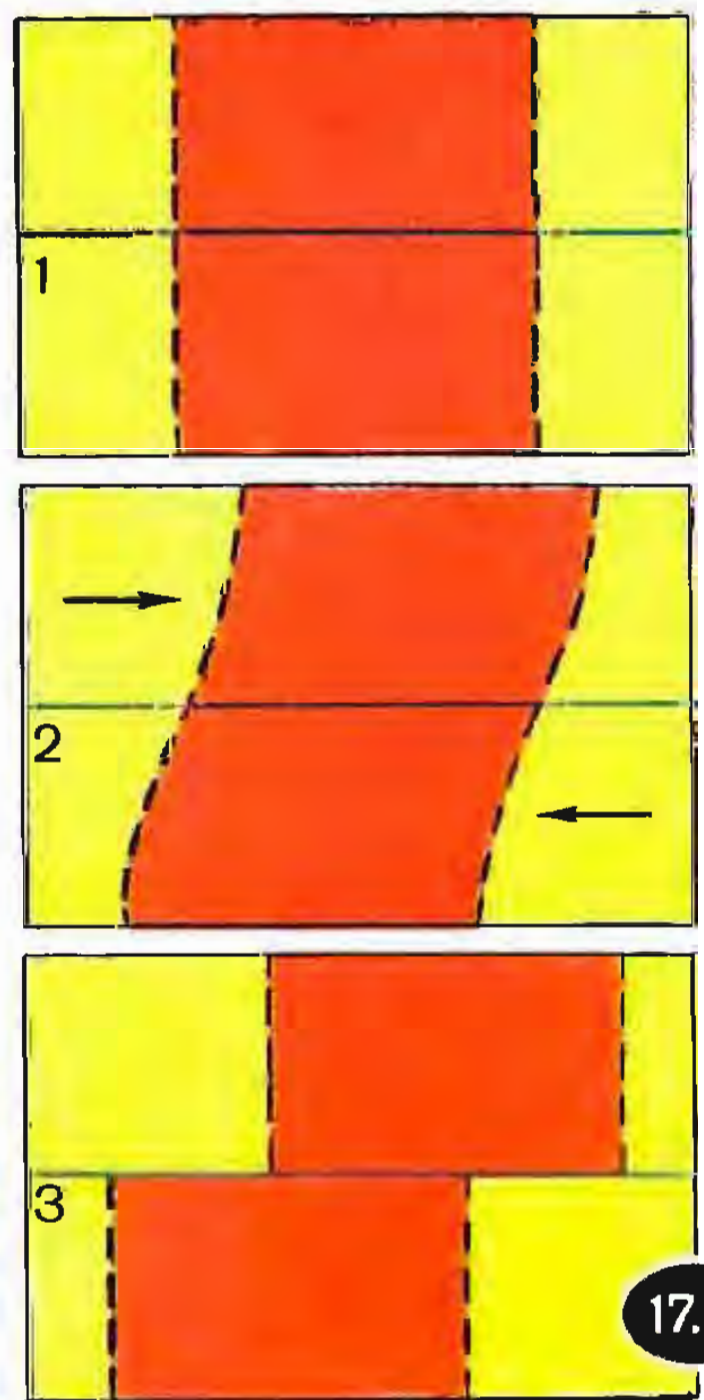


достигала 8 баллов. Фокус землетрясения находился на глубине 8 км прямо под центром Ташкента. Кружками на рисунке выделены очаговые области основного подземного толчка (самый большой кружок) и серии последующих толчков. Основной разлом произошел на глубине 8 км; при этом породы сдвинулись относительно друг друга примерно на 50 см. По мере подъема сдвиг пород постепенно уменьшался. На поверхности земли в эпицентре возникло вспучивание высотой 3,5 см.

В рассмотренном случае разлом произошел в пределах достаточно большой области — от глубины 8 км до глубины 3 км; но на

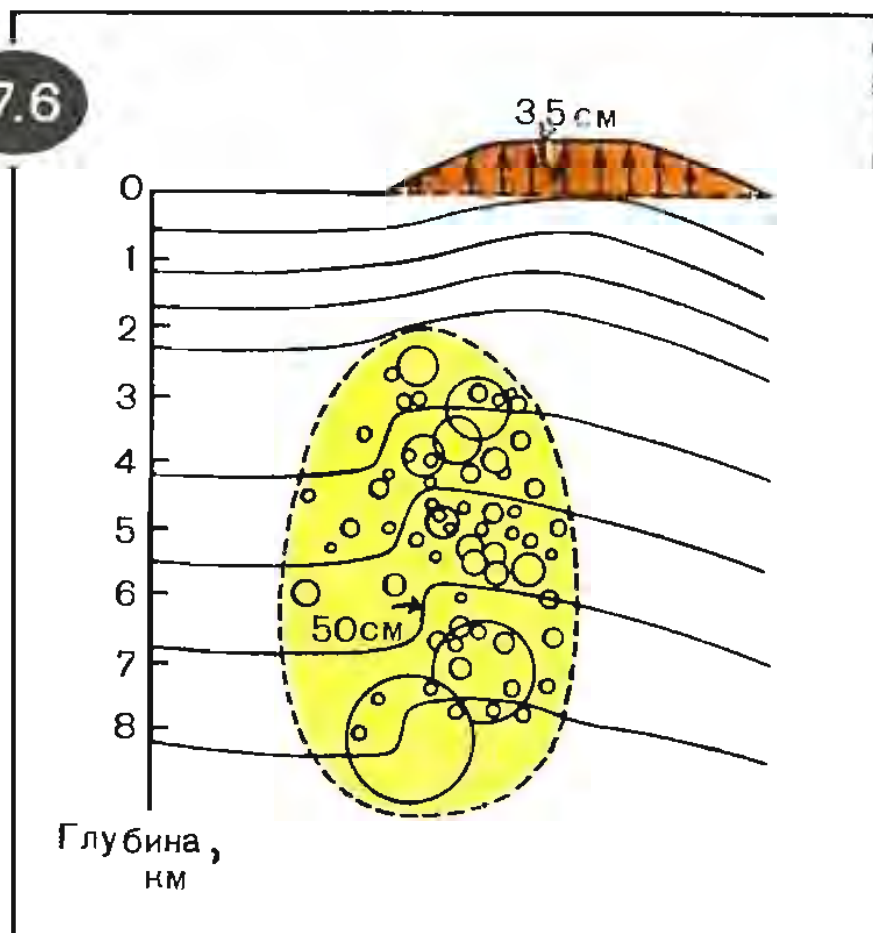
поверхность земли разлом не вышел. Известны, однако, случаи, когда разлом выходит на поверхность. При этом может наблюдаться *вертикальный сброс пород*, на земной поверхности образуется характерный *уступ*. На рисунке 17.7 приведена фотография такого уступа вдоль разлома в Квикесе (Перу), образовавшегося после анкашского землетрясения в 1946 г. Высота уступа достигает 3 м.

Необходимо отметить, что физика процессов, происходящих в очаге землетрясения, исследована пока явно недостаточно. В частности, требует специального изучения вопрос о влиянии подземных вод на образование очагов землетрясений. То, что *подземные*





17.6



воды усиливают сейсмичность, не подлежит сомнению, поскольку они ослабляют породы. С этим вопросом тесно связан вопрос о так называемых *возбужденных землетрясениях* — землетрясениях, возникающих в результате деятельности человека (при создании больших водохранилищ, бурении глубоких скважин, проведении взрывных работ). Установлено, что водохранилища и скважины могут заметно ослабить подземные породы, усилить напряженное состояние пород и тем самым спровоцировать разрядку накопившихся тектонических напряжений.

**К вопросу о предсказании землетрясений.** Вполне возможен достаточно точный прогноз землетрясений — предсказание места и времени их возникновения, а также интенсивность в эпицентре. В качестве примера укажем прогноз хайченского землетрясения 4 февраля 1975 г. (Китай, провинция Ляонин). Официальное оповеще-

17.7



ние о предстоящем сильном землетрясении было сделано за 9 часов до того, как оно началось. Разразившееся землетрясение действительно оказалось очень сильным: оно разрушило до половины зданий в районе с населением более миллиона человек. Однако благодаря своевременно принятым мерам число жертв было сравнительно небольшим — погибло 300 человек. Немалый опыт в прогнозировании землетрясений накоплен в нашей стране, в США и ряде других стран. Тем не менее было бы неправильно считать, что вопрос о предсказании землетрясений полностью решен. Прошло всего полтора года после упомянутого выше хайченского землетрясения, и в том же Китае произошло ужасающее по числу жертв таншаньское землетрясение (27 июля 1976 г.): оно унесло более 600 тыс. человеческих жизней.

На чем основывается возможность предсказания землетрясений? Не входя здесь в детали, напомним лишь, что *перед началом землетрясений подземные породы*



оказываются в сильно напряженном состоянии. Возникновение значительных механических напряжений заметно изменяет свойства пород — эти свойства становятся необычными, или, как говорят, аномальными. Наблюдаются аномалии разного рода — электрические, магнитные, упругие и т. д. Так, например, под действием сильных механических нагрузок в веществе может возникать электрическое поле (этот физический эффект называют *пьезоэлектрическим*); следовательно, электризация пород может рассматриваться как предвестник землетрясения. В напряженных породах упругие волны распространяются иначе, чем в ненапряженных. Напряжения влияют также на циркуляцию подземных вод, на характер заполнения водами трещин и скважин.

Отдельно отметим *химический метод* прогнозирования землетрясений. Оказалось, что при формировании очага землетрясения и нарастании механических напряжений резко увеличивается концентрация в подземных водах гелия и ряда других химических элементов (например, неона, аргона, криптона). Растет их концентрация и в газовых потоках,

которые внутриземное давление «выжимают» к поверхности земли. Значит, производя химический анализ газа или воды в специально создаваемых скважинах, можно выявить назревающее землетрясение.

В качестве особого предвестника землетрясения можно рассматривать *необычное поведение* многих животных и птиц. Заметим, что спешное предсказание землетрясения в Китае в 1975 г. в немалой степени основывалось на народных приметах, в частности на сообщениях о необычном поведении домашних животных. В настоящее время зарегистрировано около 70 видов животных, которые могут считаться прогнозистами землетрясений интенсивностью от 4 баллов и выше. Почему животные предчувствуют землетрясение? Ответ на этот вопрос пока не получен. Можно предполагать, что животные реагируют на возникающие перед землетрясением звуки (в том числе инфразвуки и ультразвуки), изменения электрического и магнитного полей, выделения газов из почвы и т. д. Исследования аномального поведения животных перед началом землетрясения все более привлекают внимание сейсмологов.

Глава

# 18

снег и лед

Под голубыми небесами  
Великолепными коврами,  
Блестя на солнце, снег лежит,  
Прозрачный лес один чернеет,  
И ель сквозь иней зеленеет,  
И речка подо льдом блестит.

*А. С. Пушкин*





Есть у братьев Гримм сказка «Бабушка Метелица», напоминающая русскую народную сказку «Морозко». Маленькая девочка, которую мачеха послала искать веретено, упавшее в колодезь, встречает старушку с большими-пребольшими зубами. «Испугалась девочка, хотела убежать, но старушка крикнула ей: «Не бойся, милое дитячко! Остайся-ка лучше у меня, будешь мне в хозяйстве помогать. Если ты будешь прилежно работать, тебе будет у меня хорошо. Только смотри, стели как следует мне постель и старательно взбивай перину, чтобы из нее пух летел. Я ведь Метелица, и когда из моей перины летит пух, то на земле у людей снег идет». Девочка была трудолюбивой, а фея снега оказалась вовсе не страшной, а справедливой и доброй. Она щедро одарила девочку и отпустила ее домой.

Совсем иной предстает перед нами повелительница снегов и метелей в сказке Ханса Кристиана Андерсена «Снежная королева». Разбрасываемые ею по свету льдинки вонзаются в человеческие сердца, и те становятся черствыми и злыми. Холод и бессердечие сеет вокруг Снежная королева. Холодно и неуютно в ее ледяном дворце. Немало зла причинила она юным героям сказки — Герде и Каю.

Две сказки о феях снега — и две такие разные феи. Одна добрая и справедливая, другая злая и коварная. Там человеческая теплота, здесь бессердечие.

Идет снег...

Это зрелище всегда волнует. В одних случаях оно радует нас, дарит нам приподнятое, веселое настроение, в других случаях, наоборот, рождает печаль, нагоня-

ет тоску. Не потому ли столь различны сказочные феи из снежного царства?

Печально и отрешенно воспринимается снегопад в стихотворении Э. Верхарна:

Неотвратимо снег идет,  
Как маятника мерный ход,  
Снег падает, кружится, вьется,  
Ложится мерно на дома,  
Украдкой проникает в закрома,  
Летит в могилы, в ямы и в колодцы...

От этих строк веет холодом. Они передают ощущения безнадежности и обреченности, возникающие у поэта при виде снега, который «неотвратимо идет» и проникает везде — ложится на дома, забивается в закрома, колодцы, ямы и даже могилы. От него никуда не спрятаться.

А вот совсем иное восприятие падающего снега:

Белый снег пушистый  
В воздухе кружится  
И на землю тихо  
Падает, ложится.  
А под утро снегом  
Поле забелело,  
Точно пеленою  
Все его одело.

В обоих стихотворениях снег делает одно и то же — он кружится, падает, ложится, все вокруг покрывает. Но в первом случае это нас печалило, а во втором, напротив, вселяет бодрость. Уже самые первые слова — «белый снег пушистый» — рожают ощущение радости, как бы наполнены светом. Недаром это стихотворение так любят дети. Все мы сразу же вспоминаем услышанные в далеком детстве ритмичные строки, так легко и естественно бегущие одна за другой: «Белый снег пу-

шистый — В воздухе кружится —  
И на землю тихо — Падает, ложится...» Это замечательное стихотворение написал И. З. Суриков.

И вот он выпал — этот удивительный снег. Улегся «великолепными коврами», белой пеленой укрыл землю. Тонкие ценители прекрасного в природе, японцы сравнивают выпавший снег с лепестками цветов сливы.

Все, все бело! Глаза не различат,  
Как тут смешался с цветом сливы снег...  
Где снег? Где цвет?  
И только аромат  
Укажет людям: слива или нет.

Так писал Оно-но Такамура. Но, наверное, особенно приятна картина снежных равнин нам, жителям России. «Нигде влияние снежного покрова так не велико, как в России, так как нигде нет равнины настолько обширной, отдаленной от морей и покрытой снегом зимой», — подчеркивал сто лет тому назад А. И. Воейков в своей книге «Климаты земного шара». «Снега России» — так назвал одно из своих стихотворений китайский поэт Цюй Цюбо. Он писал:

О необъятная страна,  
Необозримая страна.  
И для тебя нашлась одежда,  
Никем не сшитая она,  
Как бы безбрежный дивный сон  
Вдруг успокоенной земли —  
Вокруг на десять тысяч ли  
Невиданная белизна.

Выпавший снег засыпал все ямы, канавы, сровнял бугорки — полностью преобразил равнину. Еще больше преобразился лес. Снег рассыпался белыми клоками по ветвям деревьев, прикрыл бе-

лым одеялом упавшие на землю листья и сучья, улегся высокими сугробами в кустарниках. Внимательному глазу он открыл многие тайны лесной жизни — все, что произошло, отпечаталось на снежном покрове, оставило на снегу следы.

Помните у С. А. Есенина:

Подойду, взгляну поближе:  
Хрупкий снег изломан весь.  
Здесь вот когти, дальше — лыжи,  
Кто-то странный бегал здесь.

Благодаря снегу мы каждый год любимся сказочными зимними пейзажами. В снежном уборе приходит к нам прекрасный новогодний праздник. И наверное, нет человека, которому не были бы понятны чувства А. А. Фета, писавшего:

Чудная картина,  
Как ты мне родна:  
Белая равнина,  
Полная луна,  
Свет небес высоких,  
И блестящий снег,  
И саней далеких  
Одинокий бег.

Но мы любим снег не только за то, что он дарит нам великолепные зимние пейзажи. У нашей любви к снегу немало рациональных причин. «Снег на полях — хлеб в закромах», — справедливо утверждает старинная русская поговорка.

Снежный покров — это огромный запас влаги, столь необходимый полям, в то же время это своеобразное гигантское одеяло, защищающее поверхность земли от холодных ветров. Академик В. И. Вернадский подчеркивал, что снежный покров — «не просто теплая покрывка озимых, это жи-



вительная покрывка», весной он дает талые воды, насыщенные кислородом. Известно, что количество азотистых соединений летом в почве пропорционально высоте сошедшего снежного покрова. Недаром снежная мелиорация рассматривается сегодня как одно из важнейших условий получения высоких и устойчивых урожаев. Кроме того, снег является хорошим строительным материалом для различных построек на севере — от иглу (жилищ эскимосов) до больших складских помещений. Он служит основой зимних дорог и даже аэродромов. Запасы снега существенно влияют на уровень воды в реках, определяют изменения климата на больших территориях.

И все же, любуясь снегом, мы обычно не задумываемся о том, насколько он полезен. Заснеженный пейзаж, как правило, приглашает нас в сказку. Человек не заселил в своем воображении царство снега мистическими чудищами, не придумал мифов и легенд о каких-либо «снежных богах». Можно сказать, что снег не стал благодатной почвой для религии. Но зато он навеял великое множество чудесных сказок.

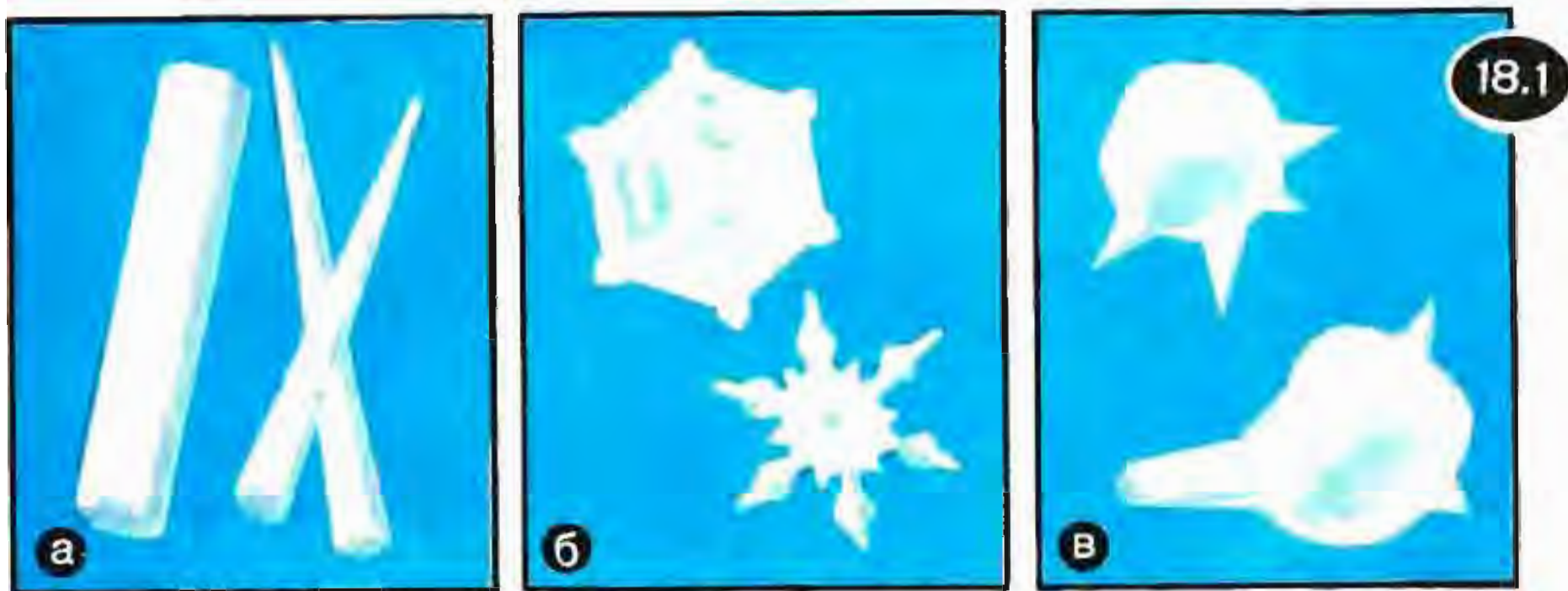
Снег и сказка... У них есть одна удивительная общая черта. И сказка, и снег говорят нам о чудесных превращениях. Замарашка Золушка превращается в красавицу, великан превращается в маленькую мышь, лягушка превращается в Василису Прекрасную. Выпал снег — и унылое черное поле превращается, как по волшебству, в великолепный белый ковер, сверкающий на солнце, преображаются лесные чащи, в белые одежды наряжаются ели. Да и сам снег! Что может быть более непостоян-

ным, более изменчивым? Вот он есть — и вдруг, подобно сказочной Снегурочке, он исчезает, тает. Сейчас он белый и пышный, а завтра осел, стал серым, мокрым. Или иначе — вчера он был пушистым и мягким, а теперь стал твердым, плотным. Полежит еще некоторое время — и превратится в лед. Он родился над землей в виде почти невесомых снежинок, но вот прошло какое-то время — и он поплыл по реке льдинами, пополз с высоких гор ледниками, закачался на волнах океанов айсбергами.

Удивительная изменчивость снега мешает подчас осознать, что снег и лед — это, в сущности, одно и то же. *И снег, и лед изучает одна и та же наука — гляциология.* Положите снежинку под микроскоп, и вы убедитесь, что она построена из маленьких льдинок. Так что обычный снег — это, строго говоря, уже лед. Его можно было бы назвать «размельченным» льдом. Со временем при соответствующих условиях исчезнут пустоты между льдинками снежинок — и снег превратится в обычный лед.

Поистине снег (он же лед) — один из удивительнейших феноменов природы. Его изменчивость почти таинственна. Она интересна для физиков и не менее привлекательна для поэтов. С. Г. Островой как-то сказал, что снег замораживает, притягивает к себе, подобно какому-то волшебному магниту. Поэт попытался выразить это в стихотворении, которое он посвятил снегу:

А я все гладил снег рукой,  
А он все звездами отсвечивал...  
На свете нет тоски такой,  
Которой снег бы не излечивал.



Он весь как музыка. Он — весть.  
Его безудержность бескрайна.  
Ах, этот снег... Не зря в нем есть  
Всегда какая-нибудь тайна.

**Снежинки в воздухе.** Снежинки развиваются из мелких ледяных кристалликов, имеющих форму шестигранников. О таких кристалликах мы уже говорили ранее, когда объясняли возникновение гало (см. главу 9). Во время очень сильных морозов (при температуре ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ ) ледяные кристаллики выпадают в виде «алмазной пыли» — в этом случае на поверхности земли образуется слой очень пушистого снега, состоящего из тоненьких ледяных иголок. Обычно же в процессе своего движения внутри ледяного облака ледяные кристаллики растут за счет непосредственного перехода водяного пара в твердую фазу. Как именно происходит этот рост, зависит от внешних условий, в частности от температуры и влажности воздуха. Характер зависимости ученые в общих чертах выявили, однако объяснить его пока не смогли.

В одних условиях ледяные шестигранники усиленно растут вдоль

своей оси, и тогда образуются снежинки вытянутой формы — *снежинки-столбики, снежинки-иглы* (рис. 18.1,а). В других условиях шестигранники растут преимущественно в направлениях, перпендикулярных к их оси, и тогда образуются снежинки в виде *шестиугольных пластинок или шестиугольных звездочек* (рис. 18.1,б). К падающей снежинке может примерзнуть капелька воды — в результате образуются *снежинки неправильной формы* (рис. 18.1,в). Мы видим, таким образом, что распространенное мнение, будто снежинки обязательно имеют вид шестиугольных звездочек, является ошибочным. Формы снежинок оказываются весьма разнообразными. Существуют коллекции микрофотографий, насчитывающие более пяти тысяч снимков снежинок, отличающихся по форме друг от друга. При определенных условиях (требуется, в частности, чтобы не было ветра) падающие снежинки сцепляются друг с другом, образуя огромные *снежные хлопья*. Хлопья могут быть диаметром до 10 см и даже больше.

Движение снежинки от облака до поверхности земли лишь услов-



но можно назвать падением. Поток воздуха подхватывают ее, кружат, сносят в сторону, поднимают вверх. Об этом хорошо писал К. Д. Бальмонт:

Светло-пушистая,  
Снежинка белая,  
Какая чистая,  
Какая смелая!..  
Под ветром веющим  
Дрожит, взмывается,  
На нем, лелеющем,  
Светло качается.

Порхающую в воздухе снежинку подстерегают две опасности. Во-первых, она может растаять, оказавшись в более теплых воздушных слоях. Во-вторых, во время полета происходит постепенно испарение снежинки, усиливающееся в ветреную погоду и при уменьшении относительной влажности воздуха. Заметим, что чем мельче снежинка, тем быстрее она испаряется. В первую очередь испаряются выпуклости и выступы снежинки, и прежде всего ее острые концы (о зависимости испарения от степени кривизны испаряющейся выпуклой поверхности мы уже говорили в главе 3, посвященной туману). Отсюда следует, что чем дольше падает снежинка, тем более круглой становится ее форма.

Таким образом, выпадение снежинок из облака не обязательно заканчивается снегопадом. Снегопад может обернуться дождиком, а может случиться так, что не будет ни дождика, ни снега — все снежинки испарятся, не достигнув поверхности земли. В ветреную погоду часто выпадают мелкие снежинки почти круглой формы — *снежная крупа*. Заметим, что в горах расстояние от облаков до земли значительно меньше, чем

на равнинной местности. А чем меньше это расстояние, тем меньше (при прочих равных условиях) вероятность того, что снежинка растает или испарится. Именно поэтому в горных районах выпадает значительно больше снега, чем на равнинах.

**Этот изменчивый снег.** Из справочника можно узнать, например, что плотность железа  $7870 \text{ кг/м}^3$ , а плотность, скажем, сухого дерева оказывается, в зависимости от погоды, в пределах примерно от  $300 \text{ кг/м}^3$  (липа) до  $900 \text{ кг/м}^3$  (вишня, дуб, бук). Но напрасно стали бы мы искать в справочнике плотность снега. Ее там нет, потому что «снег снегу рознь». Сразу после выпадения в тихую погоду снег имеет плотность  $30\text{--}60 \text{ кг/м}^3$  ( $0,03\text{--}0,06 \text{ г/см}^3$ ). Плотность свежего снега, выпавшего во время метели, в несколько раз выше:  $100\text{--}200 \text{ кг/м}^3$ . У слежавшегося снега плотность возрастает до  $300 \text{ кг/м}^3$ , а у снега, подвергнувшегося длительному воздействию ветра, она достигает  $400\text{--}500 \text{ кг/м}^3$ . При оттепелях снег оседает и еще более уплотняется. Совместное действие оттепелей и ветров, а также давление постепенно нарастающих слоев снега на нижние слои может привести к образованию так называемого *снежника (фирна)*, имеющего плотность от  $500$  до  $800 \text{ кг/м}^3$ .

В сибирской тайге, где, как правило, не бывает зимних оттепелей, средняя плотность метровой толщи снега составляет примерно  $100 \text{ кг/м}^3$ . В тундре же, где гуляют сильные ветры, снег оказывается существенно уплотненным. По сравнению с тайгой снежный покров в тундре в не-

сколько раз меньше, а его плотность в несколько раз больше — она достигает  $400 \text{ кг/м}^3$ .

В зависимости от температуры, влажности воздуха, силы ветра существенно изменяются, наряду с плотностью, также и другие свойства снега. Это хорошо знают лыжники, подбирая в соответствии с погодой тот или иной тип мази для лыж. Заметим, что по мере уплотнения снега уменьшается его способность отражать свет (снег утрачивает свою первоначальную белизну), ухудшаются его теплоизоляционные свойства (снег начинает лучше проводить теплоту).

**Снежинки на земле.** Падающие в тихую погоду снежинки представляют собой звездочки, иглы, столбики — одним словом, ледяные образования с острыми концами и выступами. Когда множество таких снежинок накапливается на холодной земной поверхности, возникает довольно ажурная, или, лучше сказать, довольно рыхлая «постройка», пронизанная воздушными промежутками. Рыхлость этой постройки как раз и объясняет, почему так низка плотность свежавыпавшего снега и почему он так плохо проводит тепло, — в таком снеге очень много воздуха.

Если же погода вовсе не тихая, а ветреная, то, как мы уже знаем, в этом случае приземляющиеся снежинки больше походят на шарообразные крупинки. Упав на землю, крупинки образуют достаточно плотную упаковку. Теперь внутри только что выпавшего снега значительно меньше воздуха (по сравнению со снегом, выпавшим в тихую погоду). Отсюда его

более высокая плотность и более хорошая теплопроводность.

Далее необходимо учесть, что мириады снежинок, упавших на землю, совсем не похожи на слой песчинок или, скажем, опилок. В отличие от песчинок или опилок, снежинки, оказавшись вместе, начинают довольно активно взаимодействовать друг с другом. Именно поэтому свойства снега изменяются с течением времени.

Вернемся к свежему рыхлому снегу, выпавшему в тихую погоду. Снежный покров только-только стал расти, а в нем уже начались довольно сложные процессы. Так, внутри этого покрова происходит испарение льда, причем в первую очередь испаряются острые концы снежинок, острые выступы, более мелкие снежинки (еще раз подчеркнем, что испарение идет более интенсивно с более выпуклых поверхностей). Пар в воздушных промежутках между снежинками довольно быстро становится насыщенным, в результате активизируется обратный процесс — переход пара в твердое (или жидкое) состояние. Существенно, что этот процесс активнее идет на менее выпуклых, а еще лучше на вогнутых поверхностях. В целом же получается такая картина: *исчезают острые концы у снежинок, зато нарастает лед в центре снежинок; исчезают мелкие снежинки, зато еще более укрупняются большие снежинки.* При этом между снежинками возникают многочисленные ледяные мостики.

На с. 263 даны три фотоснимка частиц снежного покрова, полученные при 10-кратном увеличении. Вверху — сразу после выпадения снега; в середине — на следующий день; внизу — еще через день, после кратковременной отте-



пели. Можно видеть, как сильно изменяется микроструктура снега.

Общий характер этого изменения таков. Частицы снега постепенно укрупняются и все более утрачивают свою индивидуальность. Воздушные промежутки в снежной постройке уменьшаются. В итоге снег делается плотнее и прочнее, как говорят, снег твердеет. Рыхлый свежий снег постепенно превращается в слежавшийся, затем в уплотненный снег и, наконец, может стать фирном — очень плотным крупнозернистым снегом, состоящим из спрессованных ледяных зерен.

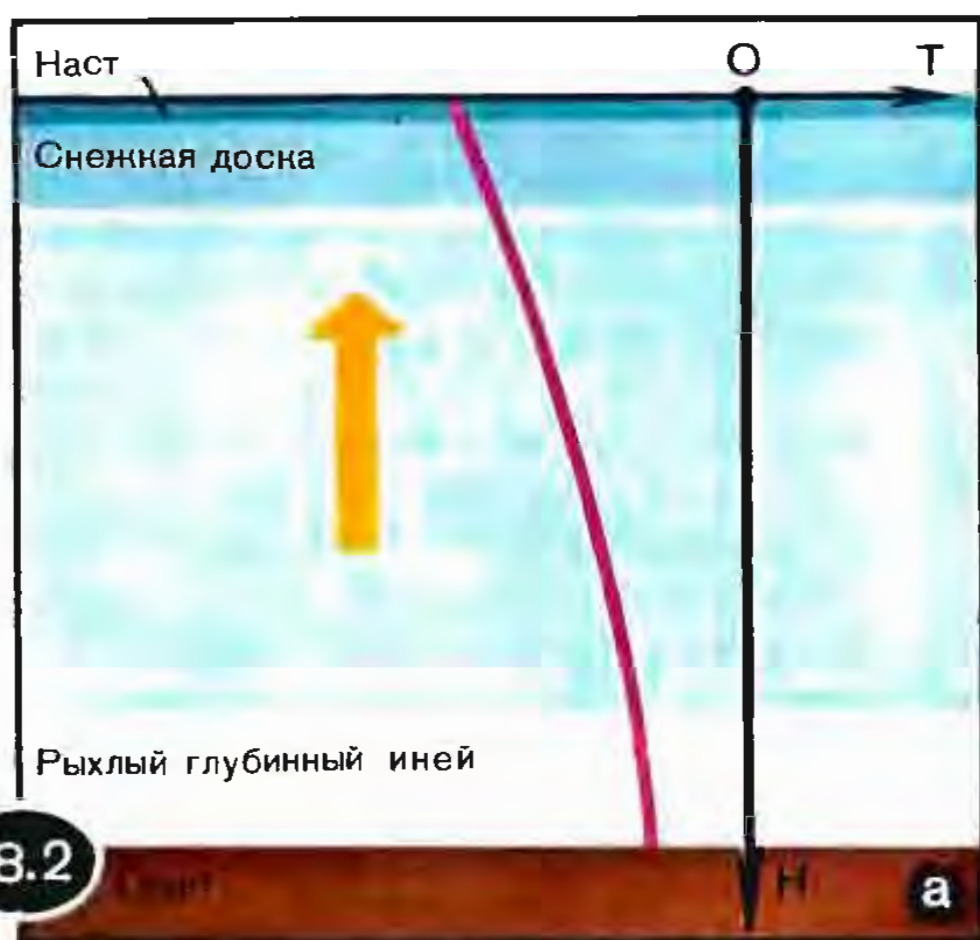
Рассмотренные процессы будут неизбежно происходить в снежном покрове — лишь бы он пролежал достаточно долго. Эти процессы ускоряются кратковременными оттепелями, на них, разумеется, влияют ветры.

**Слоистая структура снежных покровов.** Рассматривая процессы, происходящие внутри снежного покрова, мы до сих пор молчаливо полагали, что покров однороден по всей своей глубине. На самом же деле это, конечно, не так. Ведь тот или иной снежный покров формируется не в один день. Уже отсюда следует, что он должен иметь слоистую структуру: сверху слои более свежего снега, внизу слои слежавшегося снега. При этом существенно, что снежные слои нельзя рассматривать изолированно друг от друга — между ними происходит обмен водяными парами, талые воды из верхних слоев стекают в нижние, верхние слои давят на нижние. В целом картина физических процессов оказывается очень сложной. Упрощая ее, ограничимся

рассмотрением двух случаев — они показаны на рисунке 18.2.

Обычно температура снежного покрова уменьшается в направлении снизу вверх: вблизи грунта она выше, чем у поверхности снега (см. рисунок 18.2,а, где  $T$  — температура,  $H$  — расстояние до поверхности покрова, красная линия — температурная кривая). Как известно, давление паров воды, насыщающих воздух, тем больше, чем выше температура. Значит, в данном случае давление водяных паров внутри снежного покрова будет расти с глубиной. Поэтому возникает движение пара снизу вверх (на рисунке оно отмечено желтой стрелкой). Из нижних слоев снежного покрова водяной пар будет непрерывно удаляться, там образуется рыхлый слой глубинного инея. Кристаллизация поднявшихся вверх водяных паров приводит к уплотнению верхних слоев; возникающий у поверхности слой уплотненного снега называют снежной доской. Под действием солнечных лучей происходит кратковременное таяние самого верхнего тонкого слоя снега, сменяющееся замерзанием образовавшейся воды, и в результате на поверхности снежного покрова нарастает ледяная корочка, называемая настом.

Мы видим, таким образом, что плотность снежного покрова повышается в направлении снизу вверх — от рыхлого глубинного инея к уплотненной снежной доске, прикрытой сверху коркой наста. При этом важно, чтобы общая толщина снежного покрова была не слишком большой; в противном случае станет существенным давление верхних слоев на нижние, способствующие уплотнению нижних слоев. Изображенная



здесь картина характерна для заснеженных равнин нашей средней полосы. В других условиях будет наблюдаться иная картина.

Например, исследователи Антарктиды столкнулись с неожиданной и довольно неприятной особенностью антарктического снежного покрова — его верхние слои оказались очень рыхлыми, что сильно затрудняло движение лыжников, взлет и посадку самолетов. В данном случае снежный покров формируется не на грунте, а на материковом льду. Поэтому температура снежного покрова в направлении сверху вниз не увеличивается (как это было в рассматривавшейся ранее ситуации), а, напротив, уменьшается (рис. 18.2,б). В результате давление водяных паров в верхних слоях покрова оказывается больше, чем в нижних, и теперь водяные пары устремляются сверху вниз. Они кристаллизуются в нижних слоях, что приводит к уплотнению этих слоев. Кроме того, надо учитывать, что толщина антарктического снежного покрова достаточно

велика, поэтому уплотнение нижних слоев усиливается за счет давления, оказываемого выше лежащими слоями. В данном случае оба фактора (сила тяготения и внутриснежное перемещение водяных паров) действуют в одном направлении; в итоге сильное уплотнение самых нижних слоев снега приводит к образованию фирна, который переходит в материковый лед.

**Десять вопросов — десять ответов.** Наблюдая каждой зимой заснеженные поля, леса, городские улицы, площади, скверы, мы поневоле привыкаем к снегу и начинаем воспринимать его как нечто хорошо знакомое. Но так ли уж хорошо мы с ним знакомы?

*Чему равна масса снежинки и масса всего снега?* Отдельная снежинка имеет маленькую массу — порядка миллиграмма ( $10^{-3}$  г). Однако масса всего «пухового одеяла», которое образуют упавшие на землю мириады снежинок, оказывается весьма солидной. Ког-



да в Северном полушарии зима подходит к концу, общая площадь земного снежного покрова достигает  $10^8$  км<sup>2</sup> (20% поверхности земного шара). Масса этого покрова равна примерно  $1,35 \cdot 10^{16}$  кг (13500 млрд т).

*Почему свежавыпавший снег белый? Исключительная белизна снега общеизвестна.*

Яркий снег слепит глаза людей,  
Белый снег, он серебра белей,  
Он своей поспорит белизной  
С мягкой ватой, с рисовой мукой.

Так писал о снеге китайский поэт Лю Дабай.

Свет, падающий на какое-либо вещество, частью поглощается в нем, а частью отражается. Кроме того, свет может частично проходить сквозь вещество (если оно в какой-то мере прозрачно). Как правило, поглощение света различными веществами сильно зависит от длины волны, именно поэтому мы видим все вокруг в цвете. Предположим, например, что рассматриваемый объект поглощает почти весь оптический диапазон длин волн и отражает лишь красные лучи; ясно, что такой объект, освещаемый солнечным светом, будет представляться нам красным. Если объект поглощает лучи всех длин волн и практически *ничего не отражает*, то он выглядит *чёрным*. Если же, наоборот, объект *практически все лучи отражает*, он выглядит *белым*. Именно таков свежавыпавший снег; он отражает более 90% падающих на него солнечных лучей.

Для объяснения столь высокой отражающей способности снега надо обратиться к явлению *полного внутреннего отражения света*. Предположим, что световые лучи падают на границу льда и воздуха

изнутри льда (рис. 18.3). Если угол падения луча больше  $\alpha_0$ , определяемого формулой  $\sin \alpha_0 = n_2/n_1$  ( $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления соответственно льда и воздуха), то такой луч полностью отразится от рассматриваемой границы. Можно считать, что  $n_1 \approx 4/3$ ,  $n_2 = 1$ , так что  $\alpha_0 \approx 48^\circ$ . Таким образом, все лучи с углами падения больше  $48^\circ$  будут полностью отражаться от границы лед — воздух.

Предвидим недоумение, которое может возникнуть у читателя. Он может возразить, что поверхность снега — это все же не поверхность льда (недаром, в отличие от снега, лед на реке выглядит достаточно темным) и, кроме того, солнечные лучи падают на границу лед — воздух не со стороны льда, а со стороны воздуха.

Отвечая читателю, заметим, что снег — это в конечном счете лед (ведь снежинки состоят из мелких льдинок), но лед этот не монолитен, а пронизан множеством воздушных пор. Падая на поверхность снега, солнечные лучи сравнительно легко проникают внутрь снеговых льдинок, находящихся вблизи поверхности. Проникнуть глубже в снег лучам не дают полные внутренние отражения от многочисленных поверхностей, отделяющих льдинки от воздуха, который заполняет внутренние поры в снегу. Когда эти поры исчезают (при образовании монолитного льда или в результате заполнения талой водой), отражение света существенно уменьшается — в этом случае значительная часть солнечных лучей проникает достаточно глубоко внутрь покрова и там поглощается.

Связь белизны с явлением полного внутреннего отражения света

можно продемонстрировать на многих примерах. Раздробите на морозе кусок льда — и вы получите белый порошок. Взгляните на лужу, подернутую ледяной корочкой: она везде темная, но там, где подо льдом оказался воздушный пузырь, она белая. Проследите за падающей снежинкой. Вот она упала на вашу ладонь и тут же, еще не растаяв, утратила свою белизну — воздушные промежутки между снежинкой и поверхностью ладони оказались заполненными талой водой.

*Почему снег со временем темнеет?* Снег темнеет прежде всего потому, что на нем осаждаются пыль и сажа, имеющиеся в воздухе. Но дело не только в этом. Потемнение снега означает, что он стал меньше отражать солнечных лучей и, значит, больше поглощать их. Оттепели и упоминавшееся ранее движение водяных паров из глубины снежного покрова к его поверхности — все это приводит к заполнению воздушных пор поверхностного слоя талой водой и льдом, приводит к уплотнению этого слоя и к образованию наста. В результате уменьшается полное внутреннее отражение, усиливается проникновение солнечных лучей в глубь снежного покрова, возрастает поглощение света внутри покрова — снег еще более темнеет.

Заметим, что весной увлажнение снега и загрязнение его поверхности уменьшают долю света, отражаемого снежным покровом, до 30%. Иначе говоря, за период с выпадения снега до весеннего таяния отражающая способность снежного покрова снижается более чем в 3 раза.

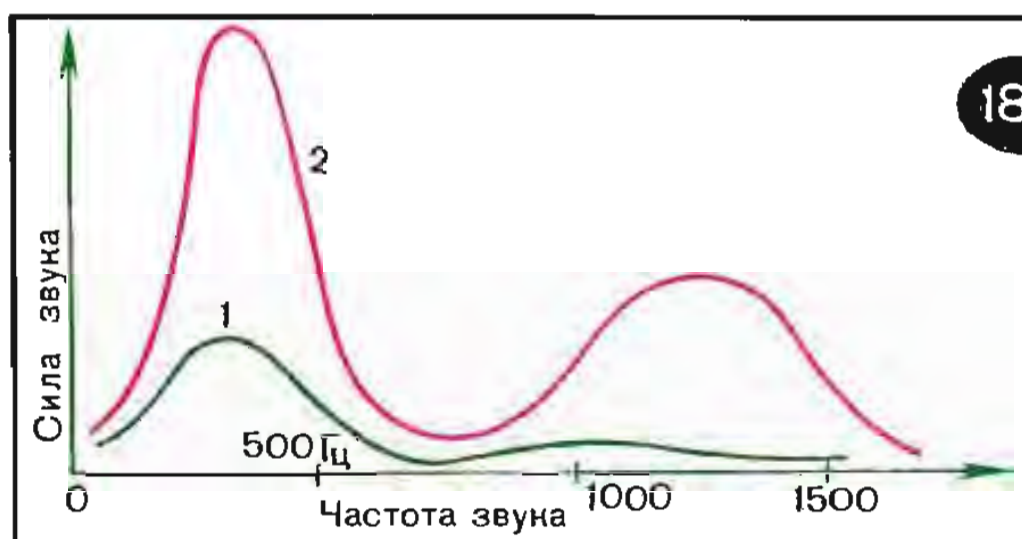
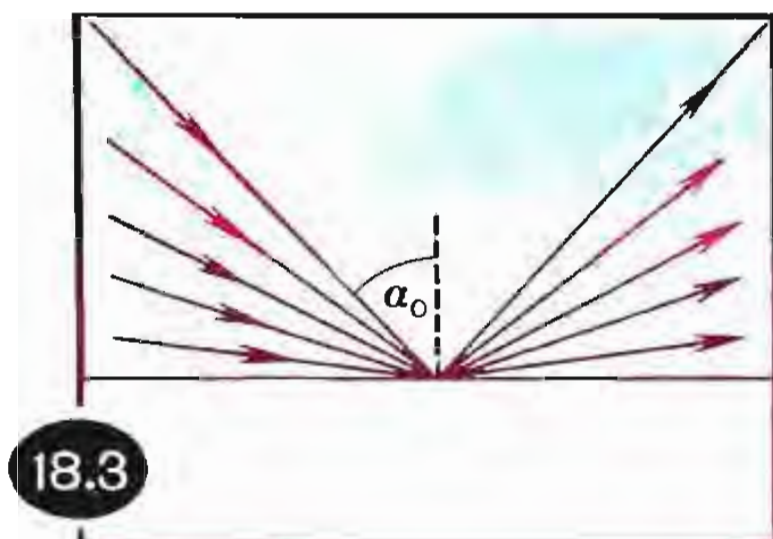
*Почему зимой холодно?* Общеизвестно, что снежное покрывало

спасает от морозов растения и диких животных — ведь свежий снег благодаря обилию в нем воздушных пор обладает высокими теплоизоляционными свойствами. Но, возможно, не все знают, что тот же самый снег способствует усилению зимних холодов. Конечно, зимнее похолодание (и вообще смена времен года) связано прежде всего с тем, что ось вращения Земли наклонена к плоскости ее орбиты. Однако немаловажную роль в усилении зимних холодов играет и тот факт, что снежный покров сильно отражает солнечные лучи. Мы уже говорили, что свежесвыпавший снег отражает более 90% солнечных лучей. Для сравнения укажем, что свободная от снега суша отражает только 10...20% света. Отсюда видно, насколько меньше энергии получает Земля от Солнца благодаря высокой отражающей способности снежного покрова.

Итак, снег выпадает из-за похолодания, вызванного тем, что ежегодно в течение нескольких месяцев те или иные области земной поверхности получают меньше энергии от Солнца. В свою очередь, выпадение снега приводит к еще большему сокращению получаемой от Солнца энергии и, следовательно, способствует усилению зимних холодов.

*Почему снег в мороз скрипит под ногами?* Скрип снега — это шум от раздавливаемых льдинок. Чем сильнее мороз, тем более твердыми и хрупкими делаются снеговые льдинки и поэтому более высоким становится тон скрипа. На рисунке 18.4 представлены результаты специальных акустических измерений — зависимость силы звука скрипящего снега от частоты звука. Кривая 1 получена





при температуре  $-6^{\circ}\text{C}$  (слабый мороз), а кривая 2 при  $-20^{\circ}\text{C}$  (сильный мороз). Видно, что в слабый мороз скрип снега характеризуется частотами в интервале примерно 200...400 Гц. В сильный же мороз, наряду с увеличением силы звука, наблюдается появление максимума между 1000 и 1500 Гц.

*Как образуется сосулька?* Представим себе солнечный зимний день, легкий мороз (температура воздуха всего на несколько градусов ниже нуля). Солнечные лучи падают почти отвесно на покрытый снегом скат крыши и неплохо прогревают его. Под снегом образуется талая вода, она стекает по скату крыши и достигает ее края. Там и начинают расти сосульки.

Для простоты будем считать, что сосулька растет скачками, хотя на самом деле этот процесс непрерывен. Вот с края крыши начинает стекать крупная водяная капля. Она не может сразу оторваться и полететь вниз — мешает *поверхностное натяжение* воды. Капля как бы находится внутри поверхностной пленки, которая постепенно вытягивается и, уступая тяжести капли, все более провисает. А пока это происходит, капля замерзает, теперь с края крыши свешивается надежно примерзший к нему кусочек льда,

имеющий характерную форму (рис. 18.5, а). Следующая капля быстро стекает по уже замерзшей капле к самой нижней ее точке и, провиснув, замирает. Вот-вот сила тяжести одолеет силу поверхностного натяжения и капля полетит вниз. Но этого не происходит — новая капля, как и предыдущая, замерзает, так и не оторвавшись от крыши (рис. 18.5, б). Такова же судьба и последующих капель. Все они последовательно намерзают одна на другую, в результате чего и образуется сосулька (рис. 18.5, в).

*Почему снег задерживается на ветвях деревьев?* Попробуйте сыпать песок на ветку дерева, лишенную листьев. Он на ней практически не задержится и почти целиком просыплется вниз на землю. В отличие от песка, снег может накапливаться на голых ветвях, образуя подчас такие тяжелые шапки, что обламываются ветви.

Снеговые наросты на деревьях образуются при снегопаде в тихую погоду, когда температура воздуха близка к  $0^{\circ}\text{C}$ . В этих условиях довольно интенсивно идут разнообразные процессы внутри снега: подтаивание и замерзание, испарение и кристаллизация. Они приводят к образованию связей между упавшими сне-

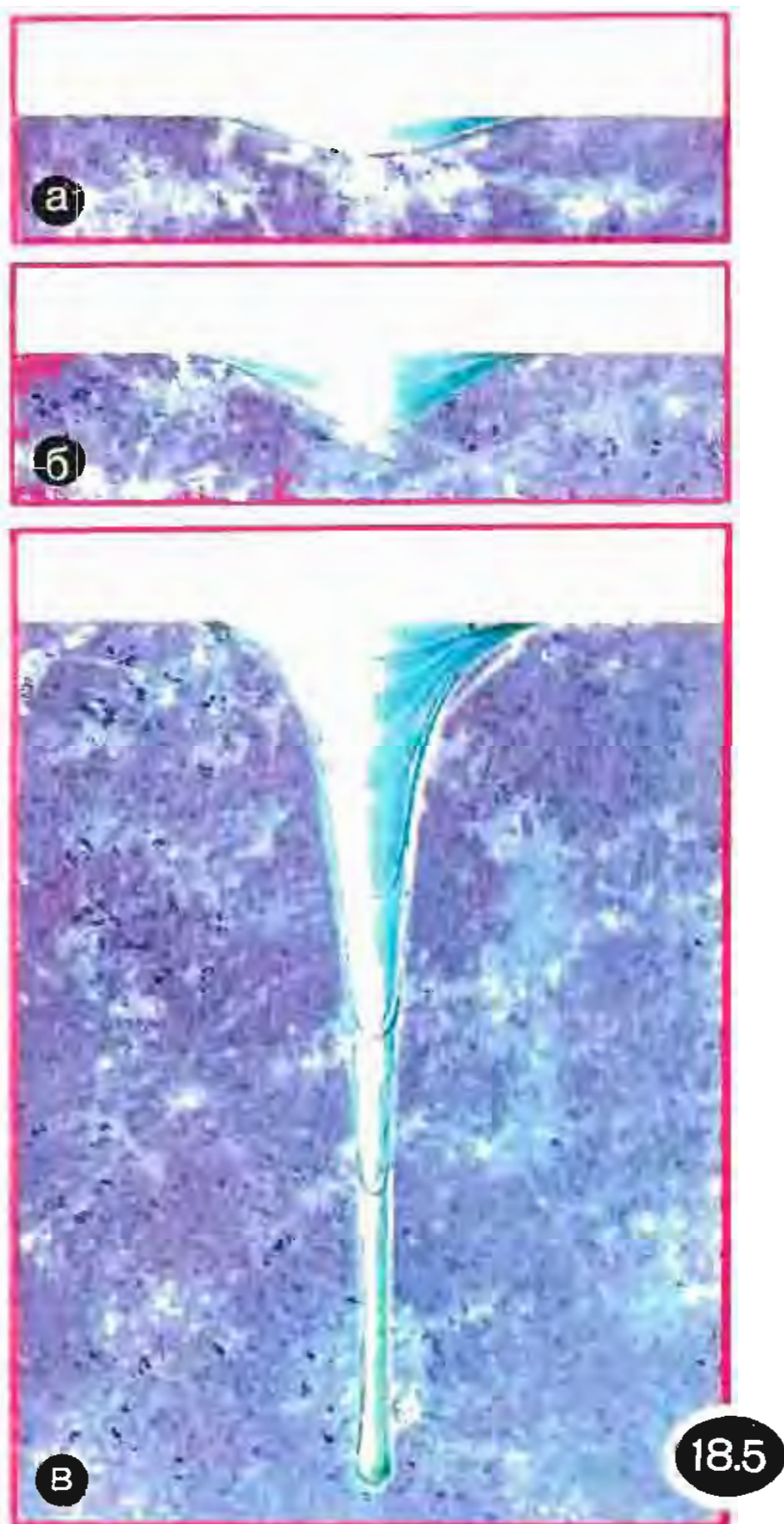


жинками и поверхностью ветвей, а также между самими снежинками. Первые снежинки подтаивают и примерзают к ветвям, образуя на них тонкую наледь. Последующие снежинки примерзают уже к этой наледи. Так постепенно на ветвях нарастают большие снежные шапки, способные удерживаться даже при порывах ветра (если, конечно, эти порывы не слишком сильные).

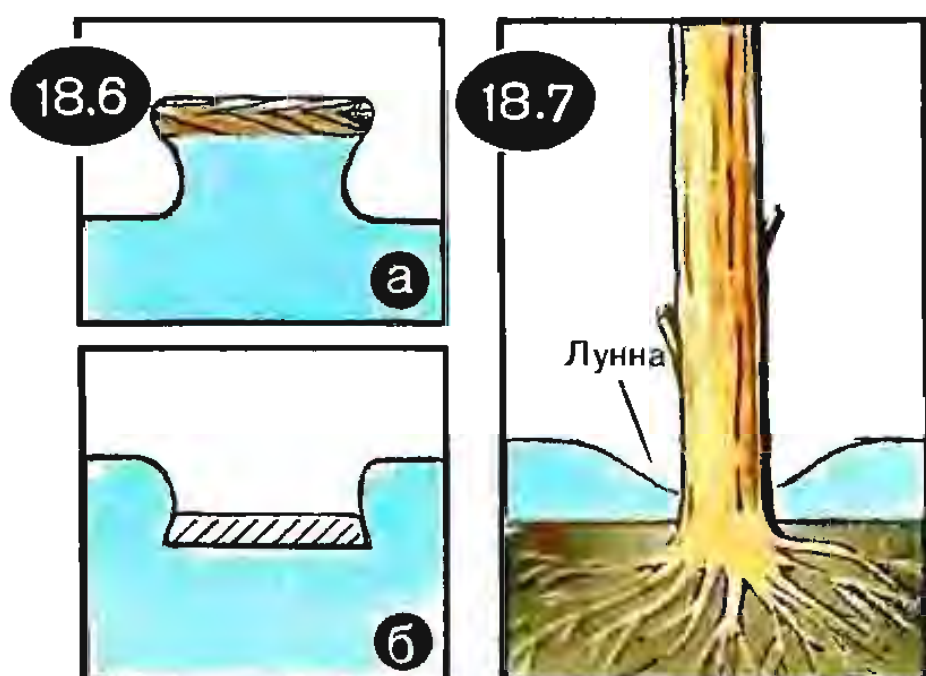
Почему положенная на снег деревянная доска оказывается при оттепели как бы на снежном столбике, тогда как металлическая пластина еще глубже уходит в снег (рис. 18.6)? Обычно к весне и снежный покров, и долго находившиеся на нем различные предметы становятся одинаково грязными, поэтому будем полагать, что все они практически одинаково отражают (а значит, и поглощают) солнечные лучи. От нагреваемой солнечными лучами поверхности снега вглубь, по направлению к более холодному земляному грунту будет передаваться теплота. Скорость ее передачи тем выше, чем больше теплопроводность поверхностных слоев снежного покрова. Теплопроводность слежавшегося снега в 5...8 раз больше теплопроводности деревянной доски, поэтому вокруг доски снег будет таять быстрее, чем под доской. В результате доска через некоторое время оказывается лежащей на своеобразном снежном столбике, возвышающемся над остальной поверхностью снега. Можно сказать, что доска в данном случае выступает в роли хорошего теплоизолятора, она предохраняет находящийся под ней снег от быстрого таяния. Иное дело, когда на поверхности снега находится металлическая пласти-

на. Теплопроводность пластины примерно в 100 раз больше теплопроводности слежавшегося снега, поэтому снег под пластиной будет таять быстрее, чем на открытом месте.

Почему образуется лунка в снегу у подножия дерева (рис. 18.7)? Подобные лунки образуются у подножия деревьев ранней весной, а также после кратковременных зимних оттепелей. На







первый взгляд причина их возникновения очень проста. В течение погожего весеннего или зимнего дня солнечные лучи хорошо прогревают ствол дерева, чему способствует темный цвет его поверхности и то, что лучи низко стоящего солнца падают на поверхность ствола почти перпендикулярно. Теплопроводность дерева, как мы уже знаем, очень низкая, поэтому оно относительно медленно отдает теплоту. Примыкающие к стволу участки снежного покрова под действием этой теплоты постепенно подтаивают, и в результате формируется снежная лунка. С южной стороны, где ствол дерева получает больше солнечного света (в Северном полушарии), глубина лунки обычно больше — ведь южная сторона дерева прогревается сильнее.

Все это так. Тем не менее приведенное объяснение нельзя считать исчерпывающим. Оно не объясняет, почему у подножия деревянных столбов снежные лунки, как правило, меньше или вообще отсутствуют. Дело в том, что весной и во время зимних оттепелей дерево как бы «просыпается» — от его корней к ветвям начинают свое движение *внутрен-*

*ние соки*. Вместе с ними ствол дерева и ветви получают теплоту от подземных слоев, пронизанных корнями. Таким образом, ствол дерева нагревается не только извне (за счет поглощения энергии солнечных лучей), но и изнутри (благодаря подъему соков по капиллярам внутри ствола).

*Как слепить прочный снежок?* Увлеченно играющие в снежки дети прекрасно знают, как это сделать. Надо взять горсть снега и покрепче сжать ее в ладонях. Ну, а почему же при этом образуется снежок? И на этот вопрос готов ответ: при сжатии снег уплотняется. Почему же в таком случае не удастся слепить снежок в морозный день? Если термометр показывает, скажем,  $-10^{\circ}\text{C}$ , то как бы сильно вы ни сжимали горсть снега, она не превратится в плотный снежок. В чем же дело? Многие правильно отвечают, что снег должен быть мокрым, для чего необходимо, чтобы его температура была близка к  $0^{\circ}\text{C}$ . Когда мы сжимаем такой снег, образуется некоторое количество воды. Вода заполняет воздушные промежутки внутри снега и, подмерзая, образует довольно прочные ледяные связи. Нам остается выяснить, почему же при сжатии в ладонях не слишком холодного снега образуется вода. На это часто отвечают так: снег под давлением тает. Действительно, температура плавления льда с увеличением давления понижается. В этом проявляется одна из особенностей льда — ведь у большинства веществ температура плавления понижается не с увеличением давления, а с уменьшением его (вспомним: твердая магма превращается в жидкий расплав при уменьшении давления). Однако не следует пре-

увеличивать роль указанного эффекта — он невелик: повышение давления на одну атмосферу понижает температуру плавления льда (иначе говоря, температуру таяния снега) лишь на 0,0075 К. Чтобы эта температура понизилась всего на один градус, требуется давление более 130 атм. Такого давления при помощи ладоней не создать. Так что одного только таяния снега под давлением в данном случае недостаточно. Образование воды в сжимаемом ладонями снежке следует объяснять также другими причинами. Таких причин может быть несколько. Когда мы сжимаем в голых руках снежок, то происходит передача теплоты от наших ладоней к снежку. При сжатии снежка уменьшается общий объем внутренних пор, и часть насыщенных водяных паров, заполнявших эти поры, конденсируется. Наконец, может играть определенную роль тот факт, что при сжатии снежка трутся друг о друга и о наши ладони льдинки, образующие снег, при этом выделяется теплота.

Как видите, слепить прочный снежок нетрудно, но зато не так-то просто объяснить физику происходящих при этом процессов.

**Что такое режеляция.** Явление режеляции, как мы убедимся ниже, играет важную роль в объяснении движения ледников, сползающих по горным склонам. Термин «режеляция» можно расшифровать как «регенерация льда», «восстановление льда». Это явление нетрудно продемонстрировать на следующем опыте.

Поставим на два столбика прямоугольный ледяной брусок раз-

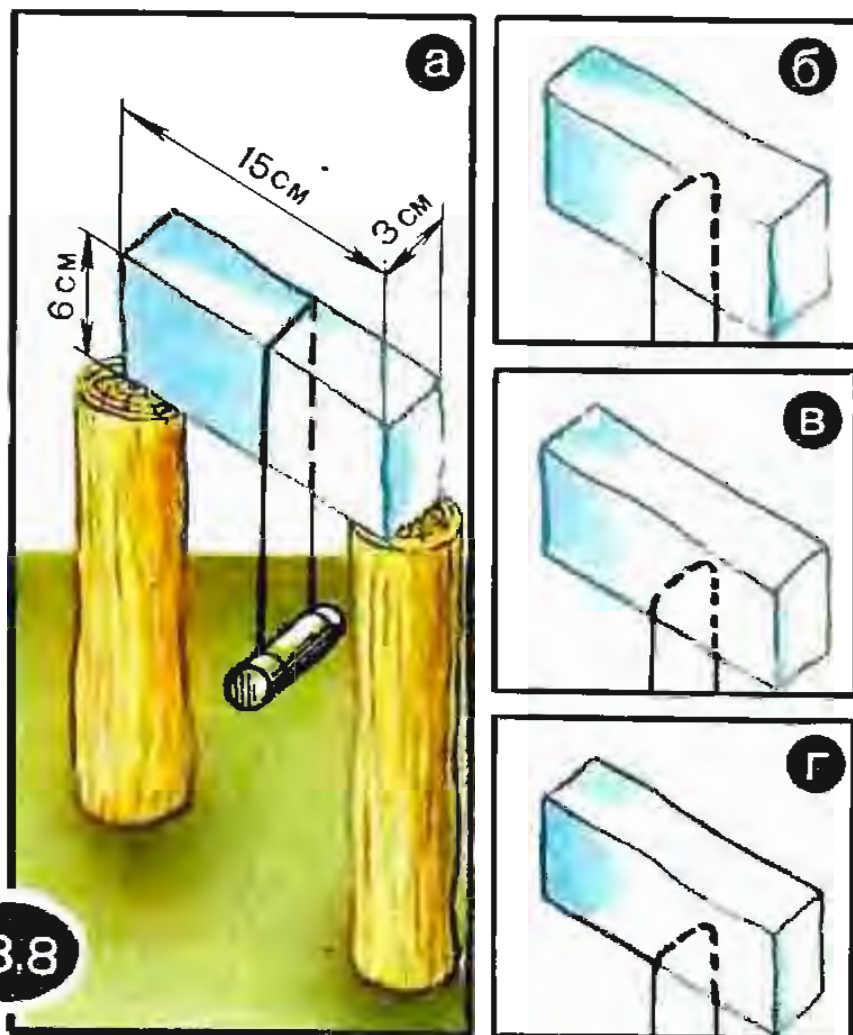
мерами, допустим,  $15 \times 6 \times 3$  см. Перекинем через него тонкую стальную проволоку (диаметром 0,1 мм) и подвесим на ней груз массой 3 кг (рис. 18.8, а). Все это оставим на легком морозе. Важно, чтобы температура на улице была всего на несколько градусов ниже нуля. Примерно через сутки (опыт может затянуться, если ночью температура понизится) мы обнаружим, что проволока и гиря лежат на земле, а на столбиках стоит наш ледяной брусок, целый и невредимый. Если бы мы в течение опыта выходили на улицу, то увидели бы, как постепенно проволока опускается, как бы разрезая ледяной брусок (рис. 18.8, б, в, г).

Мы говорим «как бы», потому что в действительности никакого разреза не остается — выше проволоки брусок оказывается монолитным.

Давление, производимое проволокой на лед, измеряется в данном случае сотнями атмосфер. Такому давлению соответствует уменьшение температуры плавления льда на несколько градусов. Так как температура льда всего на несколько градусов ниже  $0^\circ\text{C}$ , то лед непосредственно под проволокой будет *подтаивать* — проволока будет постепенно опускаться. При этом вода над проволокой тут же замерзнет, в результате чего исчезнет разрез.

Получается, что проволока, опускаясь, как бы проходит сквозь лед: *под ней лед тает и тут же замерзает над ней*. Скрытая теплота плавления, выделяющаяся при замерзании, расходуется при таянии. Это и есть явление режеляции. Тающий под высоким давлением лед тут же восстанавливается, как только давление снижается. В ре-





18.8

зультате инородное тело может двигаться сквозь неподвижный лед. Или, что с точки зрения физики одно и то же, лед может «обтекать» неподвижное инородное тело. Последняя ситуация как раз и наблюдается при движении некоторых типов ледников.

**Лед на Земле.** С севера наша страна омывается водами Северного Ледовитого океана. Его недаром называют «ледовитым» — зимой 90% его поверхности (12 млн км<sup>2</sup>) покрыто дрейфующими льдами, летом площадь ледяного покрова уменьшается до 8 млн км<sup>2</sup>. Толщина арктических льдов составляет в среднем 2 м, многолетний лед в Центральной Арктике достигает толщины 4 м.

Когда у нас лето, в Южном полушарии зима. В это время общая площадь плавучих льдов вокруг Антарктиды равна примерно 20 млн км<sup>2</sup>. В теплый период она

сокращается до 2,5 млн км<sup>2</sup>. Толщина антарктических плавучих льдов составляет в среднем 1,5 м.

Огромные запасы пресного льда сосредоточены на суше — в виде медленно движущихся ледников. Эти запасы непрерывно тают (в буквальном смысле) и столь же непрерывно восполняются за счет атмосферных осадков. Общая площадь поверхности, покрытой ледниками, превышает 16 млн км<sup>2</sup> (11% всей поверхности суши), общий объем льда в ледниках оценивается примерно в 30 млн км<sup>3</sup>.

Различают три типа ледников: наземные ледниковые покровы (ледниковые щиты), шельфовые ледники, горные (долинные) ледники. Суммарная площадь ледниковых щитов составляет примерно 14,5 млн км<sup>2</sup>. Из них 1,5 млн км<sup>2</sup> приходится на Гренландию (толщина льда достигает там 3 км), а остальные 13 млн км<sup>2</sup> на Антарктиду (средняя толщина льда 1,7 км, наибольшая до 4,5 км). Шельфами называют материковые отмели. Общая площадь шельфовых ледников равна примерно 1,5 млн км<sup>2</sup>, почти все они сосредоточены у побережья Антарктиды. Относительно небольшую долю (как по площади, так и по объему льда) составляют горные ледники, опускающиеся с гор Гренландии, Исландии, со Скалистых гор в Северной Америке, со Скандинавских гор, Перенеев, Альп в Европе, с Гималаев, Памира, Тянь-Шаня в Азии, а также с других высоких горных хребтов. Рисунок 18.9 показывает, как выглядят с борта самолета горные ледники. На рисунке можно видеть сразу два ледника. Они спускаются с Гренландских гор к побережью Атлантического океана.



Отдельно отметим *айсберги* — плавающие в океане ледяные массивы, отколовшиеся от ледника. Высота надводной части айсбергов может достигать нескольких десятков метров, высота подводной части — в 6...8 раз больше. Площадь отдельных айсбергов может доходить до сотен квадратных километров. В Северной Атлантике айсберги встречаются примерно до широты  $40^\circ$ . В Южном полушарии айсберги встречаются в большем количестве, но несколько дальше от экватора, чем в Северном полушарии (в Южной Атлантике до широты  $45^\circ$ , а в Индийском и Тихом океанах — до широты  $50^\circ$ ). Ежегодно в южных широтах плавают более 200 тыс.

айсбергов — это около 20 тыс. км<sup>3</sup> пресного льда.

На рисунке 18.10 изображен крупный айсберг плоской (столообразной) формы в заливе Мелвилл вблизи берегов Гренландии. Его длина более километра, а высота обрывистого края 20 м. По сравнению с айсбергом ледокол «Вестуинд» кажется игрушкой.

Каковы объем и масса льда, содержащиеся в айсберге, изображенном на рисунке 18.10? Решим в связи с этим следующую задачу. Площадь столообразного айсберга  $5 \cdot 10^5 \text{ м}^2$  ( $1000 \times 500 \text{ м}$ ), высота надводной части 20 м. Считая, что плотность льда  $\rho_1 = 910 \text{ кг/м}^3$ , а плотность морской воды  $\rho = 1030 \text{ кг/м}^3$ , определить объем и массу айсберга.



18.9





Обозначим через  $V_1$  и  $V_2$  объемы надводной и подводной частей айсберга соответственно; его полный объем

$$V = V_1 + V_2.$$

Условие плавания тела (айсберга) запишем в виде:

$$\rho V_2 = \rho_\lambda (V_1 + V_2). \quad (18.1)$$

Отсюда находим, что

$$V_2 = V_1 \rho_\lambda / (\rho - \rho_\lambda)$$

и, следовательно,

$$V = V_1 + V_1 \frac{\rho_\lambda}{\rho - \rho_\lambda} = V_1 \frac{\rho}{\rho - \rho_\lambda}. \quad (18.2)$$

Объем надводной части айсберга равен, согласно условию задачи,  $10^7 \text{ м}^3$ . Используя формулу (18.2) и значения плотностей воды и льда, получаем  $V = 8,6$ ;  $V_1 = 8,6 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ . Умножив этот объем на плотность льда, находим массу айсберга: она равна  $7,8 \cdot 10^{10} \text{ кг}$ , т. е. почти ста миллионам тонн.

Ледяные покровы Антарктиды, Гренландии, Северного Ледовитого океана — *гигантские источники холода*. Они практически не поглощают падающие на них солнечные лучи. Как мощные генераторы холода они воздействуют на морские течения и движения воздушных масс, влияя тем самым на климат любой части нашей планеты. Недаром Антарктиду на-

зывают «кухней погоды». В ледниках сосредоточено до 75% всех земных запасов *пресной воды*. Частичное таяние льдов, подтаивание ледников, образование и последующее таяние айсбергов — все это определяет периодические изменения уровня Мирового океана. Подсчитано, что если бы весь лед Антарктиды растаял, то уровень океана поднялся бы на несколько десятков метров.

**Горный ледник.** Мы уже рассказывали о том, как постепенно уплотняются нижние слои снежного покрова в результате давления нарастающих верхних слоев снега и перемещения вниз водяных паров. Уплотнение снега приводит к образованию фирна, а затем и монолитного льда. Именно так и зарождаются ледники. Поговорим подробнее о леднике, зарождающемся высоко в горах — в зоне вечных снегов и спускающемся по горной долине вниз.

На рисунке 18.11 показан условно продольный вертикальный разрез горного ледника. Заметим, что на самом деле длина ледника должна быть значительно больше по сравнению с его толщиной (длина горного ледника измеряется десятками и даже сотнями километров). По длине ледник раз-

бивается на две части — область аккумуляции и область абляции. В области аккумуляции преобладают процессы, приводящие к нарастанию льда, а в области абляции преобладают обратные процессы — таяние льда, его испарение, сход ледяных масс в море (латинское слово *accumulatio* означает «накопление», а *ablatio* «отнятие»). В области аккумуляции ледник растет, а в области абляции разрушается. Границу между этими областями называют границей питания.

*Ледник медленно движется по склону горы вниз.* Как происходит это движение, мы рассмотрим немного позднее. Пока же подчеркнем, что благодаря непрерывно действующим процессам нарастания и разрушения ледника (процессам аккумуляции и абляции) *движение ледника не изменяет его профиля.* Это означает, что изображенный на рисунке 18.11, а профиль ледника (он окрашен в голубой цвет) не меняется со временем, несмотря на движение всей массы ледника.

Предположим чисто умозрительно, что процессы аккумуляции и абляции вдруг прекратились. Тогда через какое-то время, например через год, профиль ледника изменился бы примерно так, как это показано на рисунке 18.11, б. Здесь синим цветом изображен исходный профиль, а красным — профиль через год; стрелки указывают направление скорости движения льда в разных точках вдоль длины ледника. Однако процессы аккумуляции и абляции происходят все время. За счет первых процессов пополняется объем ледника, показанный на рисунке однократной штриховкой, а за счет вторых процессов изыма-

ется объем ледника, показанный двукратной штриховкой. В результате профиль ледника остается прежним.

**Движение ледника.** Итак, неизменно сохраняющаяся в течение многих лет ледяная лента, протянувшаяся от горных вершин до берега океана, только кажется неподвижной. На самом деле она движется. Скорость движения некоторых ледников измеряли по всей их толщине — от поверхности до самых нижних слоев. На рисунке 18.12 представлены типичные результаты таких измерений. Кривая на рисунке показывает, как изменяется с глубиной горизонтальная составляющая скорости движения льда на леднике Атабаска в Канаде. Толщина ледника чуть больше 200 м. У поверхности скорость движения льда равна 30 м/год. До глубины примерно 100 м она почти не меняется, но затем начинает уменьшаться; на глубине 150 м скорость льда равна 25 м/год, на глубине 180 м — 17 м/год, в непосредственной близости от ложа (на глубине 200 м) скорость льда оказывается равной 8 м/год.

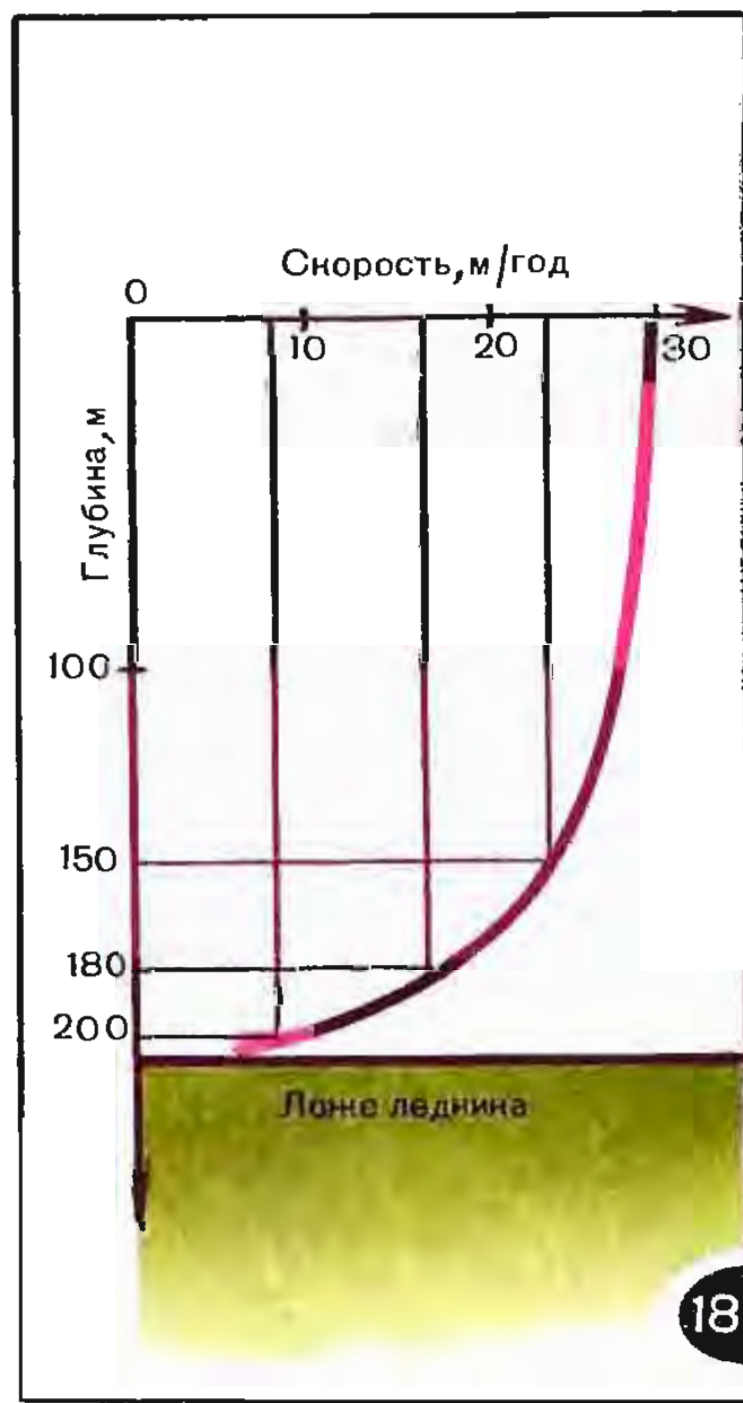
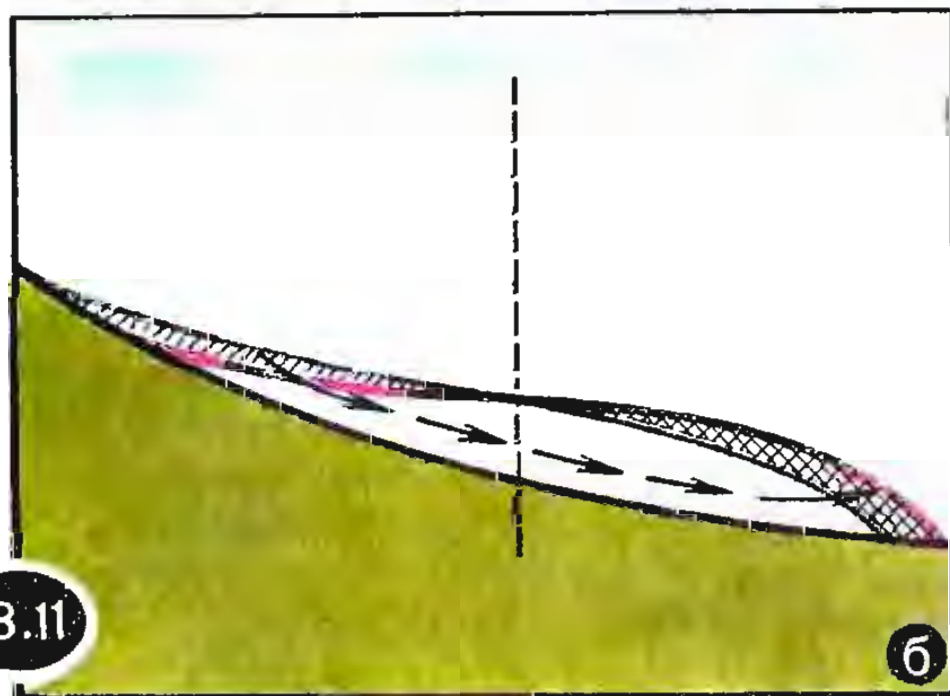
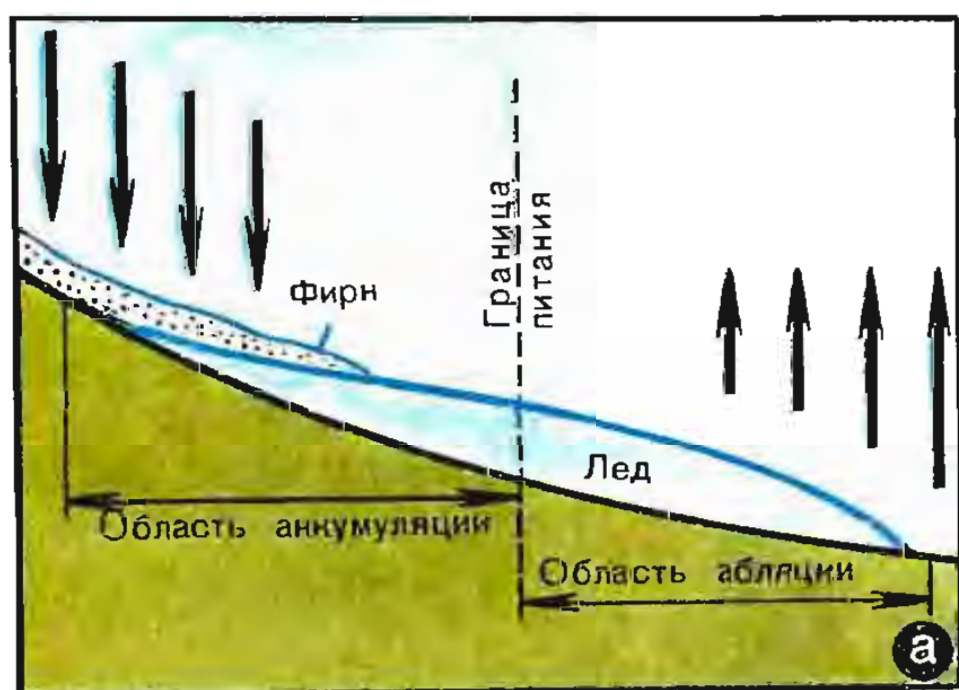
Эти результаты позволяют сделать два важных вывода. *Первый вывод* таков: поскольку скорость движения льда с глубиной плавно уменьшается, то, следовательно, *лед обладает пластичностью.* Его движение связано с деформацией — *верхние слои льда смещаются относительно нижних.* Если бы скорость льда у самого ложа ледника обращалась в нуль, то картину движения ледника в целом следовало бы представлять так: дно ледника прочно приморожено к каменному ложу, вышележащие



слои ледника смещаются (скользят) относительно нижележащих, причем быстрее всего скользят приповерхностные слои. Подобно некоторой очень вязкой жидкости, лед медленно «течет», и скорость этого течения постепенно возрастает от нуля у дна ледника до наибольшего значения (порядка нескольких десятков метров в год) у поверхности ледника. Сразу заметим, что подобные ледники с примороженным к ложу дном действительно существуют. Однако наш ледник не таков. У него скорость льда у самого ложа не обращается в нуль. А отсюда следует *второй вывод*: ледник как целое скользит по ложу. Таким образом, движение ледника следу-

ет объяснить в общем случае двумя физическими механизмами: *пластической деформацией ледника и скольжением ледника по ложу.*

Второй из указанных механизмов срабатывает лишь при условии, что температура льда вблизи ложа будет достаточно близкой к  $0^{\circ}\text{C}$ . В этом случае наблюдается рассмотренное нами выше явление режеляции, обеспечивающее перемещение дна ледника по каменному ложу. Когда какая-то область придонного льда натывается на острый камень, она тает вследствие возникающего в данном месте высокого давления, талая вода обтекает препятствие и тут же замерзает. Получается, что придон-



18.11

6

18.12

ные слои ледника в буквальном смысле обтекают всевозможные неровности каменного ложа.

**Практическое снеговедение.** Заканчивая главу о снеге, расскажем о том, как человек использует снег для решения различных практических задач.

**Снегомелиорация.** Снег на полях необходим, во-первых, как источник и хранитель влаги и, во-вторых, как своеобразная шуба, защищающая от морозов посевы озимых культур, корневые системы многолетних трав, а также живые сообщества в почвенно-растительном слое. Снегомелиорация решает важные задачи: задержание снега на полях, обеспечение равномерного снежного покрова, предотвращение стока талых вод весной (когда почва еще не оттаяла и поэтому не впитывает влагу). Эти задачи решают на практике посредством создания полезных лесных полос, а также посредством механизированного снегозадержания (снегопахания).

Как показывает практика, проблема создания оптимальных полезных лесных полос далеко не проста. Если, например, полоса лесонасаждений является широкой (многорядовой), то она будет работать в основном «на себя»: значительная масса снега будет скапливаться внутри самой полосы. Нельзя также закладывать полосы с чрезмерно большими межполосными разрывами (500 м и более), так как на расстоянии свыше 20  $H$ , где  $H$  — высота деревьев полосы, влияние последней на формирование снежного покрова в поле фактически прекращается. С точки зрения аэродинамики наиболее подходящей

представляется однорядовая или двухрядовая узкая полоса без подлеска и кустарника. Ее нижняя часть хорошо проницаема для ветра, вследствие чего снег почти не задерживается в пределах самой полосы. Ветровой поток тормозят кроны деревьев; они снижают скорость ветра на 20...30%, благодаря чему перенос снега уменьшается в несколько раз. Однако такая полоса все равно не обеспечивает достаточно равномерного снежного покрова и, кроме того, со временем она зарастает кустарником и становится непродуваемой. Представляют интерес предложения закладывать лесонасаждения не сплошными полосами, а в виде цепочек островков (рощиц), ориентированных перпендикулярно направлению преобладающих зимних ветров. Для рощиц необязательна продуваемость, здесь не надо вырубать кустарники. Опыты показали, что такие лесонасаждения обеспечивают хорошую равномерность снежного покрова в поле.

Наряду с созданием лесонасаждений важную роль играет также снегопахание. В процессе снегопахания создаются снежные валики, способствующие задержанию снега на полях. Одновременно производится уплотнение снега специальными приспособлениями. Уплотненный снег хорошо сопротивляется ветровому выносу. Кроме того, правильно ориентированные полосы уплотненного снега препятствуют стоку талых вод в начале весны.

**Снег как строительный материал.** Как строительный материал снег широко используется в холодных районах Земли, где большую часть года длится зима с устойчивым и толстым снежным



покровом. Снег применяется как основание фундаментов различных построек, как материал для возведения стен, куполов, тех или иных строительных конструкций и, наконец, как среда, в которой прорывают траншеи, шахты, устраивают жилые и складские помещения.

С давних лет эскимосы Аляски строят свои жилища (иглу) из снежных кирпичей. Сегодня из снежных плотных блоков сооружают разнообразные постройки и даже ангары для вертолетов.

Известно, что снег хорошо сопротивляется сжатию. Поэтому в «снежной архитектуре» широко применяют своды и купола — ведь составляющие их блоки всегда сжаты.

Отдельно следует сказать об использовании снега в качестве покрытия дорог и взлетно-посадочных полос. В Швеции, например, каждую зиму создают более 30 тыс. км дешевых снежно-ледяных дорог. С помощью специальных виброуплотнителей доводят

плотность снежного покрытия до  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Даже простое перечисление различных применений снега и льда в нашей жизни потребовало бы много места. Можно было бы немало рассказать о таких глобальных проблемах, как «Снег и климат», «Ледники и обводнение пустынь», «Развитие зимних видов спорта». Все мы в той или иной мере наслышаны об этих проблемах. Вместе с тем есть области применения снега, известные только специалистам. Отметим одну из них — использование снега для контроля загрязненности атмосферы. Наверное, далеко не все знают, что снег очень чутко реагирует на загрязненность атмосферы. Его собственная загрязненность растет быстрее, чем увеличивается производство продукции, являющейся загрязнителем. Например, ежегодный прирост производства ртути в мире составляет 1,8%, а загрязненность ртутью снега в Антарктиде или Гренландии увеличивается на 2,7% в год.

глава

# 19

метель

Мертвое поле, дорога степная!  
Вьюга тебя заметает ночная,  
Спят твои села под песни метели,  
Дремлют в снегу одинокие ели...

*И. А. Бунин*





Вместе с зимой к нам приходят метели и снежные заносы. Приятно во время метели находиться в доме и наслаждаться теплом горящего камина под вой ветра, реющего за окнами. Но страшно оказаться в это время где-нибудь в открытом поле среди снежных вихрей, когда уже в двух шагах ничего не видно, когда ледяной ветер забивает рот, глаза, уши. Метели приносят нам много неприятностей. Они оставляют после себя перегороженные высокими сугробами улицы, занесенные снегом дороги, поваленные столбы, разрушенные постройки. Метельные ветры могут снести снежный покров с полей, тем самым обрекая их на иссушение; они же могут настолько замедлить весеннее таяние снегов, что посевы озимых вымокнут и погибнут.

У метели коварный нрав — она начинается, как правило, внезапно. Только что все было тихо, светило солнце — и вдруг в течение часа все вокруг решительно изменяется.

День светит; вдруг не видно зги,  
Вдруг ветер налетел размахом,  
Степь поднялася мокрым прахом  
И завивается в круги...

Так описывает начало метели П. А. Вяземский. Внезапно налетает сильный ветер, поднимаются вихри «мокрого праха», иначе говоря, снега; все исчезает в снежном хаосе. Начавшись, метель очень быстро набирает силу — и вот

Снег сверху бьет, снег веет снизу,  
Нет воздуха, небес, земли,  
На землю облака сошли,  
На день насунув ночи ризу.  
Шторм сухопутный: тьма и страх!  
Компас не в помощь, ни кормило;

Чутье заглохло и застыло  
И в ямщике, и в лошадях...

Нельзя не вспомнить еще одно описание начинающейся метели, поражающее своей точностью. У А. С. Пушкина в «Капитанской дочке» метель застигает героя, когда он в кибитке едет по приволжской степи, направляясь к месту своей будущей службы. «Я увидел в самом деле на краю неба белое облачко, которое принял было сперва за отдаленный холмик. Ямщик изъяснил мне, что облачко предвещало буран... Лошади бежали дружно. Ветер между тем час от часу становился сильнее. Облачко обратилось в белую тучу, которая тяжело поднималась, росла и постепенно облегла небо. Пошел мелкий снег — и вдруг повалил хлопьями. Ветер завыл; сделалась метель. В одно мгновение темное небо смешалось со снежным морем. Все исчезло. «Ну, барин, — закричал ямщик, — беда, буран!» Я выглянул из кибитки: все было мрак и вихорь. Ветер выл с такой свирепой выразительностью, что казался одушевленным...»

Нет ничего удивительного в том, что человек всегда очень эмоционально воспринимал метель. Прислушиваясь к завыванию ветра и шуму снежных вихрей, он одушевлял метель, заселял ее живыми существами.

Вспомним прекрасные пушкинские строки:

Буря мглою небо кроет,  
Вихри снежные крутя,  
То, как зверь, она завоет,  
То заплачет, как дитя,  
То по кровле обветшалай  
Вдруг соломой зашумит,  
То, как путник запоздалый,  
К нам в окошко застучит.

Здесь метель воет, как зверь,  
плачет, как дитя, стучит в окно  
подобно запоздалому путнику.

И конечно, когда же, как не во  
время метели, начинает озоровать  
нечистая сила? Люди издавна ве-  
рили, что заблудившиеся в метель  
путники становятся жертвами бес-  
сов. Отдавая дань народным по-  
верьям, А. С. Пушкин написал  
стихотворение, которое так и на-  
звал — «Бесы».

...Эй, пошел, ямщик! — Нет мочи:  
Коням, барин, тяжело,  
Вьюга мне слипает очи;  
Все дороги занесло,  
Хоть убей, следа не видно;  
Сбились мы. Что делать нам!  
В поле бес нас водит, видно,  
Да кружит по сторонам...

В стихотворении П. А. Вязем-  
ского, которое мы уже частично  
приводили, тоже упоминается не-  
чистая сила:

...Тут выскочит проказник леший,  
Ему раздолье в кутерьме:  
То огонек блеснет во тьме,  
То перейдет дорогу пеший...  
Тут к лошадям косматый враг  
Кувыркнется с поклоном в ноги,  
И в полночь самую с дороги  
Кибитка на бок и в овраг.

Не обошлось без проказ черта  
и в «Ночи перед рождеством»  
Н. В. Гоголя. Эти проказы, как из-  
вестно, привели к тому, что вдруг  
пропал месяц с ясного неба и под-  
нялась метель. Та самая метель,  
из-за которой Чуб так некстати  
сбился с дороги. «Эх, какая ме-  
тель! — жалуется Чуб. — Свороти-  
ка ты, кум, немного в сторону,  
не найдешь ли дороги, а я тем  
временем поищу здесь. Дернет же  
нечистая сила таскаться по такой

вьюге! Не забудь закричать, когда  
найдешь дорогу. Эх, какую кучу  
снега напустил в очи сатана!»

Метель, вьюга, буран, пурга...  
Все эти термины относятся, по су-  
ти дела, к одному и тому же явле-  
нию природы. В словах «метель»  
и «вьюга» нашли отражение гла-  
голы «мести» и «витья» — ведь  
сильный ветер метет снег, намета-  
ет сугробы; поднятый ветром снег  
кружится, «завивается в круги».  
Слово «буран» тюркского проис-  
хождения. Так обычно называют  
метель жители заволжских степей  
и азиатской части СССР. В север-  
ных районах СССР чаще исполь-  
зуется термин «пурга». Оба тер-  
мина — «буран» и «пурга» — при-  
нято применять к особо сильным  
метелям.

**Какие бывают метели.** Короткий  
зимний день клонится к закату.  
Над заснеженным полем возника-  
ет легкий ветер — его скорость не-  
велика: всего 6...8 м/с (сила ветра  
3...4 балла). Под действием ветра  
над поверхностью снега появляются  
тонкие, почти прозрачные, не-  
прерывно меняющиеся снежные  
струйки. Они стелются, или, луч-  
ше сказать, струятся над самой  
поверхностью снежного покро-  
ва — до высоты 20...30 см.

Это поземок — самая слабая  
метель.

Но вот ветер заметно усилива-  
ется, его скорость возрастает до  
10...15 м/с, что соответствует силе  
в 5...7 баллов. Теперь снег подни-  
мается до высоты в несколько  
метров — начинается так называе-  
мая *низовая метель*. При сильных  
низовых метелях, когда скорость  
ветра достигает 20 м/с и более,  
снежные массы поднимаются в  
воздух до высот, измеряемых де-



сятками метров. Обратим внимание на то, что *низовые метели происходят в отсутствие снегопада*; небо может быть даже безоблачным. Плотные снежные вихри, заполняющие, как представляется застигнутому метелью путнику, все окружающее его воздушное пространство,— это снег, который еще недавно мирно покоился на земной поверхности, а теперь оказался поднятым вверх силой ветра. Низовые метели и поземки часто возникают, когда над данной местностью проходит периферия антициклона.

Особенно сильные снежные заносы образуются во время *общей метели* — когда одновременно наблюдаются и сильный ветер, и сильный снегопад. В этом случае в приземных слоях воздуха перемешивается снег, падающий сверху, и снег, поднятый ветром с поверхности земли. Помните, у Вяземского: «Снег сверху бьет, снег веет снизу...» Общие метели возникают при прохождении атмосферных фронтов, они являются следствием активной деятельности циклонов.

Низовые метели различаются по степени *насыщенности снегом ветрового потока*. Дело в том, что ветер может поднять в воздух и удерживать во взвешенном состоянии не более вполне определенного количества снега. Чем больше скорость ветра, тем больше это количество снега, тем выше «грузоподъемность» метели, или, лучше сказать, тем выше транспортирующая способность ветрового потока. Если ветровой поток переносит количество снега, как раз соответствующее максимуму его транспортирующей способности, то говорят о *насыщенной* низовой метели. Если же мас-

са переносимого ветром снега меньше упомянутого максимума, то говорят о *ненасыщенной* низовой метели.

Можно указать несколько районов на Земле, где низовые метели случаются довольно часто и достигают большой силы. Среди них значительные области на территории СССР — степи Поволжья, Западная и Восточная Сибирь, север Казахстана. Особенно сильные низовые метели свирепствуют (и притом почти круглый год) в Антарктиде, где скорость метелевых ветров достигает 60...90 м/с.

На бескрайних снежных просторах Антарктиды даже поземок представляет собой весьма впечатляющее зрелище (рисунок на с. 285).

Вполне понятно, что сильные низовые метели могут наблюдаться лишь в тех районах, где возникают достаточно сильные ветры. Но этого недостаточно. Весьма важно также, чтобы поверхностный слой снежного покрова был *относительно сухим и не слишком уплотненным*. Ветру трудно поднимать в воздух мокрый снег, трудно разрушать плотную поверхностную корку. Кроме того, нужна достаточно большая, ровная снежная поверхность, свободная от лесов, холмов, гор, чтобы у метели имелось пространство для разгона. Все эти условия как раз и выполняются в степных и лесостепных районах Поволжья и азиатской части СССР с их относительно сухим континентальным климатом, с холодными зимами, с редкими зимними оттепелями. Особенно хорошо рассматриваемые условия выполняются в Антарктиде, где, как мы уже говорили в предыдущей главе, поверхностный слой снежного покрова

оказывается настолько рыхлым, что подчас делает невозможным передвижение по нему даже на лыжах.

Надо сказать, что частички снега, мчащиеся по воздуху во время сильной низовой метели, очень мелкие и колкие. Фактически это ледяные обломки обычных снежинок. Они обладают исключительной проникающей способностью, легко забиваются в малейшие поры одежды.

Общие метели отличаются от низовых прежде всего более мощными снежными заносами. Эти заносы связаны в основном не с переносом снега ветром из других мест, а с обильными снегопадами. А чтобы такие снегопады происходили, необходима достаточно высокая влажность воздуха. Поэтому сильные общие метели характерны для приморских районов. Они часто происходят на побережьях США, Канады, Гренландии, с ними хорошо знакомы жители нашего Дальнего Востока, Сахалина, Камчатки. Огромные массы выпадающего при таких метелях мокрого тяжелого снега создают заносы и завалы, представляющие особую опасность для транспорта, систем связи и различных построек.

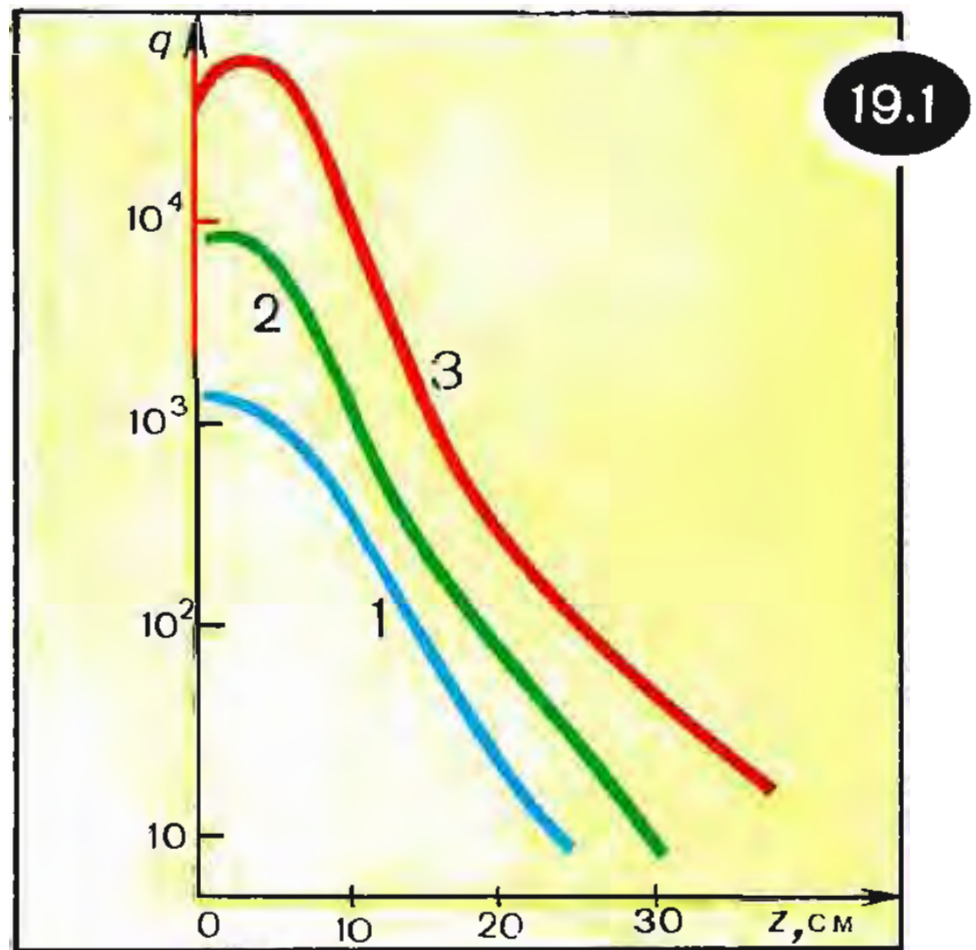
### Микроструктура низовых метелей.

Как уже отмечалось, частички снега, поднимаемые ветром с поверхности снежного покрова, в основном представляют собой обломки снежинок. В дальнейшем будем называть их метельными частицами. Размеры этих частиц находятся в пределах примерно от 0,1 до 0,5 мм.

Можно выделить три типа движений метельных частиц, они схе-

матически показаны на рисунках на с. 285. На левом рисунке — влечение частиц вдоль поверхности снега; на среднем — прыжки частиц; на правом — витание частиц в воздушных потоках. Влечение частиц происходит в тонком приземном слое воздуха, имеющем толщину не более сантиметра. Прыжки наблюдаются до высоты порядка метра, в отдельных случаях до нескольких метров. Выше можно видеть лишь витание метельных частиц.

Основная масса снега переносится при низовой метели в слое воздуха, верхняя граница которого находится на высоте не более метра от поверхности снежного покрова. Это хорошо демонстрирует рисунок 19.1, где для разных скоростей ветра приведена зависимость удельного расхода снега  $q$  от высоты  $z$ . Поясним: величина  $q(z)$  есть масса снега, которая переносится ветром за единицу времени через единицу площади на высоте  $z$  (площадь, через которую переносится снег, ориентирована перпендикулярно на-



19.1

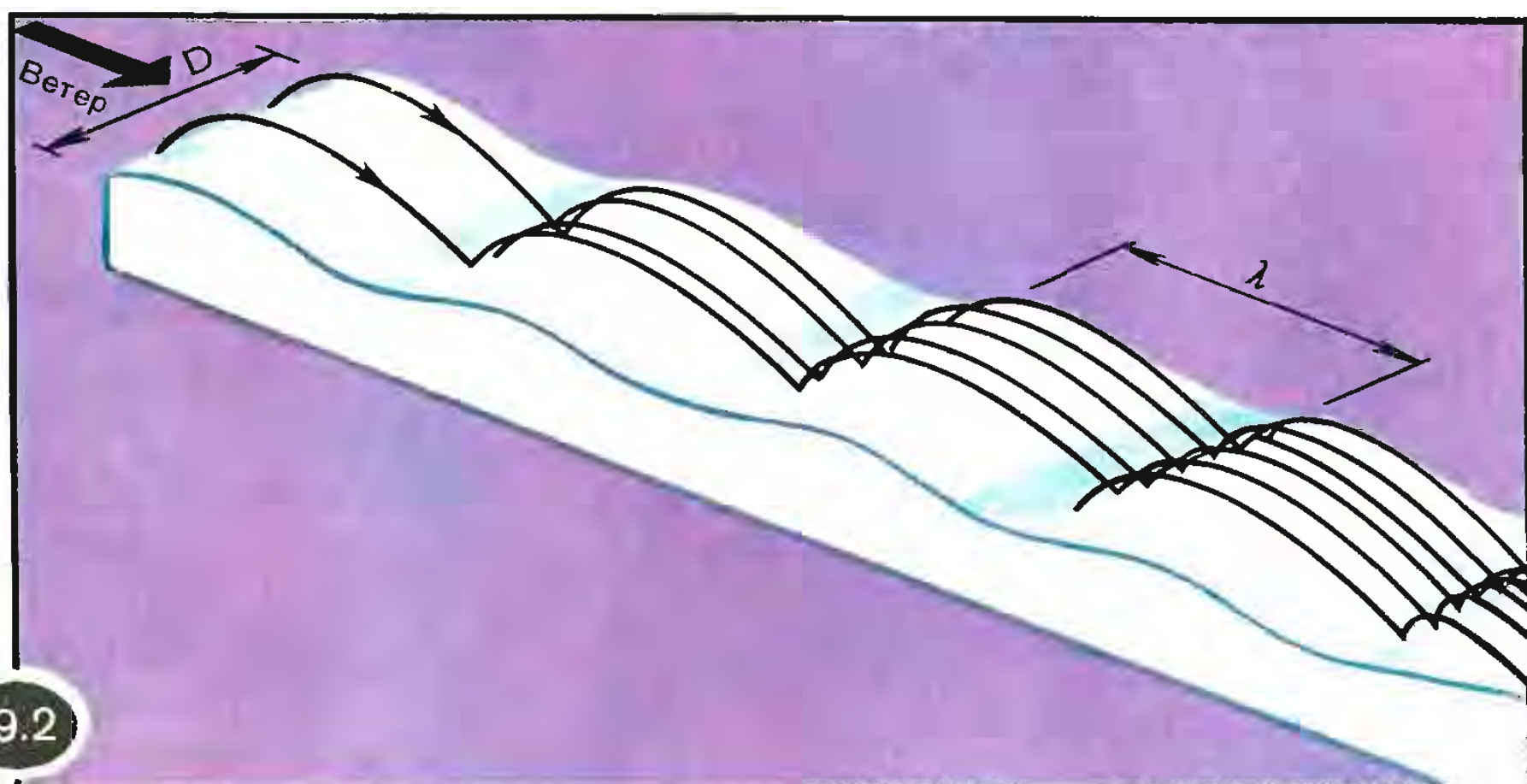


правлению ветрового потока). На рисунке представлены три экспериментальные кривые: 1 — для скорости ветра  $v=10$  м/с, 2 — для  $v=14$  м/с, 3 — для  $v=24$  м/с. Чем больше скорость ветра, тем больше масса снега, переносимая ветром в единицу времени через ту или иную площадку. Видно, что во всех трех рассматриваемых случаях почти весь снег переносится в пределах приземного воздушного слоя толщиной всего 20...30 см. Это говорит о том, что прыжки метельных частиц являются основным типом движения при низовых метелях. Для него часто используют термин *сальтация* — от итальянского *salto*, что означает «прыжок».

Попробуем очень упрощенно рассмотреть развитие низовой метели за счет сальтации метельных частиц. Выделим мысленно полосу снежного поля некоторой ширины  $D$ , пусть она начинается от наветренного края поля (от того места, где метель «начинает разбег») и идет вдоль направления ветра. Поверхность снежного поля, над

которым разгоняется метель, имеет вид пологих снежных волн. Метельные частицы вырываются из снега на наветренных склонах гребней этих волн, пролетают по горизонтали расстояние  $\lambda$  (оно как раз и определяет длину снежных волн) и падают на наветренный склон соседних гребней, выбивая из них новые частицы; энергия, получаемая летящими частицами от ветра, расходуется на выбивание новых частиц. Будем полагать, что частица, совершив свой прыжок дальностью  $\lambda$ , выбивает в среднем  $n$  новых частиц. Так как  $n > 1$ , то постепенно, от прыжка к прыжку, общее число метельных частиц будет нарастать — метель будет постепенно разгоняться. Все это в общих чертах изображено на рисунке 19.2.

Предположим, что в самом начале «полосы разгона» за единицу времени поднимается в воздух  $N$  метельных частиц. Нетрудно подсчитать, сколько частиц поднимется в воздух за единицу времени после  $k$  последовательных прыжков, т. е. на расстоянии  $L = k\lambda$



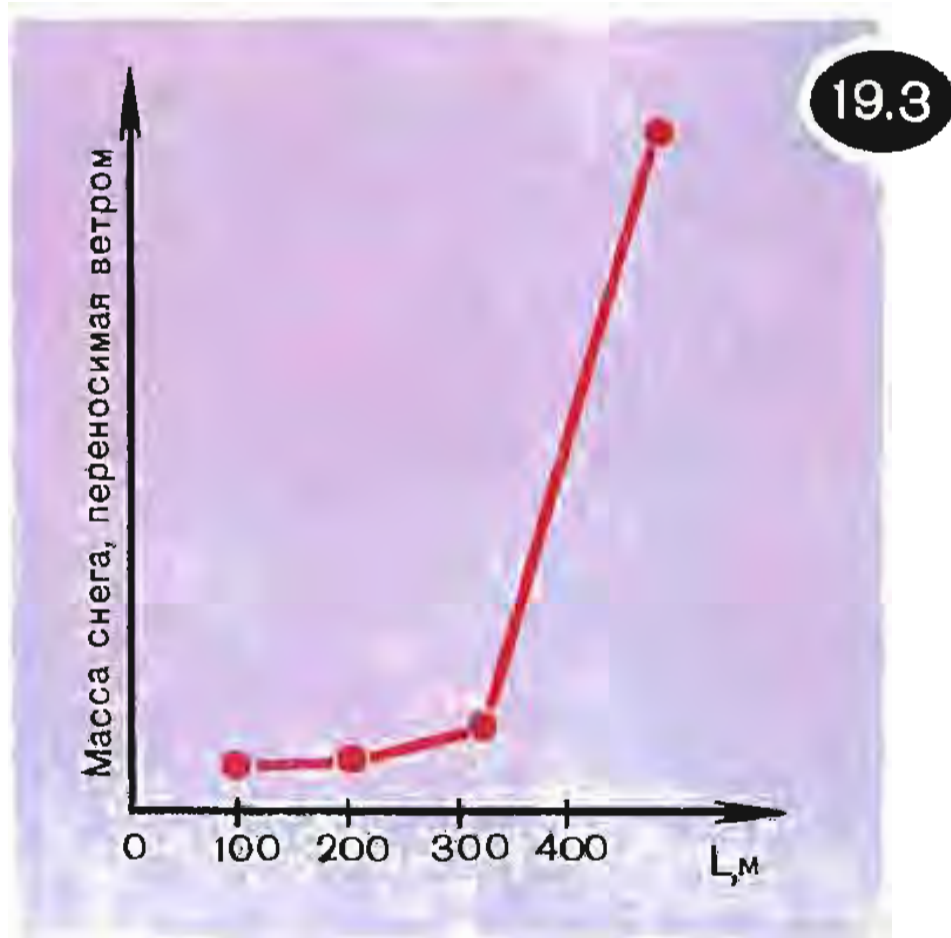
19.2

от начала полосы. От  $N$  исходных частиц получим после первого прыжка  $Nn$  частиц, после второго прыжка  $Nn^2$  частиц, после  $k$ -го прыжка  $Nn^k$  частиц, или, иначе говоря,  $NnL/\lambda$  частиц.

Таким образом, количество метельных частиц, а значит, и масса взвешенного в воздухе снега растет по мере разгона метели как показательная функция от длины  $L$ , на которой рассматривается разгон.

На рисунке 19.3 в качестве примера приведена экспериментально полученная зависимость переносимой ветром массы снега от расстояния  $L$ , измеряемого от наветренного края снежного поля; данные получены для скорости ветра 10 м/с. Экспериментальная кривая действительно напоминает показательную функцию  $n^{L/\lambda}$  при условии, что  $\lambda \approx 10$  м и  $n \approx 1,1$ . Как понимать тот факт, что  $n = 1,1$ ? Это означает, что из десяти совершивших прыжок частиц в среднем лишь одна обуславливает появление двух новых частиц, остальные же девять частиц или просто повторяют прыжок, или вырывают из снежного покрова по одной новой частице, а сами прекращают сальтацию.

Подчеркнем, что нарисованная картина является весьма упрощенной. Очевидно, что величина  $n$  должна уменьшаться по мере увеличения массы взвешенного в воздухе снега, постепенно приближаясь к единице. Ведь рано или поздно метель должна стать насыщенной, иначе говоря, транспортирующая способность ветрового потока должна достичь своего предельного значения; после этого количество метельных частиц в воздухе будет оставаться в среднем одним и тем же. Длина



$LP$ , на которой достигается насыщение метели снегом, называется *длиной зоны разгона*, она равна 100...500 м. Можно сказать, что приведенные выше рассуждения справедливы лишь до тех пор, пока  $L \ll LP$ .

Заметим, что по мере обработки ветром поверхности снежного покрова она становится все более плотной и прочной (об этом мы уже говорили в предыдущей главе).

В результате длина зоны разгона  $LP$  оказывается величиной, меняющейся со временем. Она растет по мере упрочнения ветром поверхности снега.

Следует учитывать также, что не все метельные частицы падают обратно на поверхность снега. Многие частицы *испаряются* во время полета. Испарение снега оказывается существенным фактором, его необходимо принимать во внимание при анализе метельных процессов.

Мы видим, таким образом, что с физической точки зрения низовая метель представляет собой довольно сложное явление природы.



Теорию метелей пробуют создать лишь в последнее время. Работа эта необычайно трудна и пока еще далека от завершения.

**Волны на снегу.** При низовой метели на открытой равнинной местности формируются *снежные волны*. Зарождение этих волн можно объяснить тем, что прыжки метельных частиц имеют вполне определенную среднюю дальность. Как мы уже отмечали, длина снежной волны соответствует длине прыжка. Чем больше скорость ветра, тем дальше сальтируют метельные частицы и тем более длинной будет снежная волна. Волны, возникающие на снегу после сильных метелей, имеют длину от нескольких метров до нескольких десятков метров (в зависимости от силы ветра).

Итак, сальтация метельных частиц приводит к зарождению волнообразного рельефа на поверхности снега.

Едва лишь такой рельеф обозначился, как в игру немедленно вступает еще один фактор, который и определяет окончательное формирование рельефа.

Дело состоит в том, что над ложбинами наметившихся снежных волн в приповерхностном слое воздуха возникают *завихрения* (рис. 19.4). С подобной картиной мы уже встречались в главе 14 при рассмотрении волн на поверхности моря, а также песчаных

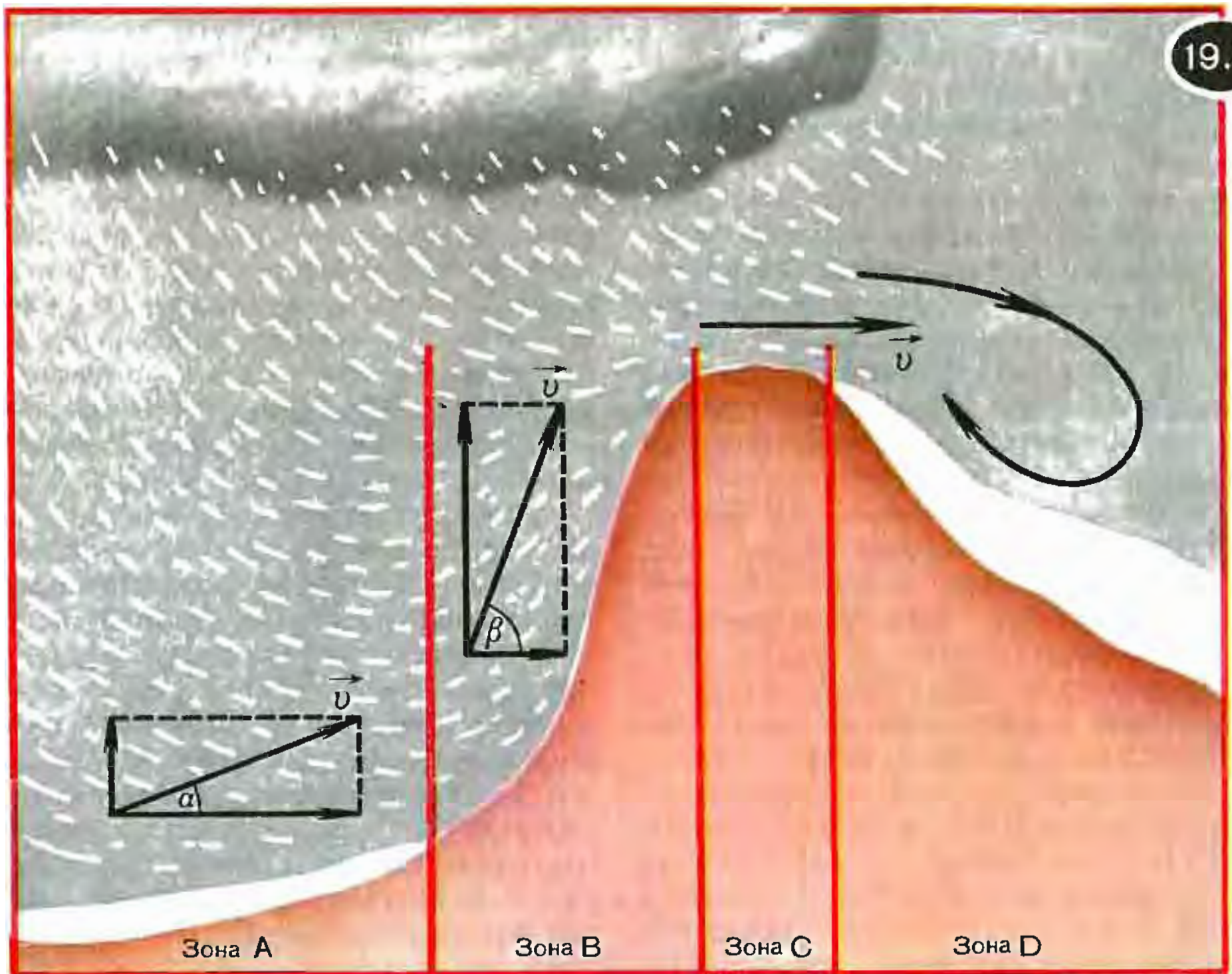
рифелей. Эти завихрения делают волнообразный рельеф снежного поля более *выраженным* — углубляются ложбины, увеличивается высота гребней волн. Благодаря воздушным завихрениям гребни волн нарастают с подветренной стороны. В то же время под давлением ветрового потока и вследствие бомбардировки метельными частицами наветренные склоны гребней непрерывно выветриваются. Итак, подветренные склоны непрерывно растут, а наветренные, наоборот, теряют снежный покров. В результате возникает медленное перемещение гребней снежных волн по направлению ветра. По окончании метели это перемещение, естественно, прекращается, и снежные волны застывают в неподвижности.

**Как далеко переносится снег метелью.** Дальность переноса снега метелью будем измерять от той линии, где метель начинает разгоняться. В пределах зоны разгона ветровой поток является, как мы знаем, ненасыщенным. Здесь больше снега поднимается в воздух, нежели падает обратно на поверхность земли. Поэтому постепенно снег все более выметается из зоны разгона, так что кое-где снежный покров может вообще исчезнуть.

За пределами зоны разгона ветровой поток *насыщен снегом*. Это насыщение соответствует данной скорости ветра. Поэтому, если вдруг на пути метели встречаются какие-то препятствия, например деревья, кустарники, холмы, благодаря которым горизонтальная скорость ветра уменьшается, то немедленно начинается активное *выпадение* снега на землю — возникают *снежные заносы*.







Ну а если таких препятствий нет? Как далеко в этом случае может перенести снег низовая метель?

Ранее полагали, что очень далеко, чуть ли не на сотни километров. Оказалось, однако, что это не так. Вследствие довольно интенсивного *испарения* летящих метельных частиц предельная дальность переноса снега ограничивается несколькими километрами. Лишь в Антарктиде она может достигать 10...20 км.

**Горные метели.** В горах низовым метелям негде разогнаться. Снежные заносы обусловлены здесь главным образом снегопадами.

Иными словами, горные метели — это снегопады при сильном ветре (их иногда называют *верховыми метелями*). Подчеркнем, что снежные заносы при верховых метелях, как правило, более мощны и опасны, чем при низовых метелях. Опасность усугубляется тем, что в горах большие снежные заносы могут давать начало *снежным лавинам*.

Места, где откладывается снег, интенсивность осадения и накопления снега — все это в значительной мере зависит от рельефа данной горной местности. Рассмотрим (как всегда, упрощенно) один пример. Над горой, изображенной на рисунке 19.5, проходит снеговая туча; вдоль поверхности



горы дует сильный ветер. Пусть  $v_0$  — вертикальная составляющая скорости снежинок, выпадающих из тучи, а  $\vec{v}$  — скорость ветра вблизи поверхности горы. На рисунке выделены четыре зоны:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . В пределах зоны  $A$  вертикальная составляющая скорости восходящего воздушного потока меньше вертикальной составляющей скорости падающих снежинок:  $v \sin \alpha < v_0$ . Поэтому в зоне  $A$  снег осаждается на поверхности земли.

В зоне  $B$  воздушный поток поднимается более круто (он следует склону горы), так что  $v \sin \beta > v_0$ . Это означает, что снижающиеся снежинки будут подхватываться воздушным потоком и сноситься к вершине горы; в зоне  $B$  снег не осаждается.

На вершине горы имеется горизонтальная площадка (зона  $C$ ). Здесь снежинки осаждаются на поверхности, но не удерживаются там — низовая метель выметает их из данной зоны.

В зоне  $D$  возникают вихревые воздушные потоки; они способствуют как осадению, так и накоплению снега. В этой зоне и будут скапливаться основные массы снега. При подходящих условиях здесь может зародиться снежная лавина.

В рассмотренном примере нижняя граница снеговой тучи была выше вершины горы. Однако она могла оказаться и ниже вершины. Очевидно, что в этом случае картина осадения и накопления снега усложнилась бы.

**Пылевые бури и метели: сходство и различия.** Сухая погода, высохшая почва, сильные ветры, вызванные прохождением перифе-

рии устойчивого антициклона, — в результате в воздух поднимаются огромные массы пыли, закрывающие подчас все небо: начинается пылевая буря. Исключительно сильная буря разразилась в степных областях Украины в апреле 1928 г. Ветер поднял в воздух более 15 млн т чернозема (с площади около 1 млн км<sup>2</sup>); высота облаков черной пыли достигала 700...800 м. Эта пыль была перенесена на запад и осела в Прикарпатье и Румынии.

В результате толщина черноземного слоя в пострадавших областях Украины уменьшилась примерно на 10 см.

В зависимости от структуры и окраски почв, выдуваемых ветром, наблюдаются пылевые бури разного цвета. Черные бури возникают на черноземных почвах (например, на Украине, в юго-восточных районах европейской части СССР, в Башкирии). На суглинках зарождаются желтые или бурые бури (бури в Казахстане). На красноватых почвах, богатых оксидами железа, случаются красные бури (в пустынях Средней Азии, Ирана, Афганистана). На солончаках могут возникнуть белые бури.

*Пылевые бури сродни сильным низовым метелям.* И в том и в другом случае необходимы сильный ветер и сравнительно рыхлый поверхностный слой, способный подниматься под действием ветра в воздух. Правда, для пылевой бури требуется более сильный ветер; его скорость должна быть не меньше 15 м/с, тогда как достаточно сильная метель может разыграться уже при скорости ветра 10 м/с. Микроструктура пылевой бури аналогична микроструктуре низовой метели. Частицы пыли

совершают те же движения, что и метельные частицы: влечение вдоль поверхности, прыжки, витание в воздушных потоках. Пылевая буря изменяет рельеф местности примерно так же, как и метель: в одних местах происходит выметание поверхности, в других нарастают «сугробы», на поверхности земли образуются пылевые волны.

Вместе с тем пылевые бури существенно отличаются от метелей — ведь частицы пыли совсем не похожи на метельные частицы, или снежинки. Взаимодействуя, снежинки сцепляются друг с другом, между ними образуются ледяные связи; под действием ветра поверхность снежного покрова упрочняется. Подобных взаимодействий между частицами пыли нет; слой сухой почвы под действием ветра не упрочняется, а, наоборот, делается еще более рыхлым и податливым. Кроме того, в отличие от метельных частиц, частицы пыли не испаряются. Все это позволяет понять два основных отличия пылевых бурь от метелей.

Первое состоит в том, что доля взвеси в пылевой буре может оказаться значительно больше, чем в метели.

Второе отличие связано с дальностью переноса взвеси.

Как уже отмечалось, дальность переноса снега метелями ограничена несколькими километрами. Что же касается пылевых бурь, то они могут проходить расстояния в сотни и даже тысячи километров.

Когда рукопись данной книги уже была написана, газеты принесли сообщение о сильной пылевой буре, пронесшейся 19 декабря 1985 г. над Ашхабадом. В де-

сят часов утра вдруг стало смеркаться, и вскоре сделалось темно, как в безлунную ночь. В течение нескольких часов город находился в удушливой темноте. Поднялся штормовой ветер, шлейфы песка стелились по асфальту, ломались деревья, срывались крыши с домов. Эта пылевая буря пришла с Аравийского полуострова; она пересекла с юга на север Иран, преодолев расстояние свыше 1500 км. Несмотря на столь огромное расстояние, буря сохранила в себе достаточно силы, чтобы перевалить через Копетдагский хребет и пронести над Ашхабадом более 100 тыс. т. пыли.

**Метелевое электричество.** Во время достаточно сильной метели или пылевой бури огромные массы снега или пыли стремительно несутся по воздуху. При этом происходит электризация метельных частиц и частиц пыли; на них накапливаются значительные электрические заряды. Как и в случае электризации грозовой тучи, процессы эти сложны и недостаточно изучены. Можно утверждать, что важную роль играет здесь трение частиц о поверхность земли, о воздух, а также столкновения частиц друг с другом.

Исследования показали, что метели и пылевые бури могут сопровождаться значительным увеличением напряженности электрического поля вблизи земной поверхности.

В главе 5 мы отмечали, что в условиях спокойной и чистой атмосферы напряженность поля в приповерхностных слоях воздуха составляет примерно 100 В/м; при грозе она возрастает в сотни и тысячи раз, т. е. достигает



значений  $10^4 \dots 10^5$  В/м. Таких же значений может достигать напряженность поля во время сильной метели или пылевой бури. Подобные метели являются, по сути дела, *зимними грозами*; они сопровождаются молниями.

Электризация метельных частиц (частиц пыли) приводит к появлению дополнительных (электрических) сил, действующих на эти частицы. Тем самым метелевое электричество оказывает определенное влияние на характер и интенсивность снежных заносов. В зависимости от направления приземного электрического поля и знака зарядов, накапливающихся на метельных частицах, электри-

ческие силы будут либо «прижимать» частицы к земле, либо, напротив, «приподнимать» их над землей. Одно время возлагались надежды на то, что метелевое электричество будет способствовать приподниманию частиц вверх и тем самым уменьшит опасность снежных заносов. Однако, как показали исследования, в большинстве случаев наблюдается эффект «прижимания» частиц к земле.

Метелевое электричество особенно опасно для современных линий электропередач. Вследствие значительного ухудшения электроизоляционных свойств воздуха во время метели возникает опасность пробоя.

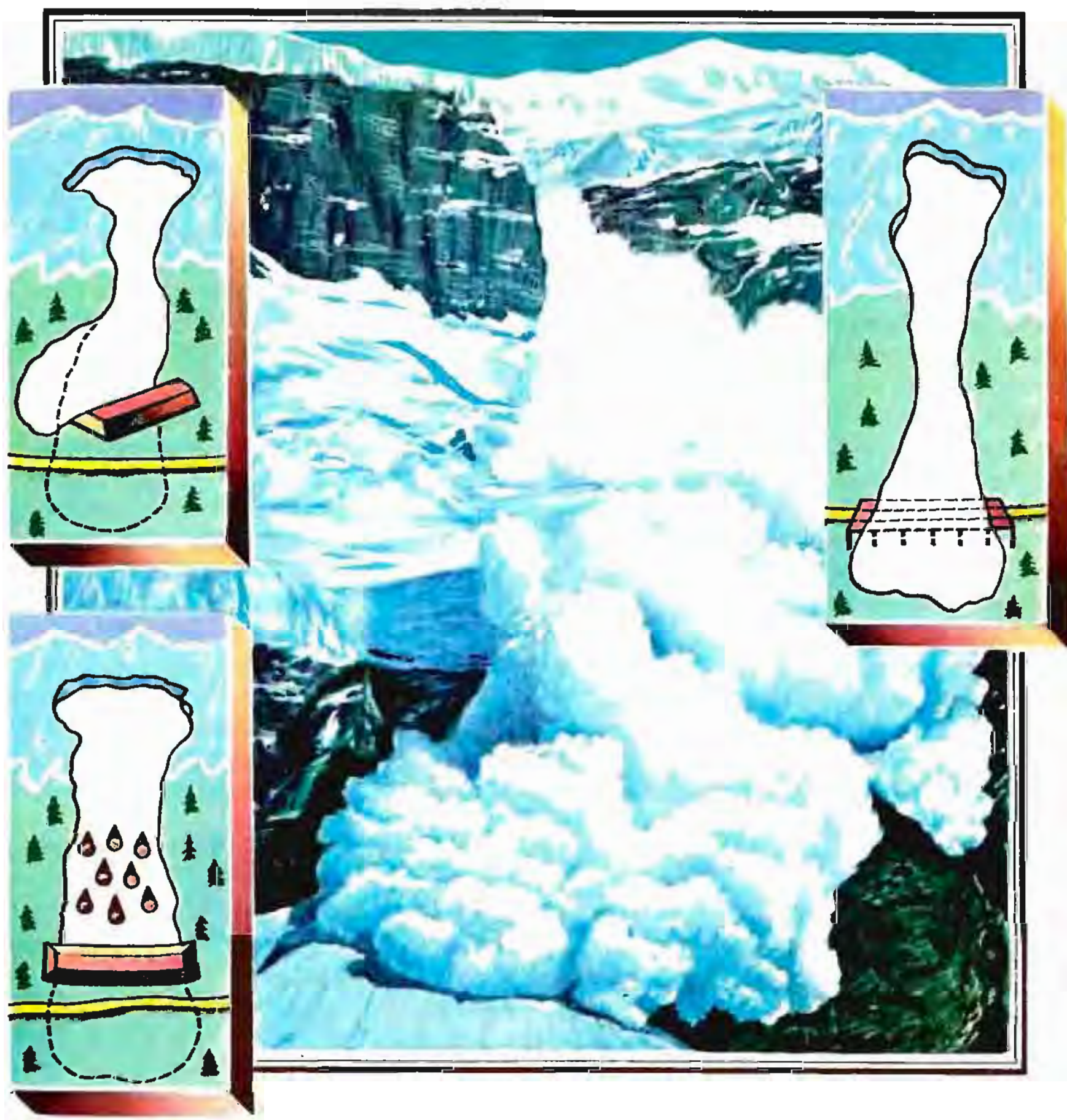
# Глава

# 20

# ЛАВИНЫ

Над страшною бездной дорога бежит,  
Меж жизнью и смертью мчится;  
Толпа великанов ее сторожит;  
Погибель над нею гнездится.  
Страшись пробужденья лавины ужасной,  
В молчаньи пройди по дороге опасной.

*Ф. Шиллер*





В солнечный зимний день во всем великолепии предстают перед нами горные склоны, покрытые искрящимся снегом. Белое безмолвие... Его величественная, холодная красота и неподвижность порождают ощущение мира и спокойствия. Но обманчиво спокойствие в горах. Внезапно ровный белый склон рассекается трещиной. Огромные массы снега устремляются вниз со скоростью экспресса, с оглушающим гулом. Внизу остановка, удар; вверх вздымается снежное облако. Таково одно из наиболее эффектных явлений природы — *снежная лавина*.

Слово «лалина» (как и «лава») происходит от латинского корня *lab*, означающего «неустойчивость», «подвижность». Заметим, что в современном русском языке употребляется слово «лабильность» как синоним «неустойчивости»; ему противостоит «стабильность» — «устойчивость». На основе корня *lab* в средневековой латыни образовалось слово «лабина» (*labine*), видоизменившееся со временем в «лалину».

Термин «лалина» прочно закрепился в литературном и научном немецком языке уже в средние века. Позднее его широко использовали в своих произведениях Шиллер и Гёте.

В стране широкой тесно будет мне.  
Уж лучше пусть над головой лавины,—

писал Шиллер. В «Фаусте» Гёте можно найти такие строчки:

«Я для того пошел пешком по скалам  
И в руки взял дорожную клюку,  
Чтобы внимать лавинам и обвалам...»

Лавины и обвалы... Эти термины применялись в русском языке как синонимы.

М. Ю. Лермонтов писал в «Кавказском пленнике»:

...Глядел он с ними, как лавины  
Катятся с гор и как шумят,  
Как лавой снежною блестят,  
Как ими кроются долины.

А. С. Пушкин оказывал явное предпочтение термину «обвал». В «Путешествии в Арзрум во время похода 1829 года» он пишет: «В это время услышал я глухой грохот. «Это обвал»,— сказал мне г. Огарев. Я оглянулся и увидел в стороне груды снега, которая осыпалась и медленно съезжала с крутизны...» Вспомним знаменитые пушкинские строки:

Отселе я вижу потоков рожденье  
И первое грозных обвалов движенье...

Конечно, снежная лавина (обвал) в горах — исключительно впечатляющее зрелище. Но восхищаться лавиной можно лишь на достаточно большом расстоянии от нее. Это красивое явление природы необычайно опасно. В Альпах его недаром называют «белой смертью». На Памире и Тянь-Шане по сей день говорят о лавинах как о «снежных драконах», которые рыщут в горах и безжалостно убивают путников на горных дорогах.

В одной только Европе (в Альпах, Пиренеях, Скандинавских горах) ежегодно гибнут под снежными лавинами сотни человек. Известны случаи, когда лавина за несколько минут стирала с лица земли целые поселки и даже города. Один из таких печальных случаев произошел 31 мая 1970 г. в Перу. В результате землетрясения с вершины горы Уаскаран сорвалась огромная масса снега и льда

(по оценкам специалистов, более миллиона тонн). Эта масса упала на нижележащий ледник; в результате десятки миллионов тонн снега, льда, песка, каменных глыб образовали мощную лавину, устремившуюся вниз к долине реки Санта. Передний вал лавины имел высоту около 90 м. Лавина обрушилась на город Юнгай и поселок Ранраирка и полностью уничтожила их; число жертв достигло 20 тыс. человек.

В наше время человек все активнее проникает в горные районы: он прокладывает через горы дороги и линии электропередачи, исследует горные недра, строит в горах туристские комплексы, возводит жилые дома. Осваивая горные области, человек вынужден учитывать всевозможные опасности, подстерегающие его в горах. К ним относятся землетрясения, оползни, сели (грязе-каменные потоки) и, конечно же, снежные заносы и порождаемые ими лавины. Вопрос о лавинной опасности стоит сегодня в повестке дня на одном из первых мест. Коварны и беспощадны лавины, однако современный человек успешно учится противостоять им. Так что вполне оправдан оптимистический настрой стихотворения В. С. Высоцкого:

Здесь вам не равнина,  
Здесь климат иной —  
Идут лавины одна за одной,  
И за камнепадом ревет камнепад.  
И можно свернуть,  
Обрыв обогнуть,  
Но мы выбираем трудный путь —  
Опасный, как военная тропа.

**География лавин.** Вполне понятно, что наиболее крупные очаги лавин сосредоточены в высочайших

горных хребтах: Гималаях в Азии, Кордильерах в Южной Америке, Скалистых горах в Северной Америке. В Европе особенно высокая лавинная опасность — в Альпах, там насчитывается 20 тыс. мест схода лавин.

На первый взгляд может показаться, что в СССР, где много равнин и относительно невысоких плоскогорий, лавиноопасные районы занимают незначительную площадь. Но это не так. Территория, на которой с гор сходят лавины, занимает почти 20% площади нашей страны (более 4 млн км<sup>2</sup>), что, кстати говоря, равно площади ста Швейцарий.

На рисунке 20.1 приведена карта лавиноопасных районов СССР. Она представляет собой результат тридцатилетней работы советских исследователей. Красным цветом выделены районы со значительной лавинной опасностью; в этих районах много лавинных очагов, лавины сходят ежегодно. В районах, выделенных зеленым цветом, сеть лавин относительно разрежена; лавины сходят не каждый год. Наконец, в районах, выделенных желтым цветом, лавины встречаются лишь в отдельных местах и сходят только в многоснежные годы.

Давно исследуемые лавинные очаги на Кавказе, в Хибинах и Карпатах выглядят на карте маленькими пятнышками по сравнению с лавиноопасными районами на Памире, Тянь-Шане, Саянах, в Забайкалье, на Колымском хребте, Камчатке, Чукотке. Достаточно мощные лавинные очаги существуют также в горных районах южнее полуострова Таймыр, на Сахалине, Северном Урале, Новой Земле. Заметим, что при проектировании и строительстве горных



участков Байкало-Амурской магистрали пришлось серьезно учитывать лавинную опасность.

**Когда рождаются лавины.** Различные случаи рождения снежных лавин можно разбить на *четыре* группы.

*Первая группа.* Долго бушует сильная горная метель с обильным снегопадом. На подветренном склоне горы скапливается много снега. В какой-то момент времени количество накопившегося снега оказывается чрезмерным и рождается лавина.

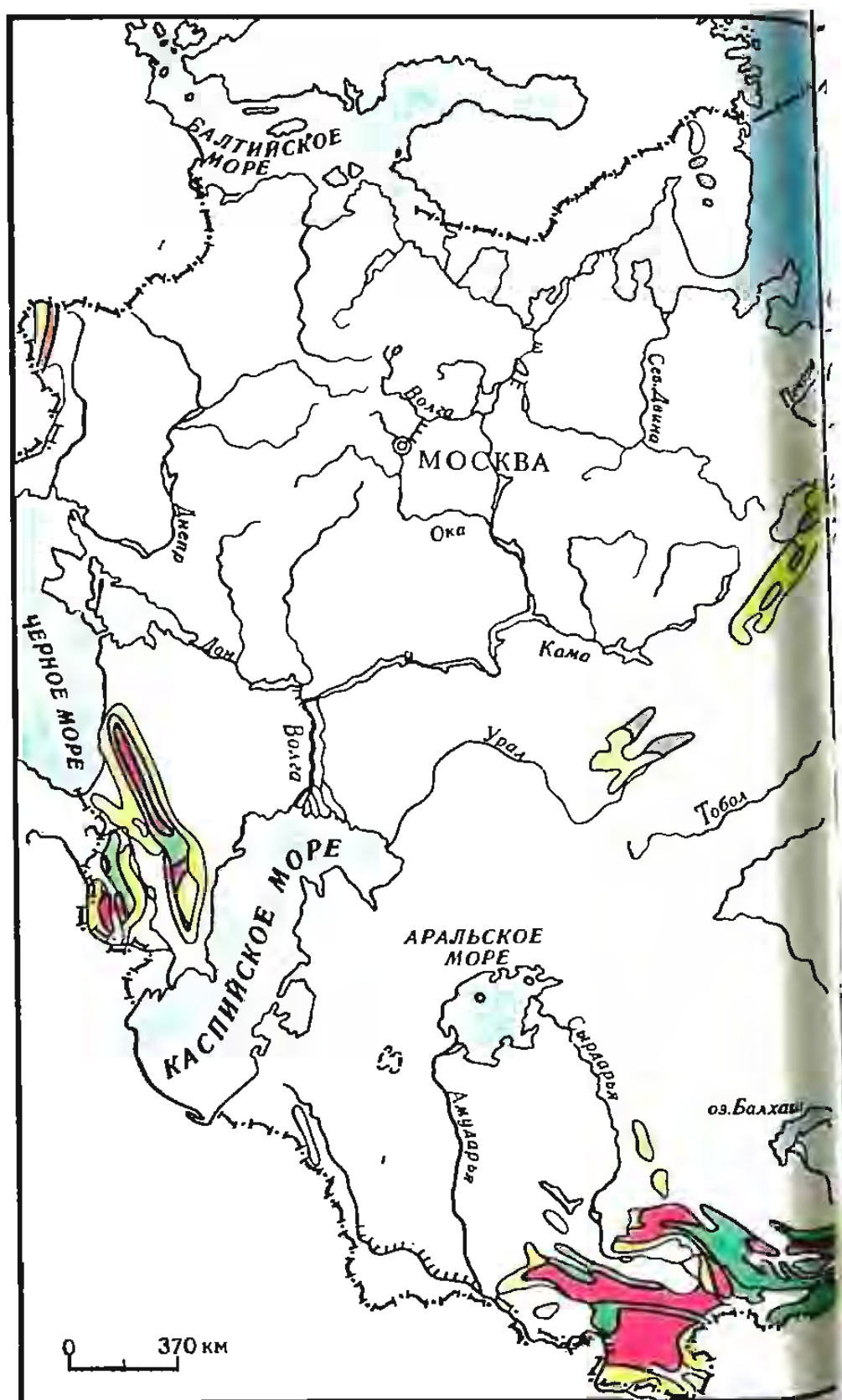
*Вторая группа.* Метель бушевала накануне, а сегодня ясный солнечный день. Довольно сильный мороз. Кругом царит спокойствие. И вдруг на снежном покрове где-то недалеко от вершины горы возникает трещина — рождается лавина. Такое ее рождение представляется совершенно неожиданным. Кажется, что лавина коварно возникла без какой-либо причины. Только что стояла тишина, все было неподвижным, надежным — и вдруг огромные массы снега обрушиваются с гор в долину.

*Третья группа.* Происходят подземные толчки — и в результате возникает снежная лавина. Впрочем, землетрясение совсем не обязательно. Известны случаи, когда снежные массы обрушиваются вниз даже от довольно незначительных сотрясений воздуха, например от крика. Помните, у Шиллера:

Страшись пробужденья лавины ужасной,  
В молчаньи пройди по дороге опасной.

Иногда для того, чтобы специально вызвать сход лавин, устраивают в горах стрельбу из артиллерийских орудий.

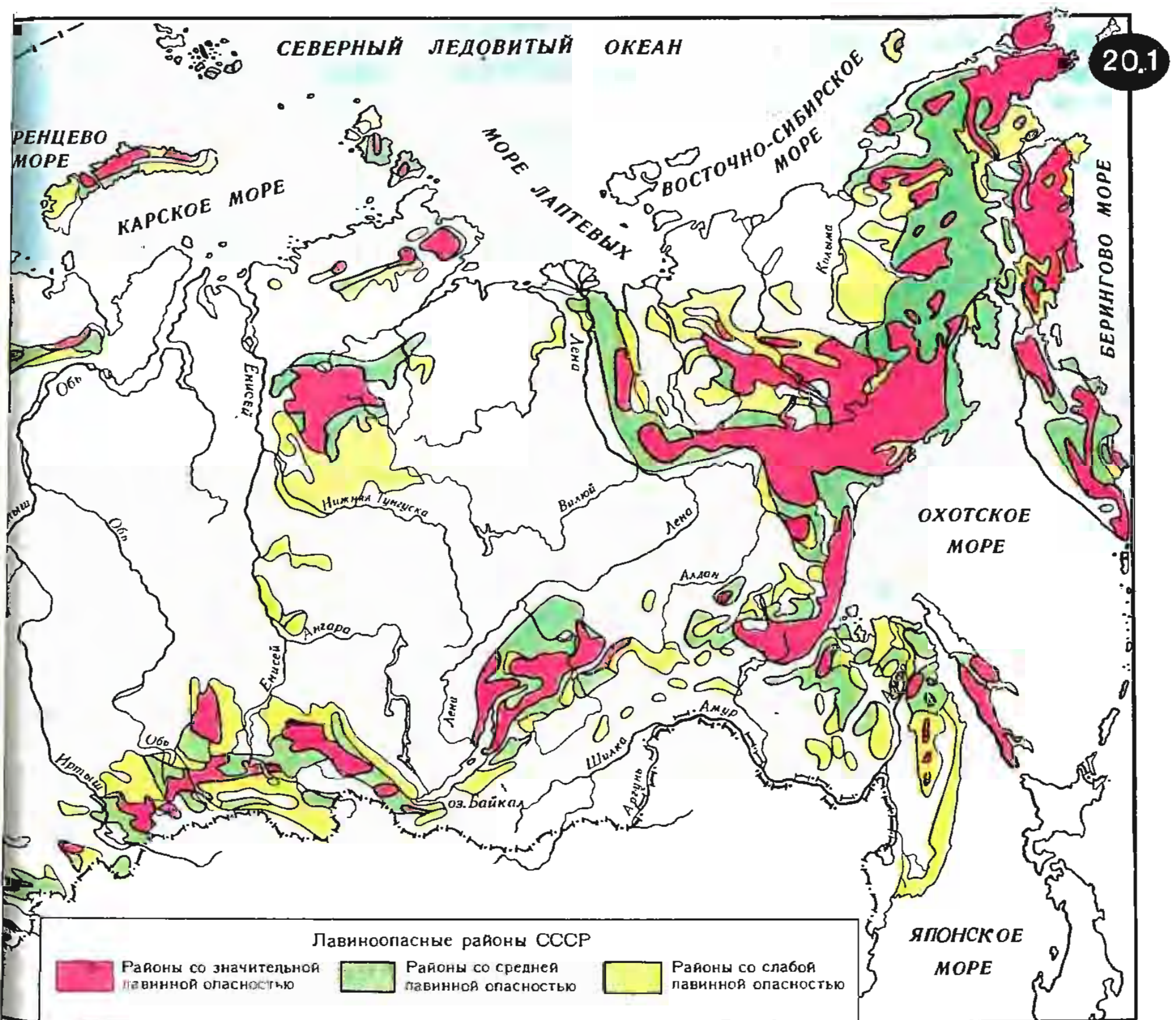
*Четвертая группа.* Допустим, что снегопада давно не было и снег на горных склонах хорошо слежался. Он лежит так уже несколько недель, и, кажется, даже артиллерийская стрельба не в состоянии нарушить его устойчивость. Но вот наступила сильная оттепель, кругом зажурчали ручейки, снег на склоне горы заметно осел и потемнел. И вдруг массы мокрого снега начинают быстро сползать вниз — оттепель привела к рождению лавины.





Почему они рождаются (физика возникновения лавин). Объясним с точки зрения физики перечисленные выше четыре группы случаев рождения снежных лавин. Для этого обратимся к следующей простой задаче из механики. Рассмотрим массу снега  $M$ , находящуюся на наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha$  (рис. 20.2). На снег действуют три силы (будем считать, что все они приложены в центре масс рассматриваемого объема снега): сила тяжести  $Mg$ ,

сила нормальной реакции  $R$  и сила  $F$ , удерживающая снег на наклонной плоскости. Разложим силу тяжести на две составляющие, как это показано на рисунке. Составляющая  $Mg \cos \alpha$  уравновешена силой нормальной реакции  $R$ :  $Mg \cos \alpha = R$ . Поэтому далее будем учитывать только составляющую  $Mg \sin \alpha$  (ее иногда называют скатывающей силой) и силу  $F$ , удерживающую снег на наклонной плоскости. Согласно второму закону Ньютона,





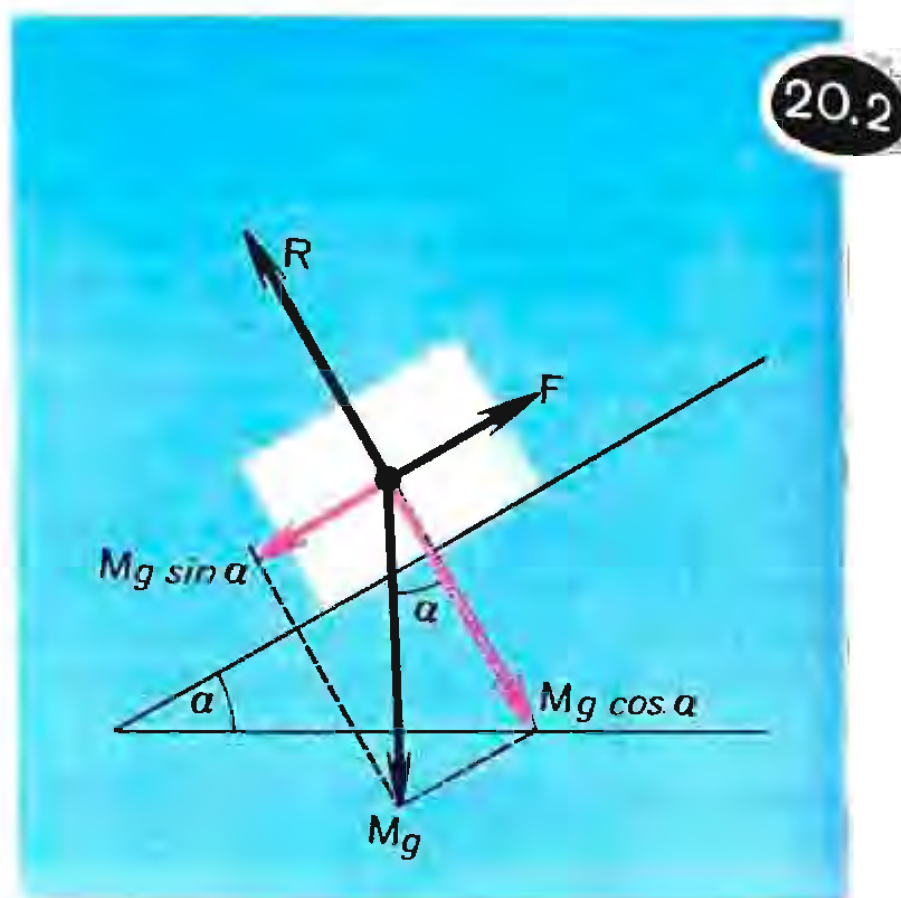
$$Ma = Mgs \sin \alpha - F, \quad (20.1)$$

где  $a$  — ускорение рассматриваемой массы снега. Силу  $F$  можно представить (в общем случае) как сумму трех слагаемых:

$$F = F_T + F_c + F_k. \quad (20.2)$$

Здесь  $F_T$  — сила трения. Это есть сила трения покоя, пока снег лежит на склоне горы; она превращается в силу трения скольжения, когда снег начинает двигаться по склону. Сила  $F_c$  — сила сцепления снега с поверхностью склона. Она обусловлена не столько неровностями, за которые «зацепляется» снежная масса, сколько сцеплением вследствие примерзания нижнего слоя снега к грунту, а также образования внутриснежных ледяных связей. Сила  $F_k$  — так называемая контурная сила. Она возникает за счет того, что ниже лежащие снежные массы мешают нашей массе снега соскользнуть вниз; кроме того, благодаря внутриснежным связям вышележащий снег также будет придерживать нашу массу.

Теперь перейдем к рассмотрению каждой из четырех отмеченных ранее групп лавин. Начнем с первой. Идет снегопад, и на подветренном склоне горы постепенно накапливается снег. О том, что снег должен накапливаться именно на подветренном склоне, мы уже говорили ранее (см. окончание предыдущей главы). Обратимся к уравнению (20.1). По мере накопления снега возрастает сила  $Mgs \sin \alpha$ . Одновременно растет и сила  $F$ , так что  $Mgs \sin \alpha - F = 0$ ; и, следовательно, снег неподвижен ( $a = 0$ ). Но сила  $F$  не может расти неограниченно. При длительно продолжающемся снегопаде рано или поздно наступит мо-



мент, когда сила  $F$ , возрастая, достигнет своего предельного значения  $F_{\max}$  (для данного угла наклона  $\alpha$ , для данных погодных условий, для данной микроструктуры снега и данной поверхности горного склона). С этого момента равновесие нарушается: сила  $Mgs \sin \alpha$  продолжает расти, а сила  $F$  более увеличиваться не может. Теперь  $Mgs \sin \alpha > F_{\max}$ , и, значит,  $Mgs \sin \alpha > F$  ( $a > 0$ ) — начинается скольжение снега по склону.

Рассмотрим вторую группу лавин. В данном случае увеличение скатывающей силы  $Mgs \sin \alpha$  оказалось недостаточным для того, чтобы возрастающая одновременно с ней сила  $F$  достигла своего предельного значения  $F_{\max}$ . Снегопад окончился, а лавина так и не возникла. Однако вопрос не следует считать закрытым; ведь внутри выпавшего снега будут происходить изменения, микроструктура снежного покрова будет постепенно меняться благодаря процессам испарения, подтаивания, кристаллизации. Это может привести к тому, что предельное значение

$F_{\max}$  силы, удерживающей снег на склоне, начнет с течением времени постепенно уменьшаться. Скатывающаяся же сила  $Mg \sin \alpha$  остается при этом, очевидно, неизменной. В результате в какой-то момент времени (он может наступить на следующие сутки или даже через несколько дней) постепенно уменьшающееся предельное значение  $F_{\max}$  становится меньше силы  $Mg \sin \alpha$  — тогда равновесие нарушается и начинается движение снега.

Почему сцепление снега с поверхностью склона может уменьшаться с течением времени? Вопрос этот непростой. По-видимому, определенную роль играет эффект, о котором мы говорили в главе 18. Напомним, что если температура внутри слоя снега понижается в направлении от грунта к поверхности снега, то в этом случае из-за перемещения водяных паров снизу вверх формируется характерная слоистая структура: вблизи грунта образуется рыхлый слой глубинного инея, а наверху, у поверхности снега, уплотненная «снежная доска». В морозный день температура у поверхности снега действительно ниже, чем в его глубине, вблизи грунта. Поэтому вполне можно допустить, что уменьшение сцепления снега с поверхностью горного склона есть результат формирования придонного слоя глубинного инея. Следует, однако, заметить, что, как показали исследования, дело, по-видимому, не только в глубинном инее. Образование внутри снежного покрова ледяных зерен фирна также способствует уменьшению сцепления снега с горным склоном.

При подземных толчках, а также при стрельбе из орудий, когда

образуется достаточно мощная звуковая волна, сцепление снега со склоном понижается скачком и начинается движение снежной массы. Это есть третья из отмечавшихся выше групп лавин. Возникновение лавины от не слишком сильных звуков возможно, очевидно, лишь когда снежная масса, что называется, «висит на волоске», т. е. когда сила  $Mg \sin \alpha$  всего лишь на ничтожную величину меньше, чем  $F_{\max}$ .

Совсем нетрудно объяснить теперь и последнюю, четвертую группу лавин. Оттепель приводит к таянию, снег насыщается водой, вода опускается внутри снежного слоя вниз и течет по склону горы, образуя тонкую прослойку между снегом и грунтом. Эта прослойка действует как смазка — она весьма эффективно уменьшает сцепление снега с горным склоном. И хотя по мере таяния снега скатывающаяся сила  $Mg \sin \alpha$  уменьшается, все же предельное значение  $F_{\max}$  силы, удерживающей снег на склоне, уменьшается еще быстрее. В результате возникает возможность образования лавины.

Итак, устойчивость снежного покрова, лежащего на склоне горы, определяется тем, насколько скатывающаяся сила  $Mg \sin \alpha$  меньше предельного значения  $F_{\max}$  удерживающей силы. Снег неподвижен, пока  $Mg \sin \alpha < F_{\max}$ ; при этом скатывающаяся сила уравновешивается удерживающей силой:

$$Mg \sin \alpha = F.$$

Иногда можно встретить утверждение: «снег неподвижен, пока удерживающая его на склоне горы сила больше скатывающей силы». Такое утверждение не просто ошибочно, оно абсурдно. Ведь при  $F > Mg \sin \alpha$  снег должен был



бы не лежать, а двигаться с ускорением по направлению силы  $F$ , иначе говоря, двигаться *вверх* по склону. Необходимо подчеркнуть: удерживающая сила автоматически следует за скатывающей силой. Уменьшается скатывающая сила — уменьшается и удерживающая; увеличивается скатывающая сила — увеличивается и удерживающая. Вот только не может удерживающая сила  $F$  стать больше своего предельного значения  $F_{\max}$ , а последнее уменьшается со временем, при оттепелях, подземных толчках и т. д. Равновесие нарушается и возникает снежная лавина, когда в силу тех или иных причин неравенство

$$Mg \sin \alpha < F_{\max}$$

превращается в неравенство

$$Mg \sin \alpha > F_{\max}$$

Пока

$$Mg \sin \alpha < F_{\max},$$

условие равновесия выполняется ( $Mg \sin \alpha = F$ ).

Если же

$$Mg \sin \alpha > F_{\max},$$

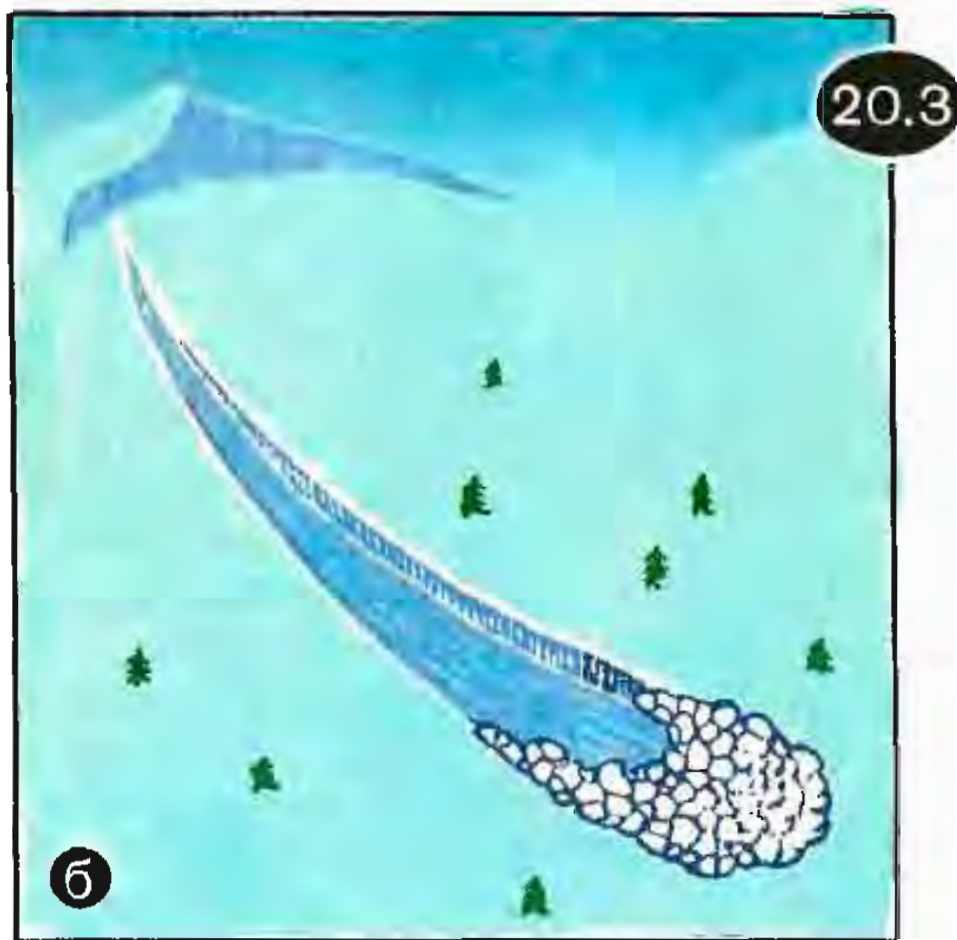
то условие равновесия, очевидно, выполняться не может — ведь  $F \leq F_{\max}$ .

**Внимание! Лавина.** Мы обсудили физику возникновения лавины. Значительно более сложной оказывается физика движения лавины, физика ее развития. Известно, что движение лавины может начинаться от нарушения устойчивости снежного покрова практически в точке — сдвиг одного кубического метра снега или и того меньше. Но очень быстро в движение вовлекается все больше и

больше снега — и вот в нижней части горного склона несется с оглушительным гулом в облаке белой пыли снежная масса, объем которой измеряется десятками и сотнями тысяч, а иногда и миллионами кубических метров. Скорость разогнавшейся лавины доходит до 20—50 м/с.

Какова физика столь стремительно ускоряющегося процесса? Ученые пока не могут удовлетворительно ответить на этот вопрос. Во многих странах в настоящее время начаты исследования физики развития снежных лавин. Надо подчеркнуть, что проводить подобные исследования очень сложно: опасно работать на лавиноопасном склоне, практически невозможно сколь-либо точно предугадать момент возникновения лавины, трудно и опасно выполнять те или иные измерения над низвергающейся вниз снежной массой. Фактически пока получены лишь самые первые экспериментальные данные по лавинам; многие из них еще не имеют объяснения.

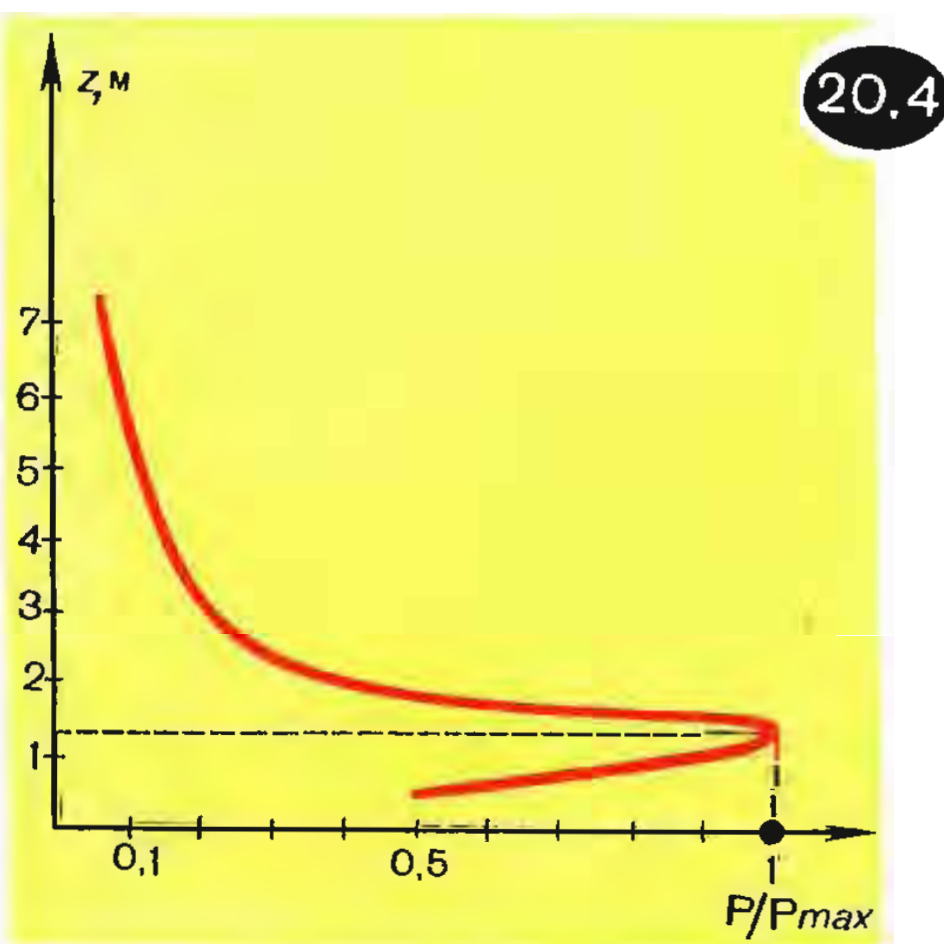
Все лавины начинают свое движение либо «от точки» (нарушается устойчивость малого объема снега), либо «от линии» (нарушается устойчивость значительного пласта снега). Лавина «от линии» схематически показана на рисунке 20.3, а, а лавина «от точки» — на рисунке 20.3, б. На рисунке 20.3, а выделены три зоны: I — зона зарождения лавины, II — зона транзита, III — зона отложения снега, принесенного лавиной. Расстояние по горизонтали от линии отрыва до дальнего края зоны отложения называют *дальностью выброса лавины*; для небольших лавин она измеряется сотнями метров, а для крупных — километ-



рами и десятками километров. Заметим, что лавины «от точки» возникают, когда поверхностные слои снега достаточно рыхлые, тогда как лавины «от линии» образуются при наличии «снежной доски» у поверхности снега. Физика развития как тех, так и других лавин фактически не исследована.

Если разогнавшаяся лавина встречает препятствие, она наносит по нему *сильный удар*. Мощность удара измеряют мгновенным значением давления, оказываемого снегом на препятствие в момент удара. Это давление называют ударным; оно измеряется тысячами и десятками тысяч килопаскалей (что соответствует сотням и тысячам тонн на квадратный метр). На рисунке 20.4 приведен довольно интересный график, полученный исследователями лавин на Хибинском нагорье. По вертикали на графике отложены высоты  $z$  точек в поперечном сечении лавины, в которых измерялось ударное давление  $p$ , а по горизонтали — отношение измеренного ударного давления к его

максимальному значению  $p_{\max}$  (которое в данном случае составляло 1070 кПа). Оказывается, ударное давление меняется по поперечному сечению лавины. В самом низу оно небольшое, затем возрастает, достигая максимального значения на высоте 1,3 м, после чего еще быстрее уменьшается, становясь равным  $\frac{1}{3} p_{\max}$  на высоте 2 м; да-





лее уменьшение давления с высотой продолжается, но все медленнее и медленнее. Получается, что основное ударное действие лавины сосредоточено в *нижнем слое* снега, имеющем толщину 2...3 м.

Еще один удивительный факт был обнаружен при измерениях зависимости ударного давления от скорости движения снега. Казалось бы, ударное давление должно расти со скоростью так же, как растет кинетическая энергия, т. е. пропорционально квадрату скорости. Но это не так. Измерения, выполненные в диапазоне скоростей от 20 до 50 м/с, показали, что ударное давление увеличивается со скоростью снега значительно *медленнее* — не по квадратичному, а по линейному закону. Это можно попробовать объяснить тем, что удар наносит не жесткая масса льда, а относительно легко деформируемая снежная масса. Возможно, значительная доля кинетической энергии лавины расходуется при ударе на деформацию снежной массы, т. е. переходит в теплоту.

**Борьба с лавинной опасностью.**  
В драме Шиллера «Вильгельм Телль» есть такие строки:

Так вот, давно б тяжелые лавины  
Засыпали селенье наше Альторф,

Но будто всенародным ополченьем  
Встречает их наш заповедный лес.

Леса и кустарники на горных склонах хорошо противостоят лавинам. Во-первых, они увеличивают сцепление снежного покрова со склоном горы, а во-вторых, не позволяют зародившейся лавине разогнаться. Вот почему насаждение лесов на горных склонах считается наиболее эффективным способом борьбы с лавинной опасностью.

Применяются, конечно, и другие способы. Некоторые из них схематически показаны на рисунках, которые можно видеть на с. 297. Слева вверху — дамба отклоняет лавину в сторону от дороги; внизу — специальные надолбы разрезают поток снега на части, вследствие чего лавина ослабляется; справа — дорога проходит внутри противолавинной галереи. В качестве еще одного способа борьбы с лавинной опасностью отметим искусственное регулирование схода лавин при помощи минометно-артиллерийского обстрела опасных склонов. В этом случае известно, где именно и когда сойдет лавина. Кроме того, при этом удается сбросить снежную массу более мелкими порциями, чем при естественном сходе лавины.





## калейдоскоп

Есть у меня шестерка слуг,  
Проворных, удалых.  
И все, что вижу я вокруг,—  
Все знаю я от них,  
Они по знаку моему  
Являются в нужде.  
Зовут их: Как и Почему,  
Кто, Что, Когда и Где.  
...Но у меня есть милый друг,  
Особа юных лет.  
Ей служат сотни тысяч слуг,—  
И всем покоя нет!  
Она гоняет, как собак,  
В ненастье, дождь и тьму  
Пять тысяч Где, семь тысяч Как,  
Сто тысяч Почему!

*Р. Киплинг*



Почему море начинает замерзать от берегов? Как происходит замерзание морской воды? Почему молодой морской лед настолько эластичен, что может изгибаться на волнах? Почему в открытом море образуется твердый полярный лед (паковый лед)? Почему вода, получаемая при таянии многолетнего полярного льда, пригодна для питья? Обилие вопросов указывает на то, что замерзание морской воды — совсем не такой простой процесс, как могло бы показаться на первый взгляд. Причиной тому соленость воды. При выпаривании 1 кг морской воды образуется сухой остаток — 34,5 г солей (в том числе: 23,5 г NaCl, 5 г MgCl<sub>2</sub>, 3,9 г Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Таковы средние данные, полученные для морской воды, взятой вдали от берега.

Заметим, что начиная с XVII в. снаряжались одна за другой полярные экспедиции, перед которыми ставилась задача: пройти под парусами между Гренландией и Шпицбергом к Северному полюсу и затем выйти в Тихий океан.

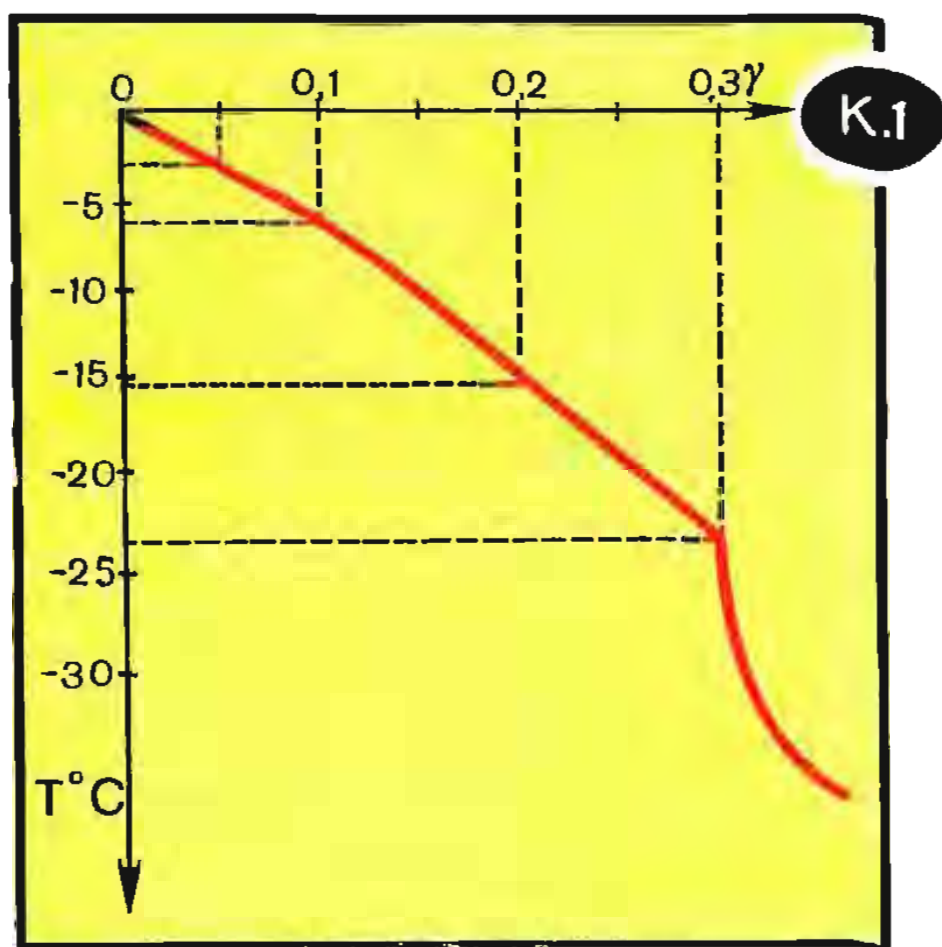
Отважные мореплаватели отправлялись к Северному полюсу в 1607 г. (Г. Гудзон), в 1766 г. (В. Чичагов), в 1773 г. (Д. Фипс), в 1818 г. (Д. Франклин). Все эти экспедиции закончились неудачно — парусники всякий раз застревали во льдах, достигнув примерно 80° северной широты. Сегодня нам представляется безумной идея пройти на парусах через Северный полюс. Можно допустить, что раньше эта идея безумной не казалась. Но почему же в таком случае неудача, постигшая очередную экспедицию, не останавливала подготовку следующей? Да потому, что в те времена господ-

ствовало убеждение, будто прочный лед может образоваться при замерзании лишь пресной воды, а морская вода из-за своей солености не может дать прочного льда. Как полагали, лед, образующийся при замерзании морской воды, должен обязательно быть непрочным, рыхлым. По словам М. В. Ломоносова, такой лед «гибок и судам не вреден», в отдельных случаях он «от ветру в чепуху разбивается». Этим словам предшествовали лабораторные опыты по замораживанию морской воды. На основании проделанных опытов Ломоносов сделал следующий вывод: «...Морская вода даже при самом сильном холоде не замерзает до твердого и чистого льда, но лишь застывает как некое сало, непрозрачное и сохраняющее соленость воды... Крепкий лед не может образоваться в самом море». Вывод этот оказался ошибочным — из морской воды образуется исключительно прочный многолетний полярный лед (паковый лед), при низких температурах он может стать настолько твердым, что о него расплющиваются свинцовые пули; к тому же многолетний полярный лед дает при таянии практически пресную воду (что, кстати сказать, давно знают эскимосы). Однако науке XVII—XIX вв. все это было неизвестно — и поэтому с упорством, достойным лучшего применения, снаряжались экспедиции, заранее обреченные на неудачу.

Современная наука разгадала многие загадки морского льда и, в частности, объяснила, с чем была связана ошибка М. В. Ломоносова. Сегодня мы можем дать удовлетворительный ответ на все сформулированные выше вопросы.

Начнем с первого из них — почему море начинает замерзать от берегов? Раньше полагали, что тут дело в пресной воде, которая попадает в прибрежную полосу из устьев рек. Но в действительности дело не только в этом. В отличие от пресной воды, имеющей наибольшую плотность при  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соленая морская вода тем плотнее, чем ниже температура (при заданной степени солености). По этой причине в море на глубоких местах происходит конвекция: охлаждающиеся у поверхности воды слои, становясь более плотными, чем нижние, опускаются вниз, а на смену им поднимается из глубины более теплая вода. На мелком же месте охладившиеся поверхностные слои воды опуститься не могут; им некуда опускаться, и в результате здесь раньше, чем на глубоком месте, образуется лед.

Сам процесс замерзания морской воды оказывается далеко не простым. Здесь весьма важны два момента. Во-первых, температура замерзания соленой воды, или, как обычно говорят, рассола, уменьшается по мере возрастания степени солености (рис. К.1). Когда доля соли  $\gamma$  в рассоле составляет, например, 0,05 (50 г соли в 1 кг рассола), температура замерзания равна  $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При  $\gamma=0,1$  температура замерзания понижается до  $-6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при  $\gamma=0,2$  до  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при  $\gamma=0,3$  до  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Во-вторых, кристаллическая решетка льда может образоваться лишь из атомов кислорода и водорода — она не допускает замены этих атомов какими-либо другими. Отсюда следует, что сами кристаллы льда — это всегда чистый лед, независимо от того, из какой воды он образовался, пресной или соленой. Ну, а

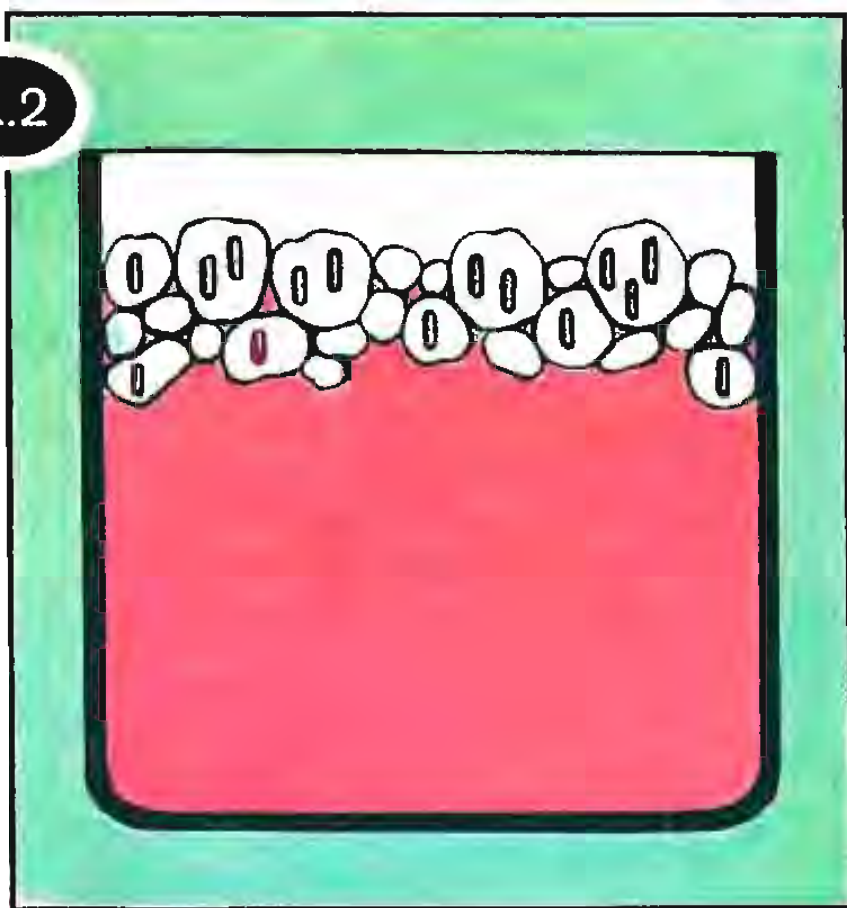


куда же при этом деваются соли? Они остаются в жидком рассоле. На рисунке К.2 схематически показано, как выглядит в лабораторных условиях процесс замерзания морской воды на начальной стадии; синим цветом выделен чистый лед, а красным жидкий рассол. Видно, что куски льда плавают в рассоле и что некоторая часть рассола оказывается «плененной» внутри кусков льда (в кусках льда возникают продолговатые гнезда, заполненные рассолом). Итак, при замерзании рассола лед образуется только из растворителя (чистой воды), а соли концентрируются в жидком рассоле. Обратим внимание на слово «концентрируются». Очевидно, что по мере образования льда концентрация солей в рассоле будет возрастать. А это, в свою очередь, означает, что температура замерзания будет уменьшаться — в результате весь процесс замораживания затормозится.

Предположим, что в помещенной в пробирку пробе воды степень солености  $\gamma$  равна 0,035 (как



К.2



в обычной морской воде). Будем охлаждать исследуемую пробу. Используя график на рисунке К.1, заключаем, что замерзание воды начнется при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$ . Если бы это была пресная вода, то, во-первых, замерзание началось бы при  $0^{\circ}\text{C}$  и, во-вторых, температура пробы  $0^{\circ}\text{C}$  не понизилась бы до тех пор, пока вся она не превратилась бы в лед. Иное дело — соленая вода. Как только в ней начинается процесс кристаллизации, небольшая часть растворителя (чистой воды) превращается в лед — и тут же понижается температура замерзания, что обусловлено повышением концентрации солей в рассоле. Продолжаем охлаждать пробу — в ней все больше образуется кусочков льда, все более соленым становится раствор и, значит, все ниже опускается температура замерзания.

Тому или иному значению температуры пробы морской воды соответствует определенное соотношение масс льда и жидкого рассола (включая рассол в гнездах внутри кусков льда). Процесс за-

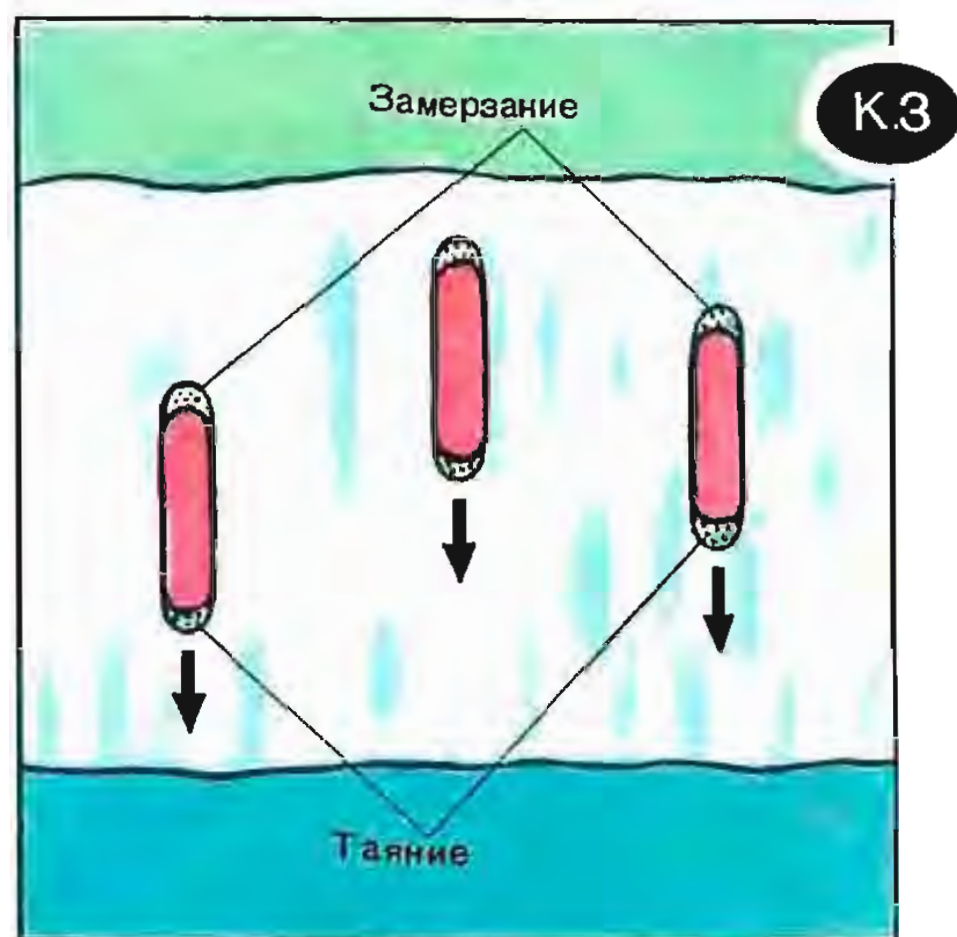
мерзания, как мы уже знаем, начинается при  $-2^{\circ}\text{C}$ . При  $-5^{\circ}\text{C}$  лед будет составлять 57% массы пробы (43% — жидкий рассол). При  $-10^{\circ}\text{C}$  будем иметь 76,5% льда и 23,5% рассола; при  $-20^{\circ}\text{C}$  — 85,2% льда и 14,8% рассола; при  $-30^{\circ}\text{C}$  — 95,6% льда и 4,4% рассола. Внешне проба напоминает сначала суп, а затем (по мере понижения температуры и продолжения процесса замерзания) жидкую кашу, которая будет постепенно все более густеть.

Теперь понятно, почему, проделав подобный опыт, Ломоносов сделал вывод о том, что морская вода не может образовать прочного монолитного льда. На эту же мысль наводили и наблюдения над молодым морским льдом, который иногда, при очень резком и сильном похолодании, вдруг за одну ночь покрывает поверхность моря. Лед этот (в настоящее время его называют *ниласом*) плотно «нашпигован» гнездами с жидким рассолом; поэтому он очень эластичен — его покров подобен резиновому ковру, он *изгибается на морской волне* и крайне непрочен, не выдерживает человека. Поистине такой лед «гибок и судам не вреден», «от ветру в чепуху разбивается».

Но в чем же в таком случае состояла ошибка Ломоносова? — Он не учел двух обстоятельств, не играющих роли, когда морская вода находится в пробирке, но принципиально важных, когда она находится в естественных условиях, т. е. в открытом море. Во-первых, в открытом море концентрация солей в рассоле, в котором начал образовываться лед (*нилас*), *отнюдь не возрастает*. Дело в том, что плотность соленой воды растёт (при данной температуре) с

увеличением ее солености. Поэтому в море одновременно с повышением солености приповерхностных слоев рассола будет происходить *опускание этих слоев в глубину*. На смену им поднимутся глубинные воды, имеющие концентрацию солей, соответствующую исходной. Во-вторых, образовавшиеся внутри льда гнезда рассола с течением времени *перемещаются* в направлении, в котором увеличивается температура, и рано или поздно *выходят наружу* — происходит интереснейшее явление *самоопреснения* морского льда (справедливости ради заметим, что Ломоносову это явление было неизвестно; его открыл в 1820 г. русский капитан Ф. Беллинсгаузен). На рисунке К.3 схематически показано, как осуществляется перемещение гнезда рассола: с той стороны, где температура выше, лед в гнезде подтаивает, а с той стороны, где температура ниже, напротив, намерзает. В результате гнездо в целом смещается в том направлении, в каком возрастает температура. В естественных условиях это есть направление сверху вниз, именно так и перемещаются гнезда рассола. Очевидно, что процесс самоопреснения морского льда одновременно является и процессом его упрочнения. Благодаря этому процессу в открытом море формируются целые поля прочного многолетнего льда, который трудно отличить от льда, образующегося при замерзании пресной воды.

**Почему реки извиваются? Почему на повороте реки один берег, как правило, крутой, а другой — пологий? Почему у крутого берега глубоко, а у пологого мелко? Из-**



вивы рек не следует объяснять только рельефом местности. Главная причина здесь иная. Вообразим реку, текущую прямолинейно по совершенно ровной местности в достаточно однородном грунте. Легко сообразить, что даже в таких вполне идеальных условиях прямое направление реки будет *неустойчивым*. Пусть вследствие каких-либо причин, например небольшой неоднородности грунта, где-то вдоль течения образовался незначительный изгиб (рис. К.4, а). Выровняет ли река это случайно возникшее искривление русла? Оказывается, что не только не выровняет, а, наоборот, еще более увеличит. Это нетрудно объяснить. Возникновение случайного искривления русла означает, что в данном месте водная масса движется уже не прямолинейно, а по некоторой дуге. Значит, на массу воды действует центростремительная сила; это есть сила, с которой действует на воду берег А. По третьему закону Ньютона, с такой же по модулю силой будет действовать вода на берег А; в резуль-



тате берег начнет подмываться и разрушаться — *искривление русла реки будет увеличиваться* (рис. К.4,б). Подмываемый берег реки будет становиться *круче*, тогда как противоположный берег, от которого река будет постепенно отступать, окажется *пологим*. Нетрудно объяснить также, почему река более глубока около крутого берега. Из рисунка К.4,в видно, что частицы воды вблизи крутого берега проходят на повороте реки более длинный путь (он показан красной линией), нежели вблизи пологого берега (см. синюю линию). Значит, у крутого берега скорость воды больше, чем у пологого. Чем выше скорость воды, тем больше вымываемая ею масса грунта. Вымывая вблизи крутого берега больше грунта, река тем самым углубляет свое русло именно у этого берега.

Приведенные рассуждения в общих чертах верны. Однако они слишком упрощены — здесь не учитывается принципиально важный момент: *возникновение циркуляций воды в вертикальной плоскости*. Поэтому проведем более строгое рассмотрение, для чего обратимся к стакану с чаем. Будем размешивать чай ложкой так, чтобы вода с чайинками пришла во вращательное движение. При этом поверхность воды в стакане принимает изогнутую форму (рис. К.5,а). После того как мы вынем из стакана ложку, вода постепенно успокоится; при этом чайинки соберутся в центре дна стакана. Попробуем объяснить оба наблюдаемых эффекта — искривление поверхности вращающейся воды и собирание чайинок в центре дна.

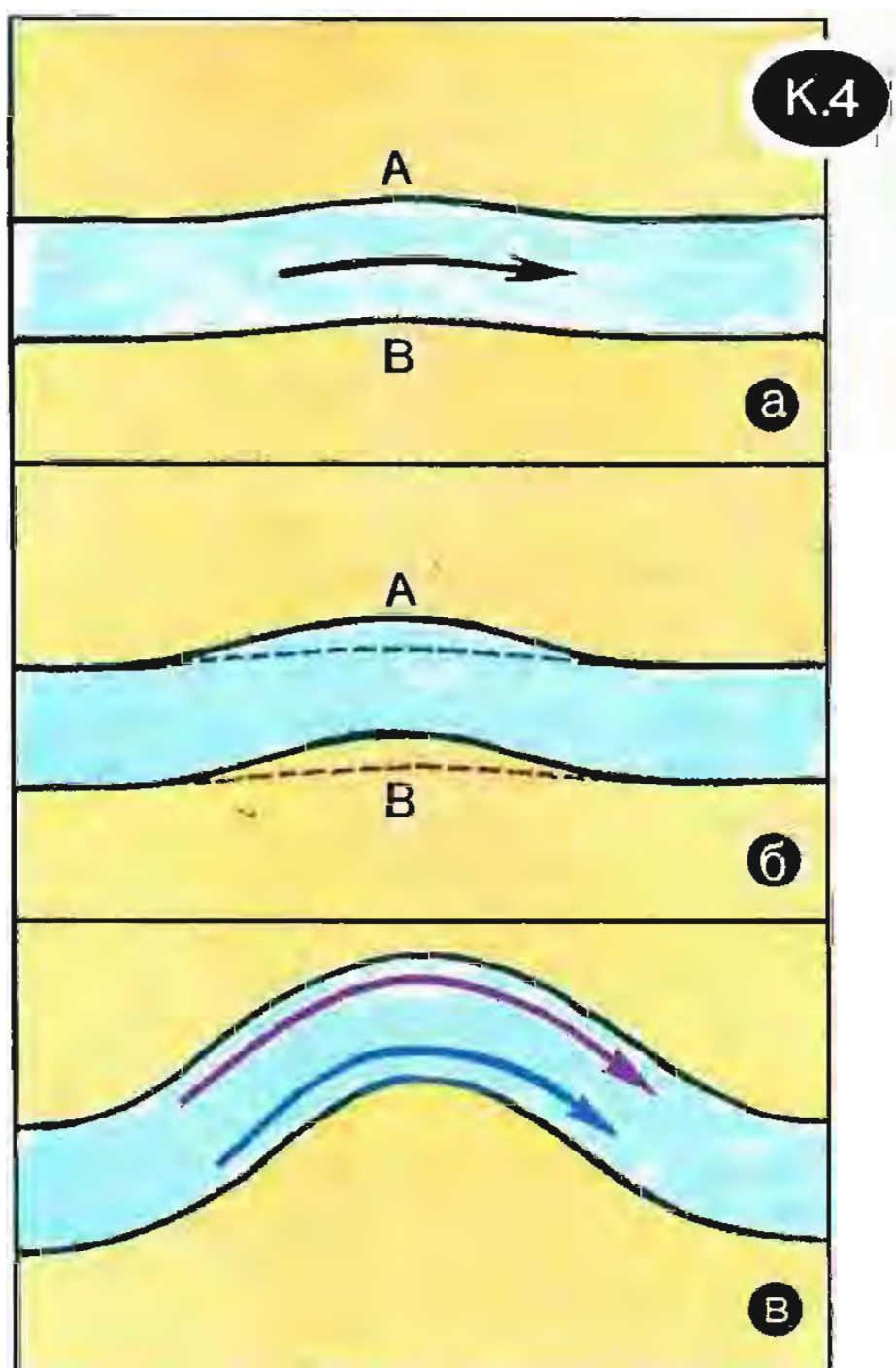
Мысленно выделим в воде, вращающейся с угловой ско-

ростью  $\omega$ , маленький кубический объем массой  $m$  на расстоянии  $R$  от оси вращения. Центробежное ускорение  $\omega^2 R$  рассматриваемого кубика обеспечивается силой  $(p_1 - p_2)s$ , где  $s$  — площадь грани кубика, а  $p_1$  и  $p_2$  — давления на противоположные боковые грани. Величина  $p_1 - p_2$  определяется разностью расстояний  $h_1$  и  $h_2$  от центра соответствующей грани кубика до поверхности воды. Все это показано на рисунке К.5,а. Заметим, что

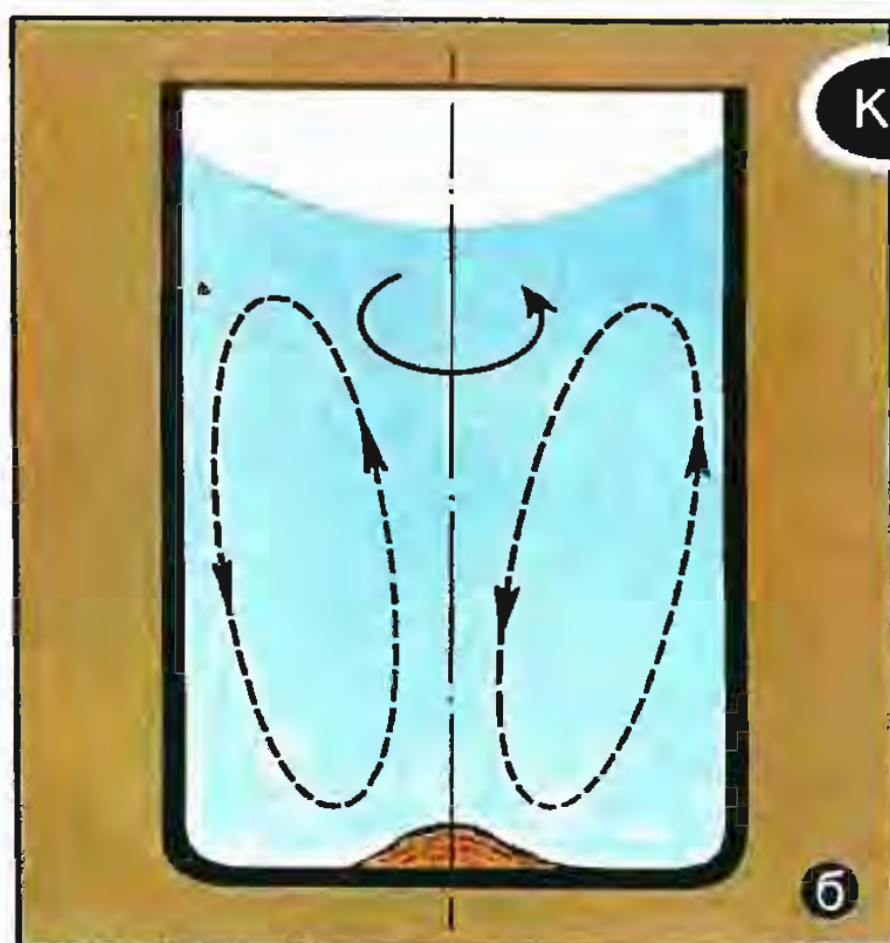
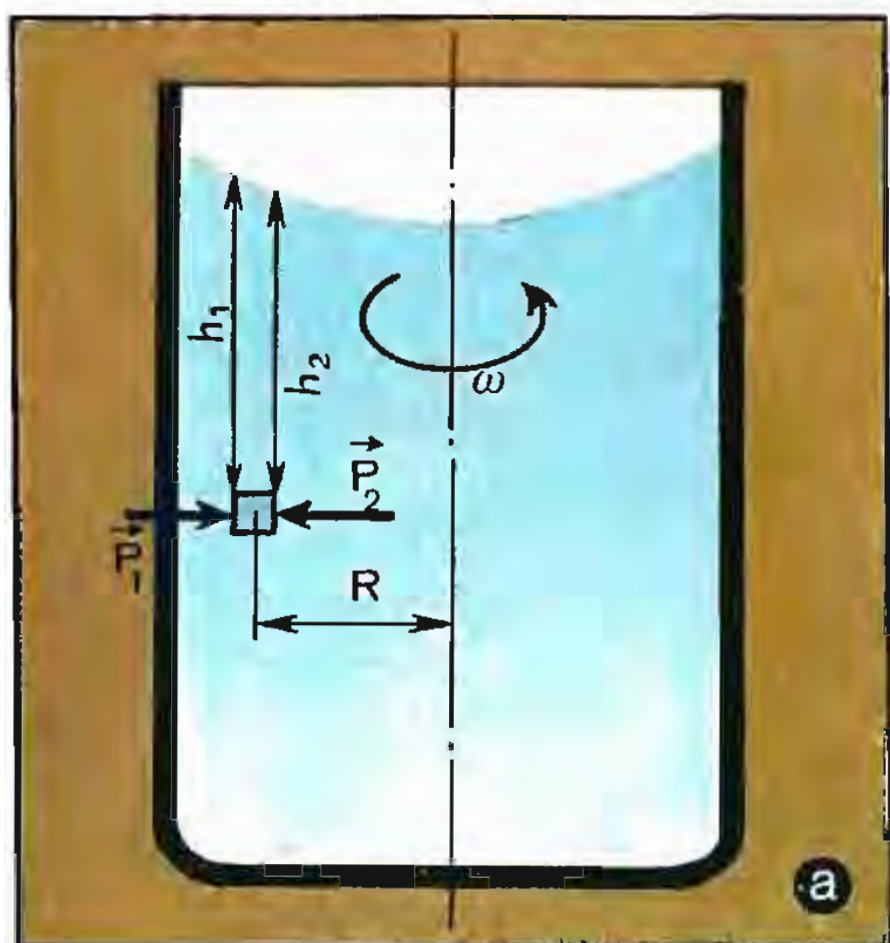
$$p_1 - p_2 = \rho g (h_1 - h_2),$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $g$  — ускорение свободного падения. Учитывая, что

$$m\omega^2 R = (p_1 - p_2)s,$$







К.5

получаем отсюда

$$m\omega^2 R = \rho g s (h_1 - h_2).$$

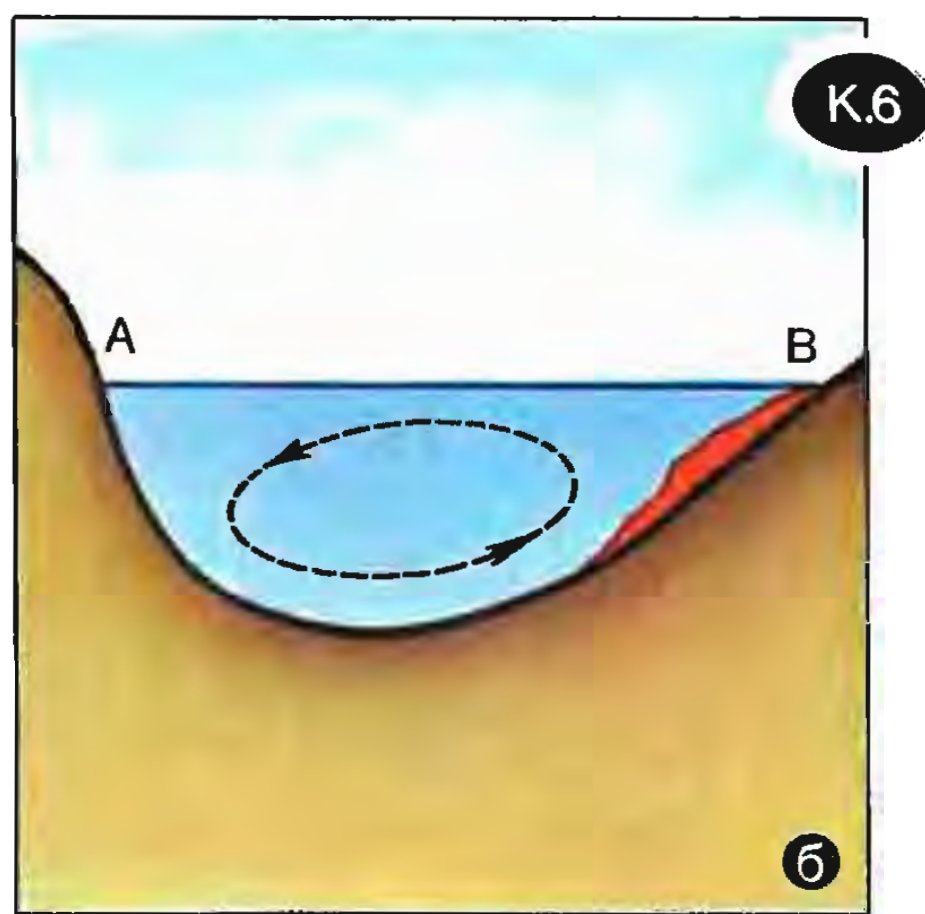
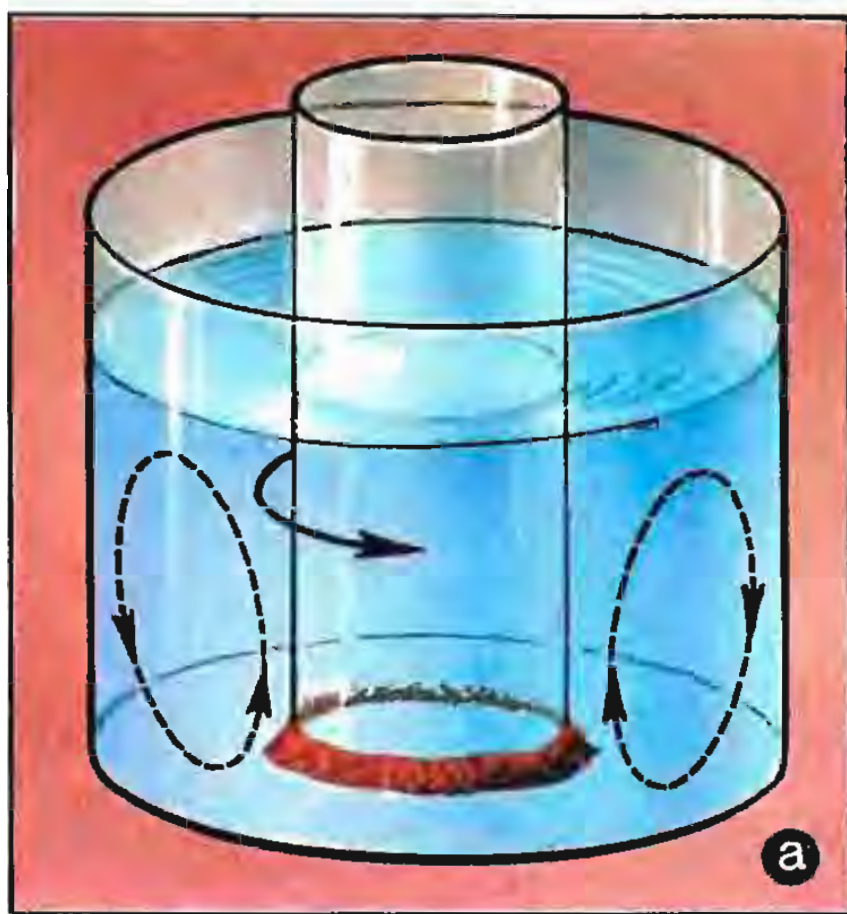
Видно, что при  $h_1 = h_2$  угловая скорость  $\omega$  равна нулю; иначе говоря, движение кубика воды по окружности (вращение воды в стакане) было бы невозможно без искривления поверхности воды. Чем больше  $R$ , тем больше разность  $h_1 - h_2$ , тем быстрее происходит подъем уровня поверхности воды при удалении от оси вращения.

Далее учтем, что в действительности движение частиц воды во вращающейся внутри стакана водной массе оказывается более сложным. Одновременно с движением вокруг оси вращения частицы воды перемещаются в вертикальной плоскости, проходящей через эту ось. Усложнение движения связано с трением воды о стенки и дно стакана, а также с трением между слоями воды. Упрощенно поясним это следующим образом. Рассмотрим три частицы воды, находящиеся на одинаковом расстоянии от оси вращения, но на разных расстояниях

от дна (рис. К.5,б). Чем ближе к дну, тем трение сильнее тормозит движение частицы, тем меньше ее скорость. В то же время разность сил бокового давления, действующих на рассматриваемые частицы, одна и та же. Ясно, что эта разность сил уже не может обеспечить по всей глубине необходимое центростремительное ускорение. Предположим, что она обеспечивает его для средней частицы; значит, только эта частица будет двигаться по окружности. Верхняя же частица будет отбрасываться от оси вращения, а нижняя, наоборот, будет под действием разности сил бокового давления устремляться к оси вращения. В результате, как это видно из рисунка К.5,б, должна возникнуть циркуляция частиц воды в вертикальной плоскости (штриховые линии на рисунке). Эта циркуляция как раз и приводит к тому, что чайники собираются в центре дна стакана.

Все это хорошо, может заметить читатель, но какое отношение имеет вращение воды в стака-





не к движению воды в реке? Оказывается, самое непосредственное. Рассмотрим нехитрое устройство, изображенное на рисунке К.6,а. Внутри широкой стеклянной банки поставим стакан, вода заполнит пространство между стенками банки и стакана. С помощью ложки приведем во вращение воду с находящимися в ней чайинками — и вот перед нами упрощенная модель реки, текущей по изогнутому руслу. То, что наша «река» течет по руслу, свернутому в окружность, в данном случае неприципиально. Вполне очевидно, что результаты, полученные в опыте со стаканом чая, справедливы также и для нашей «реки». Мы имеем в виду искривление поверхности воды, а главное, возникновение циркуляции воды, которая заставит чайинки собраться на дне у стенки внутреннего стакана (в чем нетрудно убедиться воочию).

Наконец, сделаем последний шаг: перейдем к настоящей реке (рис. К.6,б). На рисунке дано поперечное сечение русла реки, совершающей поворот. Искривление

поверхности воды имеется, но оно незаметно. Центр поворота находится справа, поэтому крутой берег, обозначенный на рисунке буквой А, будем называть дальним, а пологий берег В — ближним (имея в виду удаление берега от центра поворота). Мы видим на рисунке уже знакомую нам циркуляцию воды. Именно она подмывает дальний берег и способствует отложению грунта у ближнего берега. Последнее совершенно аналогично скапливанию чайнок у стенки внутреннего стакана в опыте на рисунке К.6,а (или скапливанию их в центре дна стакана в самом первом опыте). Рассматриваемая циркуляция воды объясняет не только постепенное перемещение русла реки в направлении от ближнего берега к дальнему (т. е. постепенное усиление искривления речного русла), но и увеличение глубины реки у дальнего берега с одновременным постепенным уменьшением ее у ближнего.

Итак, подчеркнем еще раз: *прямолинейное течение реки не-*

устойчиво — случайно возникшее искривление речного русла будет, согласно законам физики, не сглаживаться, а, напротив, все более усиливаться. В итоге русло реки оказывается чередованием изгибов то в ту, то в другую сторону — река извивается подобно ползущей змее, или, как обычно говорят, петляет.

Периодические изгибы извивающегося русла реки, равно как и периодические изгибы океанского течения, ледника, ручья на поверхности ледника и т. п., называют *меандрами*. Вместо «извивы рек» или «периодические изгибы рек» говорят «меандры рек». Данный термин происходит от древнегреческого названия Меандр — одной из рек в Турции; русло этой реки отличается особенно сильными изгибами. Ее современное название — Большой Мендерес.

### **Почему в озеро втекает много рек, а вытекать может только одна?**

Прежде всего, заметим, что существуют озера, из которых не вытекает ни одной реки — их называют бессточными. К ним относятся, например, озера Балхаш и Иссык-Куль в СССР, озеро Чад в Африке, озеро Ван в Турции. Бессточными являются также Каспийское и Аральское моря.

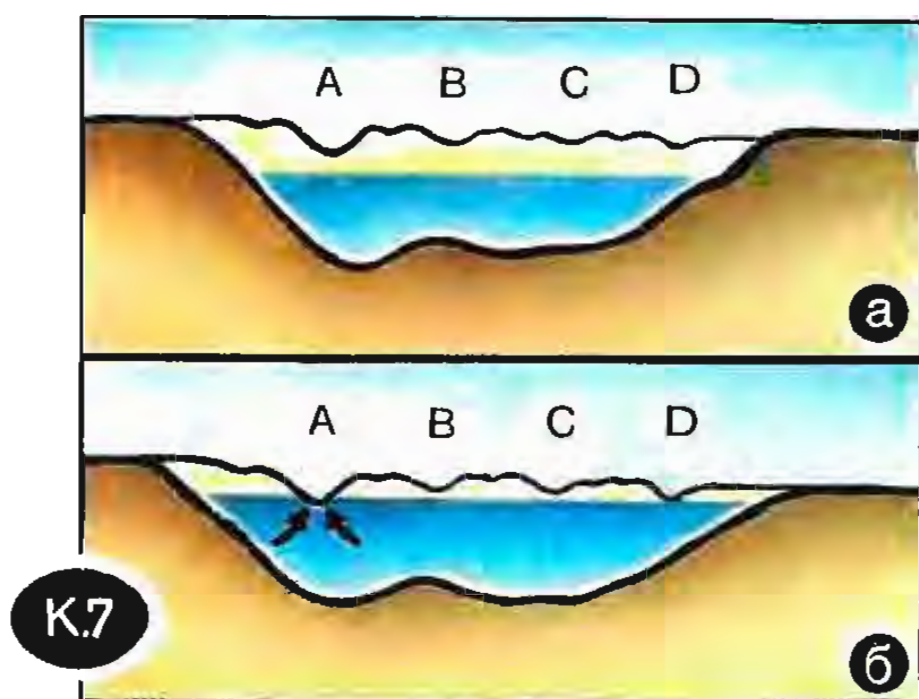
Любопытно, что если из озера вытекает река, то практически всегда одна. Количество втекающих в озеро рек может быть каким угодно, но вытекает только одна. В Байкал втекает 336 рек, а вытекает только Ангара. Вот небольшой перечень озер в СССР, имеющих сток. Из каждого вытекает только одна река: из Ладожского озера вытекает Нева, из Онежского озера — Свирь, из озе-

ра Ильмень — Волхов, из Чудского — Нарва, из озера Зайсан — Иртыш, из озера Ханка — Сунгача (приток Уссури). Великие озера в США и Канаде (Верхнее озеро, Гурон, Мичиган, Эри, Онтарио) имеют сток по единственной реке — Святого Лаврентия. В Канаде из Большого Невольничьего озера вытекает река Маккензи, а из озера Виннипег — река Нельсон.

Тот факт, что из озера может вытекать только одна река, нетрудно объяснить, обратившись к рисунку К.7, где дан вертикальный разрез через ложе некоторого озера и изображен рельеф берега. В ситуации, представленной на рисунке К.7,а, запас воды в озере сравнительно невелик, так что стока вод из озера не происходит. Предположим, что в озеро поступает больше воды, нежели испаряется с его поверхности, — в этом случае уровень воды в нем постепенно будет повышаться. Когда уровень воды достигнет уровня наиболее глубокого из возможных (при данном береговом рельефе) стоков, образуется река, вытекающая из озера. На рисунке К.7,б эта река вытекает через сток А. Как только начался сток воды из озера, дальнейшее повышение уровня воды в нем прекращается — весь избыток поступающей в озеро воды будет уходить через функционирующий сток. В результате все остальные потенциальные стоки (например, стоки В, С, D на рисунке К.7,б) так и остаются бездействующими — уровень воды в озере просто не поднимается до их уровня.

Ну а если приток воды в озеро оказывается настолько большим, что один сток не справляется с избытком воды? В этом случае уровень воды в озере будет про-





должать подниматься и, возможно, достигнет уровня, скажем, стока *B* (см. рисунок). Тогда из озера станут вытекать уже не одна, а две реки. Однако такая ситуация *редкая*, а главное — она оказывается *неустойчивой*; причем это возможно лишь для молодых (недавно образовавшихся) озер. Со временем русло, по которому проходит большой поток и где скорость воды больше, будет сильнее размываться: сток воды по этому руслу возрастет. В результате уровень воды в озере понизится, и сток по мелкой реке сначала уменьшится, а потом и вовсе прекратится. В конечном счете всегда «выживает» только самая глубокая из вытекающих рек.

Почему деревья не растут до неба? Почему особенно крупные животные не бывают грациозными? Почему на суше нет животных крупнее слона? Почему самые крупные животные сохранились в море? Почему не встречаются млекопитающие размером с муху? Почему слон флегматичен, а мышь, напротив, очень подвижна? Вряд ли кто из читате-

лей книги задумывался над подобными вопросами. А между тем вопросы эти позволяют продемонстрировать важность законов физики в живой природе.

Известно, что высота деревьев зависит от многих факторов: породы, возраста, характера почвы, степени затененности данного места, климатических условий. Тем не менее она *не может быть* сколь угодно большой. Наибольшая высота многих пород деревьев 20...25 м. В отдельных случаях она доходит до 30...40 м. Самыми высокими деревьями являются эвкалипты — их высота достигает 100 м. Но это уже предел — выше деревья не растут.

Как утверждает немецкая поговорка, «природа позаботилась, чтобы деревья не росли до неба». Чрезмерно высокое дерево не выдержит собственной тяжести. Предположим, что размеры дерева (высота и диаметр ствола) вдруг увеличились в  $n$  раз. При этом объем, а значит, и масса дерева возрастут в  $n^3$  раз. В то же время площадь основания ствола, принимающая на себя тяжесть дерева, увеличится только в  $n^2$  раз. Следовательно, нагрузка на единицу площади сечения ствола возрастет в  $n$  раз (нагрузка — это давление, оно равно  $Mg/s$ , где  $M$  — масса дерева,  $s$  — площадь основания ствола,  $g$  — ускорение свободного падения). При высоте дерева около 50 м и плотности  $0,6 \text{ г/см}^3$  на квадратный сантиметр основания будет давить примерно 30 Н. Представьте себе, что на стоящую вертикально обычную деревянную катушку из-под ниток поставлена трехкилограммовая гиря — такова эта нагрузка. При увеличении всех размеров дерева, например, в 100 раз на катушке

оказалась бы уже трехсоткилограммовая гиря; очевидно, что такая гиря попросту раздавит катушку своей тяжестью.

Есть еще одно (и при том более жесткое) ограничение наибольшей возможной высоты дерева: высота должна быть такой, чтобы соки могли подняться по стволу вплоть до самых верхних веток. Подниматься вверх заставляет соки осмотическое давление. Физическую природу этого давления мы подробно рассмотрим позднее, а пока заметим лишь, что оно составляет примерно 0,1...1 МПа, т. е. 1...10 атм. Как известно, под таким давлением вода поднимается на высоту 10...100 м,— вот и оценка максимально возможных значений высоты деревьев.

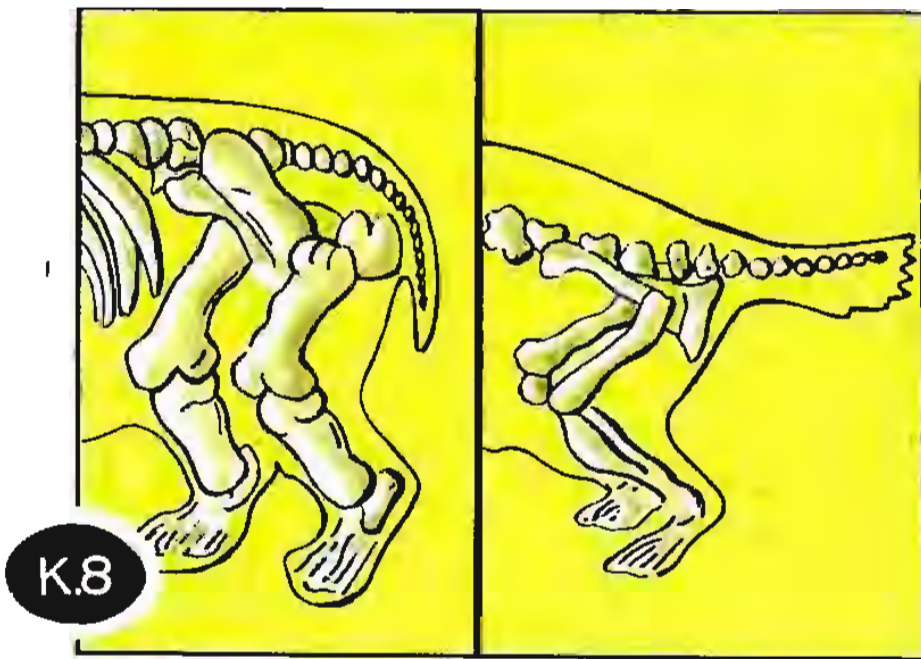
Теперь перейдем к животным. Возьмем в качестве примера бегемота и мелкого грызуна лемминга. Наружные формы тела этих млекопитающих примерно одинаковы, так что в некотором смысле можно, казалось бы, рассматривать бегемота как увеличенного в 25 раз лемминга — этакого Гулливера в стране лилипутов-леммингов. Однако даже с чисто механической точки зрения такое рассмотрение неправомерно. Взгляните на рисунок К.8, где изображены скелеты бегемота (слева) и лемминга (справа), приведенные для удобства сравнения к одинаковым размерам. Хорошо видно, что в строении скелета животных пропорции не сохраняются. У лемминга относительно тонкие кости, тогда как скелет бегемота отличается массивностью — мощные толстые кости ног, мощный позвоночник. Глядя на скелеты, можно догадаться, что лемминг проворен и грациозен, а бегемот, напротив,

неуклюж и неповоротлив. Получается, что количественные изменения (изменения размеров тела животных) потребовали изменений качественных — *иных пропорций скелета и иного характера поведения животного.*

Все это легко объяснить. Если размеры бегемота в  $n=25$  раз больше размеров лемминга (длина бегемота 5 м, а длина лемминга всего 20 см), то масса бегемота будет в  $n^3=15\,625$  раз больше массы лемминга. Предположив пропорциональность в строении скелетов этих животных, мы должны были бы заключить, что площадь поперечного сечения костей ног у бегемота только в  $n^2=625$  раз больше, чем у лемминга. Но в таком случае кости бегемота испытывали бы в  $n=25$  раз более высокую нагрузку (давление). Естественно принять, что у бегемота прочность костей примерно такая же, как у лемминга, и что, следовательно, они рассчитаны на такое же давление. Отсюда немедленно следует вывод: площадь сечения костей бегемота не в  $n^2$ , а в  $n^3$  раз больше. Таким образом, при переходе от лемминга к бегемоту длина каждой кости возрастает в  $n=25$  раз, а ее толщина в  $\sqrt{n^3}=125$  раз; иными словами, отношение длины кости к ее диаметру не сохраняется, а уменьшается (в 5 раз) — кости и весь скелет в целом становятся значительно массивнее, что и демонстрирует рисунок К.8.

Выходит, может заметить читатель, что в своих замечательных книгах о путешествиях Гулливера к лилипутам или великанам Свифт погрешил против физики? Да, погрешил. Его великаны в 12 раз больше нормального человека. По законам физики, человекоподобное существо высотой более 20 м





должно было бы иметь столь массивный скелет, что, по всей вероятности, оно попросту сломалось бы под его тяжестью. Здесь уместно привести следующую мысль, высказанную в XVII в. (еще до рождения Свифта). Она принадлежит Галилею. «...Тот, кто пожелал бы сохранить в огромном великане пропорции обыкновенного человеческого тела,— заметил ученый,— должен был бы найти для построения костей какое-либо иное, более прочное вещество, или же должен был бы примириться с тем, чтобы большое тело обладало крепостью сравнительно меньшей, чем тело человека обычной величины. Увеличение размеров до чрезвычайной величины имело бы следствием то, что тело было бы раздавлено и сломано тяжестью своего собственного веса». Галилей делает совершенно правильный вывод: «Достигнуть чрезвычайной величины животные могли бы только в том случае, если бы кости их изменились, существенно увеличившись в толщину, отчего животные по строению и виду производили бы впечатление чрезвычайной толщины». Любопытно, что этот вывод был предвосхищен итальянским поэтом XVI в. Ариосто. В его поэме

«Неистовый Роланд» есть такие строки, относящиеся к великану:

Огромный рост его так члены утолщает,  
Что вид чудовища они ему дают.

Итак, животное огромных размеров неизбежно должно быть толстым и неповоротливым. В борьбе за существование такое животное имеет некоторые преимущества перед мелкими животными— оно может их одолеть в схватке или просто отпугнуть своим устрашающим видом. Однако большие размеры тела имеют и принципиальные неудобства. Потребность в пище растет пропорционально объему тела, а в то же время возможность ее добывания при этом уменьшается (вследствие понижения подвижности). Мы видим, таким образом, что законы механики определяют некоторый предел размерам животных. Их массивность и неповоротливость приводят к тому, что начиная с некоторой величины животного, его потребность в пище становится больше способности к ее добыванию,— такой вид обрекается на вымирание. Когда-то на Земле обитали исполинские пресмыкающиеся. Они оказались нежизнеспособными и в конечном счете вымерли. Сегодня среди сухопутных животных наиболее крупными являются слоны.

Заметим, что в море физические условия существования иные, чем на суше. Сила тяжести уравновешивается там выталкивающей силой. Поэтому неудивительно, что в морях много крупных животных и рыб. При менее массивном скелете кит имеет более значительные размеры, нежели слон или бегемот.

Предвидим возникновение у читателя одного вопроса. Возмож-

но, он появился еще тогда, когда мы критиковали Свифта. Понятно, что великаны у Свифта должны быть нежизнеспособными. А как лилипуты? Имеются ли у физики возражения против лилипутов?

Имеются. С точки зрения законов механики здесь все в порядке. Возражения возникают, если мы обратимся к вопросам теплообмена.

Что отличает млекопитающих и птиц от других живых существ? То, что температура тела у них *практически постоянна*, не зависит от колебаний температуры окружающей среды и может быть значительно выше этой температуры. Недаром млекопитающих и птиц называют теплокровными — в отличие от холоднокровных, у которых температура тела лишь немного выше температуры среды и изменяется вместе с ней. Нормальная температура тела человека около  $37^\circ\text{C}$ , у слона температура  $35^\circ\text{C}$ , у собаки  $39^\circ\text{C}$ ; температура птиц в среднем равна  $42^\circ\text{C}$ . Постоянство температуры тела теплокровных обеспечивается совместным действием механизмов нагревания и охлаждения организма. Различные превращения энергии в организме (например, превращения, связанные с пищеварением, дыханием или мышечной деятельностью) приводят к выделению теплоты, т. е. к *нагреванию*. Процессы теплоотдачи в окружающую среду приводят, очевидно, к *охлаждению*. Если у нас в теле выделяется излишняя теплота, мы потеем — иначе говоря, включаем дополнительный механизм охлаждения.

Сделанные замечания позволяют обсудить вопрос о существовании наименьших возможных размеров млекопитающих. Пусть  $l$  —

размеры тела животного, а  $q$  — некоторая величина, характеризующая интенсивность протекания у него обмена веществ (например, чем больше отношение объема воздуха, вдыхаемого в единицу времени, к объему тела, тем, следовательно, интенсивнее протекает обмен веществ, тем больше  $q$ ). Выделяющаяся в теле животного в единицу времени теплота  $Q$  пропорциональна объему тела и величине  $q$ :

$$Q \sim l^3 q. \quad (\text{К } 1)$$

Теплоотдача будет происходить тем интенсивнее, чем больше площадь поверхности тела (она пропорциональна  $l^2$ ), чем больше разность температур  $\Delta T$  тела животного и окружающей среды и чем хуже теплоизоляционные свойства покрова тела. Таким образом, для теплоты  $Q'$ , отдаваемой животным в окружающую среду в единицу времени, можем записать

$$Q' \sim l^2 \Delta T / \xi, \quad (\text{К } 2)$$

где через  $\xi$  обозначена некоторая величина, характеризующая теплоизоляционные свойства покрова тела (чем лучше теплоизоляция, тем больше  $\xi$ ). Из (К1) и (К2) следует, что

$$\frac{Q'}{Q} \sim \frac{\Delta T}{l q \xi}. \quad (\text{К } 3)$$

Температура тела у всех млекопитающих практически одинакова, поэтому перепишем (К3) в более простом виде:

$$\frac{Q'}{Q} \sim \frac{1}{l q \xi}. \quad (\text{К } 4)$$

Обсудим полученный результат. Предположим, что размеры животного *уменьшаются*. Чтобы при этом не произошло увеличения отношения  $Q'/Q$ , необходимо



скомпенсировать уменьшение размеров возрастанием величин  $q$  и  $\xi$ , т. е. усилением обмена веществ и повышением теплоизоляции тела. Именно по такому пути и пошла природа. Сравним лошадь и обычную полевую мышь, благо они живут в одном и том же климатическом поясе. Лошадь — очень спокойное (в обычных ситуациях) животное, тогда как мышь *все время в движении*, она все время мечется, суетится. Лошадь за минуту вдыхает объем воздуха, составляющий менее сотой доли объема тела, тогда как объем воздуха, вдыхаемого за минуту мышью, превышает объем ее тела. Все это указывает на то, что в теле мыши обмен веществ происходит *намного интенсивнее*, чем в теле лошади. К тому же у мыши более эффективен шерстяной покров, а значит, и лучше теплоизоляция.

Итак, *уменьшение размеров тела у теплокровных животных природа компенсирует усилением обмена веществ и улучшением теплоизоляции*. Очевидно, что возможности подобной компенсации не беспредельны, рано или поздно они окажутся *исчерпанными*, — и тогда дальнейшее уменьшение размеров тела теплокровных станет недопустимым. Вот почему можно говорить о самом маленьком сухопутном млекопитающем. Им является мышь землеройка; длина ее тела 3...5 см, масса от 2 до 10 г. Заметим, что в море теплоотдача существенно лучше, поэтому немногие живущие в воде млекопитающие имеют относительно большие размеры.

Мы обсудили результат (К4) с точки зрения уменьшения размеров животных. Можно было бы проанализировать также возраста-

ние размеров. Если чрезмерно мелкие млекопитающие не в состоянии себя обогреть, то чрезмерно крупные будут, очевидно, слишком сильно потеть, будучи не в состоянии себя охладить. Очень мелким животным угрожает смерть от холода, а очень крупным от теплового удара. Однако практически теплового удара опасаться не приходится: при возрастании размеров животных, прежде чем наступит перегрев организма, произойдет недопустимое возрастание механических нагрузок на организм. Таким образом, *сверху размеры животных ограничены законами механики, а снизу законами теплофизики*. Существенно, что нижнее ограничение касается лишь теплокровных животных.

В заключение вернемся еще раз к лилипутам Свифта. Учитывая сказанное выше, мы приходим к выводу, что люди ростом немного больше 10 см вряд ли могли бы существовать. Во всяком случае им приходилось бы очень часто дышать, непрерывно питаться, все время находиться в быстром движении и при этом кутаться в теплые одежды. Так что для человеческого организма существующие размеры являются не только оптимальными, но и, по сути дела, единственно возможными. Великаны и лилипуты, равно как и всевозможные гномы, дюймовочки и мальчики с пальчик, — все они могут быть только сказочными персонажами.

**Почему так прочна скорлупа куриного яйца? Почему стебель злаков (соломина) внутри пустой? Почему кости так прочны и в то же время относительно легки? По-**

чему у некоторых растений листья имеют складчатую форму? Вот уже много лет строители внимательно изучают конструкции, встречающиеся в живой природе. Поражает сочетание прочности и легкости, характерное для этих конструкций.

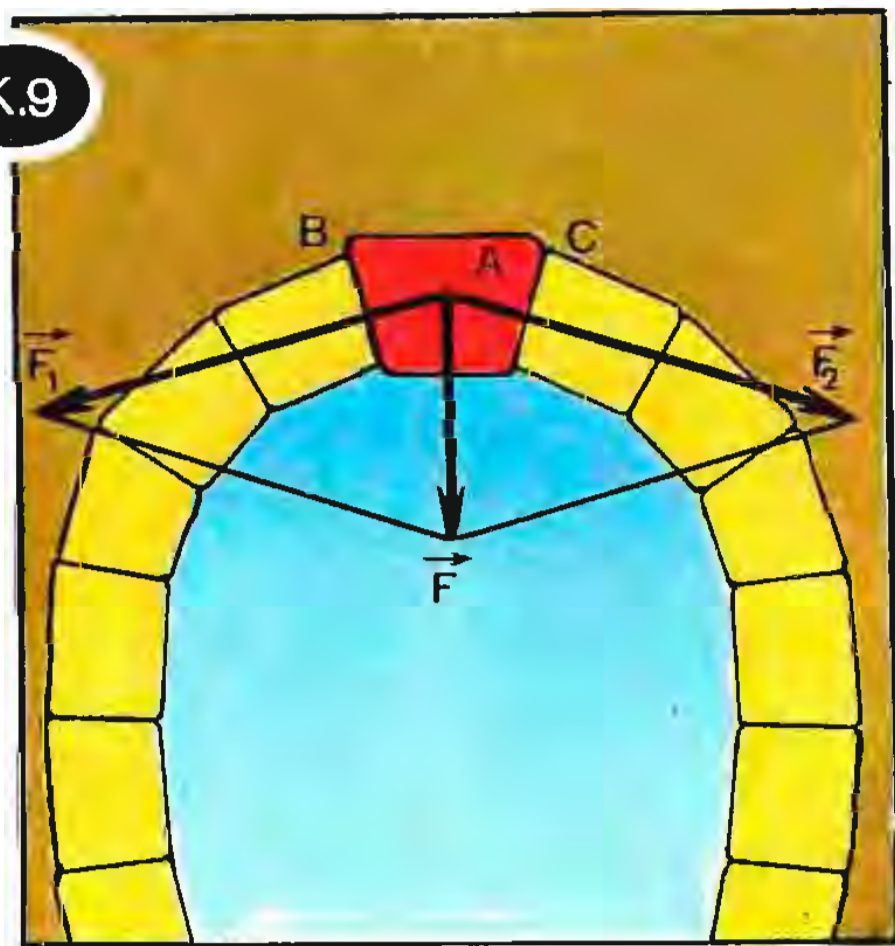
Возьмем скорлупу обыкновенного куриного яйца. Несмотря на очень малую толщину (примерно 0,3 мм) скорлупа очень прочна. Каждый может при желании убедиться, что не так-то легко раздавить яйцо между ладонями, напирая на его концы. Основная причина прочности скорлупы — ее геометрическая форма, при которой усилие, приложенное снаружи в какой-либо точке, передается на всю поверхность. Это можно пояснить при помощи рисунка К.9, где изображена арка, сложенная из камней; форма арки напоминает форму яичной скорлупы в разрезе. Пусть на верхний камень  $A$  действует сила  $F$ , направленная вертикально вниз. Под действием данной силы камень  $A$  не сдвинется вниз, а лишь силь-

нее прижмется к соседним камням  $B$  и  $C$ ; выполненное на рисунке разложение силы  $F$  показывает, что камень  $A$  будет давить на боковые стенки камней  $B$  и  $C$  силами  $F_1$  и  $F_2$ . В свою очередь, камни  $B$  и  $C$  передадут давление на другие камни. Поэтому силе, давящей на арку с внешней стороны, довольно трудно разрушить все сооружение. Зато относительно легко разрушить арку силой, действующей не сверху, а снизу (с внутренней стороны). Недаром яйцо прекрасно выдерживает тяжесть тела курицы-наседки и в то же время легко разрушается, когда клювик слабого птенчика ударяет по скорлупе изнутри.

С точки зрения физики и химии скорлупа куриного яйца — удивительный объект. Она состоит из семи слоев, каждый из которых выполняет свою определенную функцию. Слои не расслаиваются даже при резких изменениях температуры и влажности: перед нами яркий пример совместимости материалов с различными физико-механическими свойствами. Тонкая пленка с внутренней стороны скорлупы повышает ее прочность.

Куриное яйцо — отнюдь не единственный пример прочной природной оболочки. Сюда следует отнести яйца других птиц (а также земноводных), твердую оболочку орехов, панцири черепах, крабов, морских ежей, раковины моллюсков. Все они имеют плавно изогнутую, выпуклую форму, хорошо противостоящую всевозможным внешним воздействиям.

Стебель тростника достигает высоты трех метров; при этом диаметр его в нижней части составляет всего 15 мм. Таким образом, отношение диаметра стебля к высоте равна  $1/200$ . У стебля





ржи это отношение еще меньше: 1/500. А между тем стебель несет на своей верхушке еще и груз (колос), масса которого может быть в 1,5 раза больше, чем масса самого стебля. Все это свидетельствует о *необычной прочности и устойчивости стеблей*. Сильная буря может вырвать с корнем дерево, но она лишь пригибает к земле тонкий стебель злака.

Надо признаться, что прочность и устойчивость злаковых стеблей до сих пор полностью не объяснена. Определенную роль играет в данном случае *пустотелость* стебля. Ведь при изгибе внутренняя область стебля (если бы она была заполнена) все равно не деформировалась бы, или, как говорят специалисты, не работала бы. В то же время заполняющее эту область вещество увеличивало бы общую массу стебля, что повышало бы изгибающие и сжимающие силы. Значит, с точки зрения сопротивляемости нагрузкам *полый длинный цилиндр* оказывается лучше *сплошного цилиндра*.

Далее надо учесть, что в целом стебель представляет собой не один, а *несколько полых цилиндров*, поставленных друг на друга; соединяющие эти цилиндры узлы представляют собой особо устроенные *упругие шары-демпферы*, благодаря которым стебель в целом оказывается довольно гибким сооружением. На рисунке К.10 показана верхняя часть стебля пшеницы. Цифрами 1, 2, 3 помечены три шаровидных узла, обеспечивающих гибкость стебля. От узла 1 кверху идет колос; от остальных узлов начинаются листья.

Задумывались ли вы над удивительной прочностью костей жи-

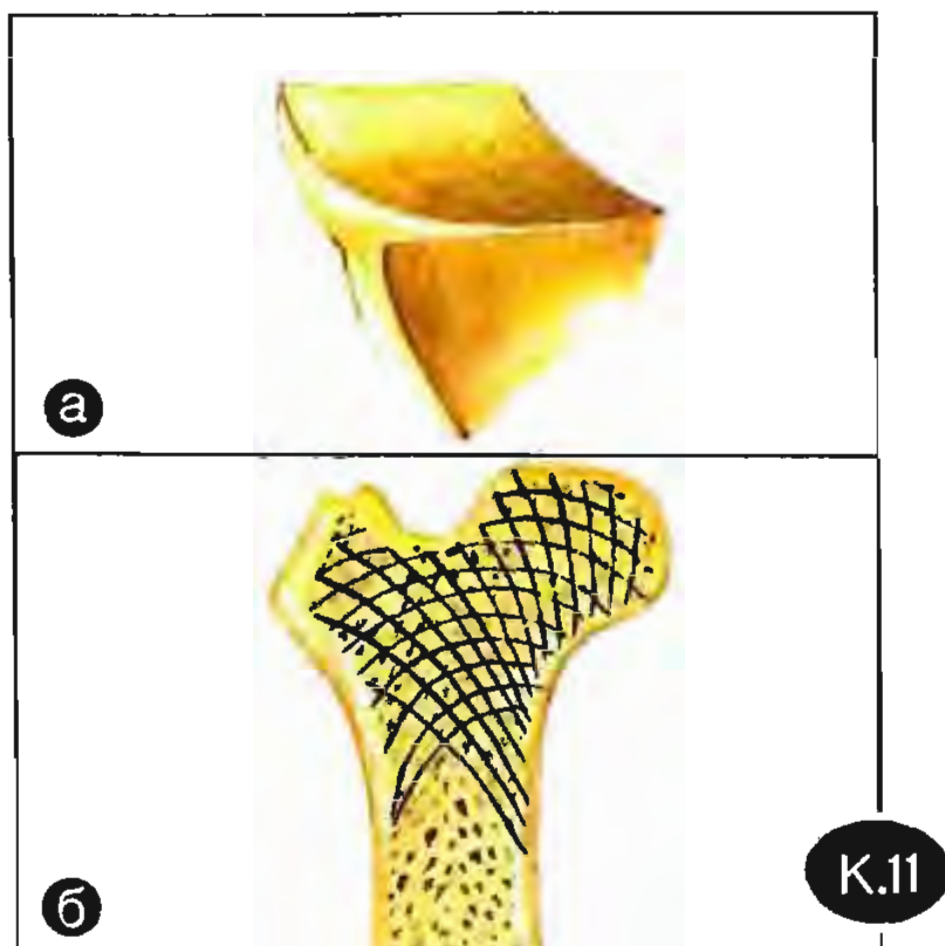
*вотных и птиц?* При относительной легкости (особенно у птиц) кости оказываются способными противостоять огромным и притом разнообразным нагрузкам; они подвергаются сжатию, растяжению, изгибу. Удары, прыжки, падения, аварийные ситуации — во всех этих случаях наш скелет испытывает, хотя и кратковременные, но особо сильные нагрузки. И, как правило, выдерживает их.

Все это объясняется очень рациональным, с точки зрения механики, строением костей. Здесь хотелось бы подчеркнуть два момента. Во-первых, прочность и легкость костей обусловлена их *формой*. В качестве примера отметим грудную кость птиц, имеющую



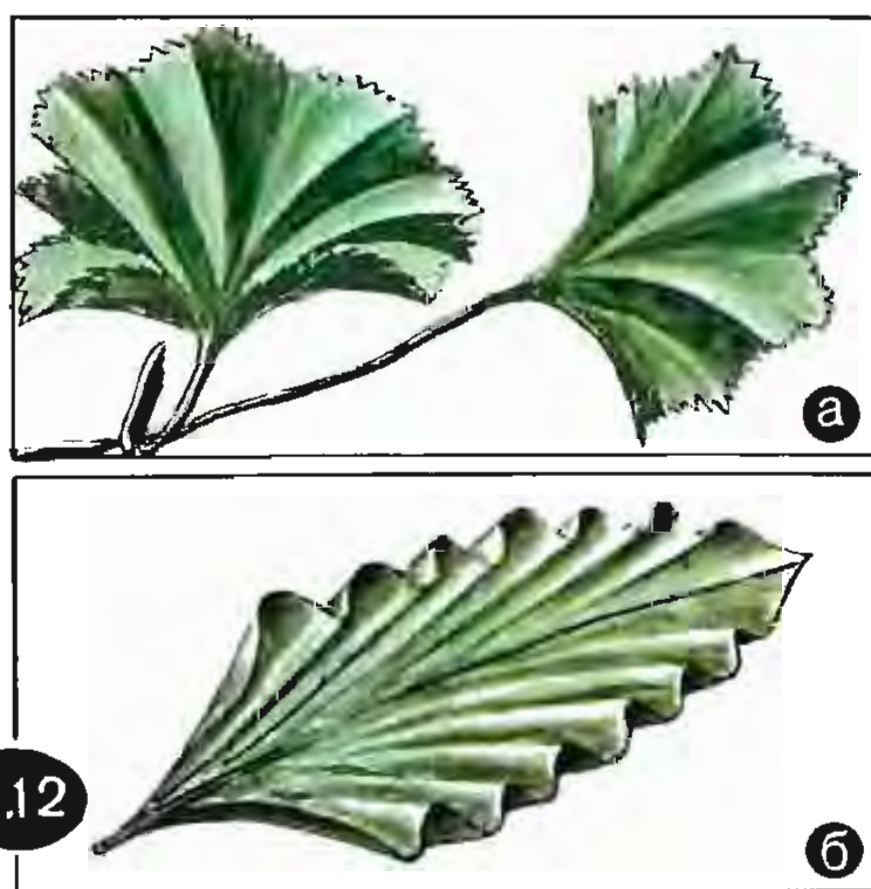
тавровое сечение (рис. К.11,а). Благодаря своей форме эта кость выдерживает сильный напор ветра, с которым встречается птица во время полета. Другой пример — трубчатая форма костей конечностей, позволяющая противостоять огромным сжимающим и изгибающим нагрузкам. Как показали испытания, тазобедренная кость человека, поставленная вертикально, выдерживает груз массой 1,5 т (а ведь это автомобиль «Волга»). Во-вторых, следует отметить особенность внутреннего строения пустотелых костей. Примером может служить показанное схематически на рисунке К.11,б внутреннее строение головки тазобедренной кости. Пересекающиеся линии на рисунке — это система тонких внутренних перемычек; они ориентированы вдоль направления возможных механических напряжений, возникающих при тех или иных деформациях нагруженной кости. Поэтому какие бы нагрузки ни прикладывались, кость *никогда не работает на излом*, а только на сжатие и растяжение.

На рисунке К.12,а изображено травянистое растение, называемое манжеткой обыкновенной. Его листья имеют складчатую форму, они напоминают старинные кружевные манжеты. Подобную форму мы встречаем также у листьев бука (рис. К.12,б). Эта форма придает листьям дополнительную жесткость и прочность. Проведем следующий простой опыт, демонстрирующий повышенную сопротивляемость нагрузкам складчатых конструкций. Возьмем две книги одинаковой толщины и положим на них лист бумаги так, чтобы он служил своеобразным мостиком (рис. К.13,а). Вряд ли



такой мостик выдержит даже пустой спичечный коробок. А теперь создадим из листа бумаги простую складчатую конструкцию — сложим его гармошкой и сделаем мостик, показанный на рисунке К.13,б. Такой мостик спокойно держит на себе наполненный спичечный коробок, и даже не один, а несколько.

Это нетрудно объяснить с точки зрения механики. В первом



К.12

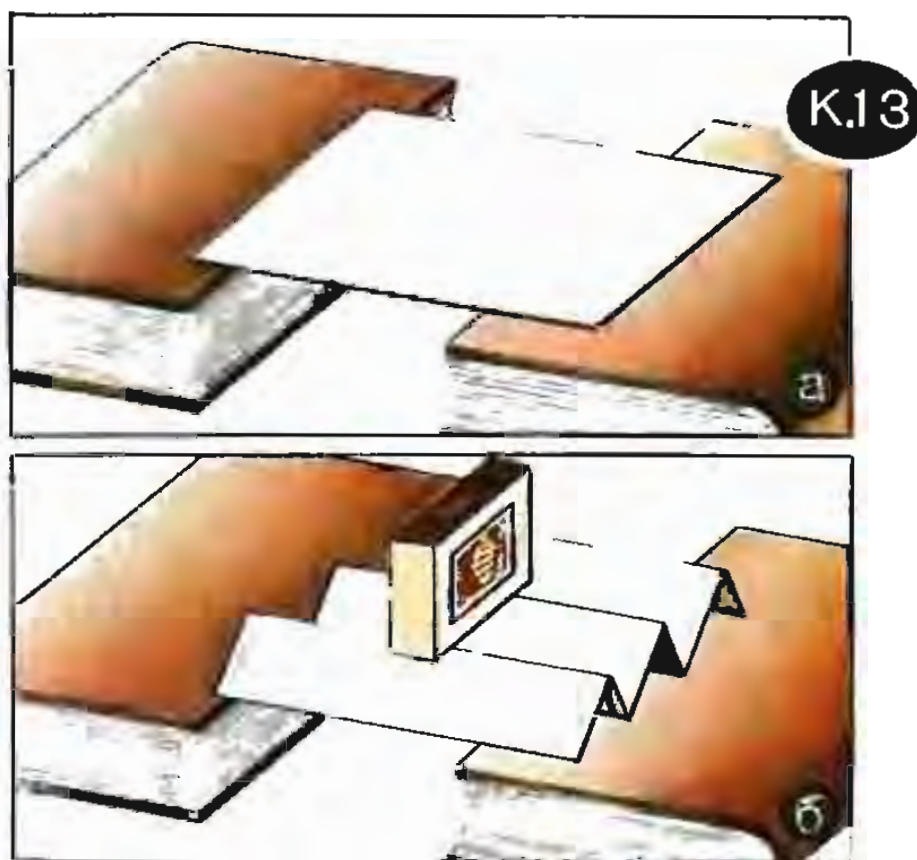


случае (когда лист бумаги был гладким) сила тяжести груза  $P$  и сила реакции опоры  $R$  изгибали материал толщиной  $d$  (рис. К.14,а). Во втором случае (когда создана складчатая конструкция) изгибающие усилия воздействовали на тот же материал, но при существенно большей его толщине, — как можно видеть на рисунке К.14,б, это есть толщина  $L$ .

В процессе эволюции природа отобрала наиболее рациональные конструкции, в которых при минимальных затратах строительного материала достигается наибольшая сопротивляемость различным нагрузкам. Мы рассмотрели лишь некоторые из таких конструкций. В действительности же интересных природных конструкций гораздо больше.

Можно, например, отметить обеспечение необходимой прочности обычного плоского листа или крыла стрекозы, мухи, бабочки за счет разветвленной системы жилок. Жилки образуют своеобразный каркас, выполняющий основную (несущую) роль; при этом пленка листа или мембрана крыла могут иметь минимальную толщину. Отметим также повышение прочности листа или лепестка цветка в результате сворачивания их в трубочку. Перечень подобных примеров можно было бы существенно продолжить.

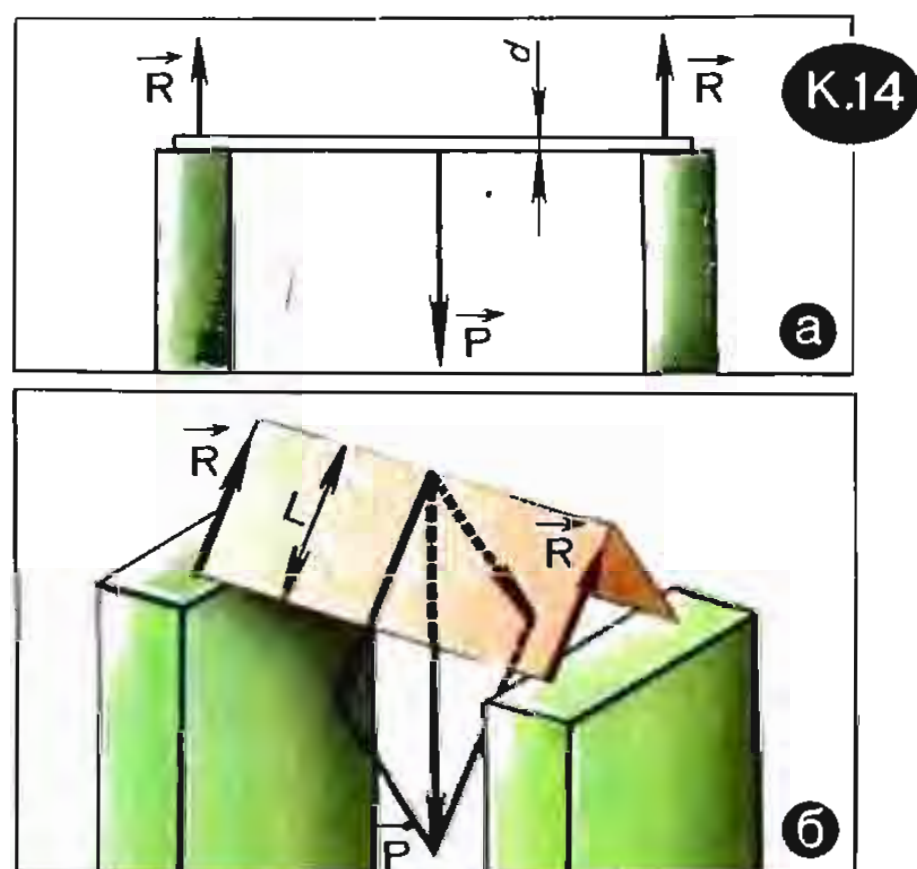
**Почему человеческая рука представляет собой столь совершенный рычаг?** На первый взгляд этот рычаг может показаться, напротив, весьма несовершенным. Он изображен на рисунке К.15. Под действием силы двуглавой мышцы (сила  $F$  на рисунке) рычаг-рука поднимает груз, находящийся на



ладони. Точка приложения силы  $F$  находится на расстоянии  $OB = 3$  см от точки опоры (от локтевого сустава), а точка приложения силы тяжести  $P$  — на расстоянии  $OC = 30$  см. Условие равновесия для рассматриваемого рычага имеет вид

$$F \cdot OB = P \cdot OC.$$

Отсюда следует, что  $F = P \cdot OC / OB = 10P$ . Таким образом, чтобы удержать груз, необходимо усилие

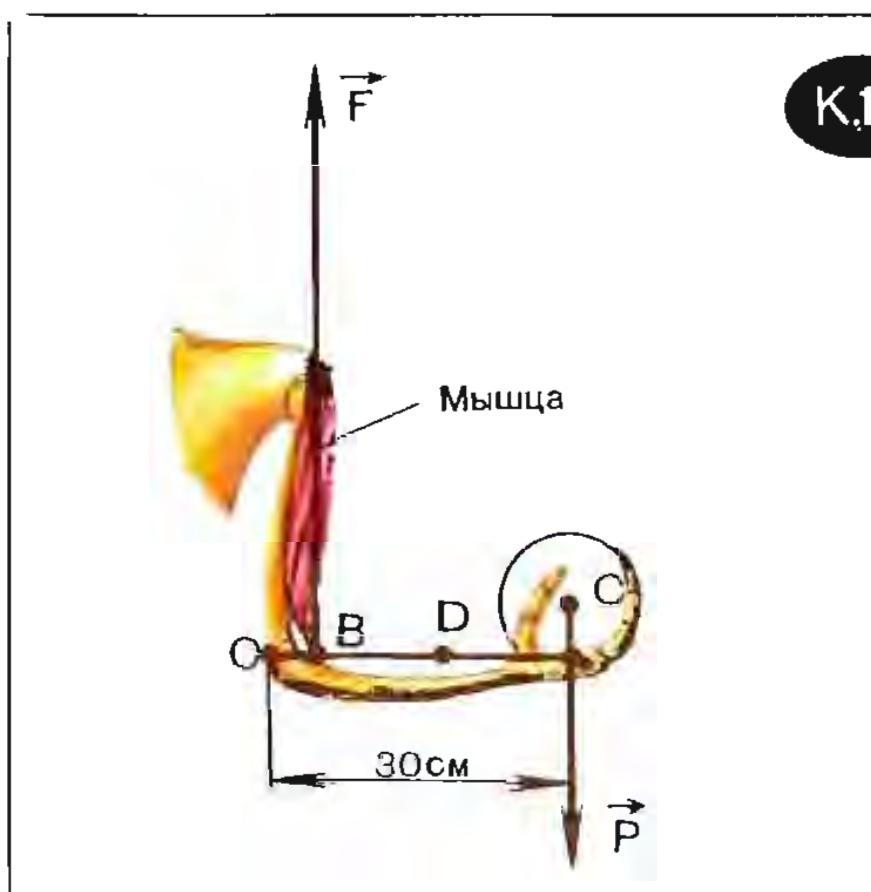




мышцы, в десять раз превышающее силу тяжести груза. Не говорит ли это о несовершенстве руки-рычага?

Легко сообразить, что такое устройство руки-рычага является как раз весьма совершенным. То, что мы проигрываем здесь в силе, не имеет особого значения, — мышца обладает достаточно большой силой. Зато очень важно то, что, проигрывая в силе, мы выигрываем в других отношениях. Небольшое сокращение длины мышцы позволяет в данном случае осуществить значительное перемещение ладони с грузом (мы можем поднять груз даже к плечу). Кроме того, мы выигрываем в скорости перемещения. Мышцы не могут очень быстро сокращаться; к счастью, при таком рычаге этого и не требуется: скорость перемещения ладони с грузом оказывается в 10 раз больше скорости сокращения мышцы. Итак, проигрывая в 10 раз в силе, мы во столько же раз выигрываем в длине и скорости перемещения груза.

Вообразим на минуту, что мышца была бы прикреплена, например, в середине лучевой кости (в точке  $D$  на рисунке К.15). Такой рычаг позволял бы нам удерживать и поднимать в 5 раз более тяжелые грузы. Но зато мы бы в 5 раз проиграли в высоте и скорости подъема. Если сейчас мы можем поднять груз за одну пятую секунды, то в рассматриваемом случае нам потребовалась бы для этого целая секунда. К тому же какими поистине уродливыми сделались бы наши конечности! Кому нужен выигрыш в силе, если он достигается ценой утраты подвижности, свободы перемещений, изящности строения тела? Именно потому, что природа предпочла



проиграть в силе, наши конечности оказались столь совершенными рычагами.

Почему соки поднимаются по стволу дерева от корней к листьям? Почему начавшая вянуть срезанная ветка оживает, когда ее ставят в воду? Почему вода поступает внутрь животных и растительных клеток, обеспечивая тем самым их жизнедеятельность? Все эти вопросы связаны с интересным физическим понятием, называемым осмосом.

Предположим, что чистая вода и водный раствор некоторого вещества разделены перегородкой, сквозь которую молекулы растворителя (воды) проходят, а молекулы растворенного вещества не проходят. В качестве примера можно привести воду и водный раствор сахара, разделенные перегородкой из целлофана. Пленка целлофана пропускает молекулы воды, но не пропускает молекулы сахара. Предположим, что вода занимает объем  $A$ , а раствор сахара — объем  $B$  (рис. К.16). Если



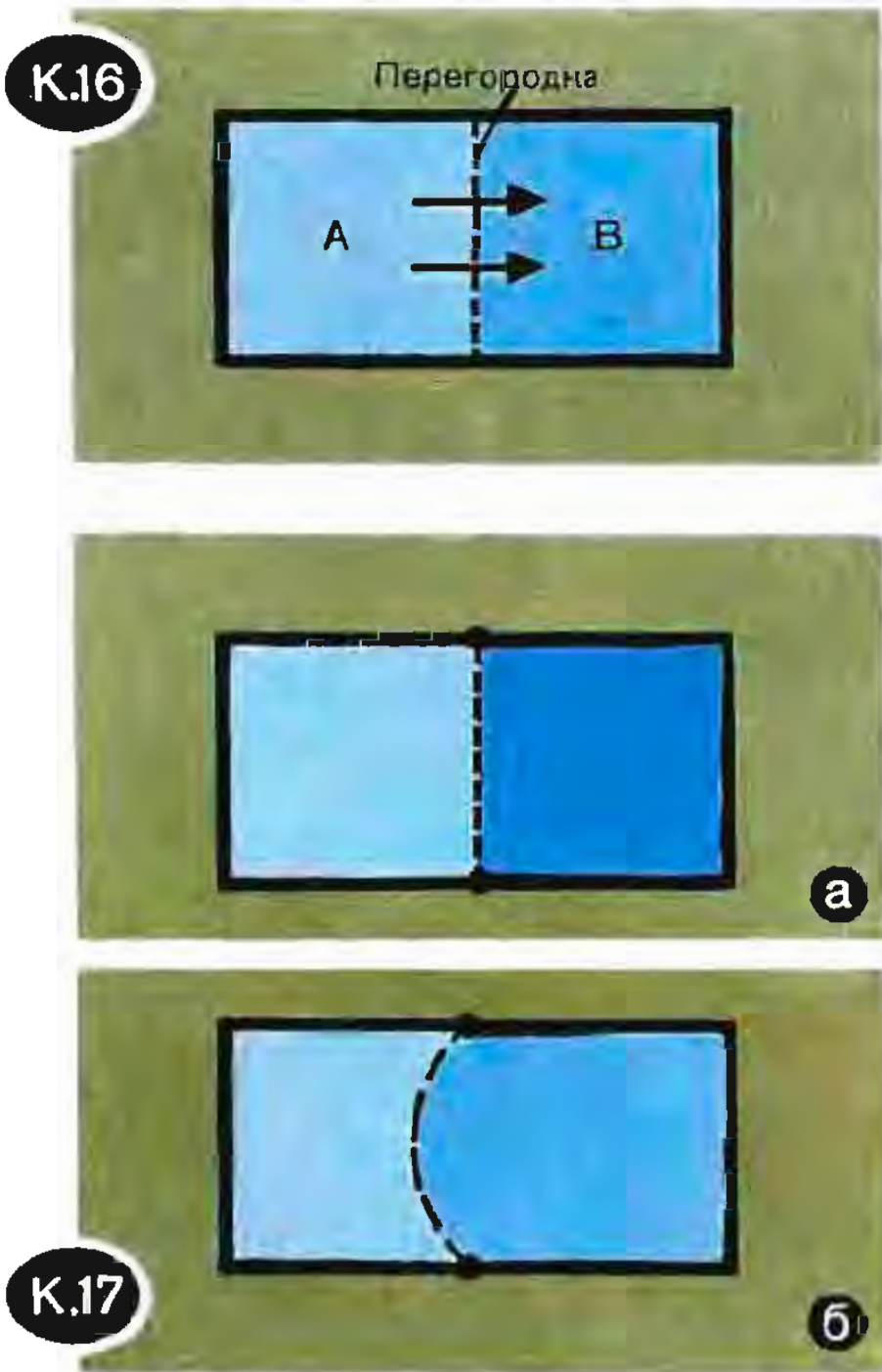
бы мы вдруг убрали разделяющую эти объемы целлофановую перегородку, то тут же началась бы *диффузия* молекул воды из *A* в *B* и молекул сахара из *B* в *A*. Через некоторое время в *A* и *B* оказался бы раствор сахара одной и той же концентрации — это означает, что наша система пришла в состояние *термодинамического равновесия*. При наличии целлофановой перегородки диффузия сахара из объема *B* в объем *A* исключается; в данном случае процесс постепенного выравнивания концентрации растворенного сахара в обоих объемах будет идти лишь за счет *односторонней диффузии* — воды из *A* в *B* (см. стрелки на рисунке К.16). Вот эту

одностороннюю диффузию растворителя (воды) через полупроницаемую перегородку и называют *осмосом*.

Явление осмоса можно эффектно продемонстрировать. Целлофановый пакет с раствором сахара опускают в аквариум с водой. Буквально на глазах пакет начинает раздуваться — это внутрь него переходит вода из аквариума. Если концентрация сахара в пакете была достаточно большой, пакет может даже лопнуть.

Что заставляет воду диффундировать через перегородку главным образом в направлении от растворителя к раствору? Почему диффузия молекул воды в обратном направлении отсутствует или, во всяком случае, оказывается более слабой? Ответ на эти вопросы содержится, по сути дела, в самом термине *осмос*. Слово «осмос» греческого происхождения; оно переводится как «толчок», «давление». Попробуем же разобраться, о каком *давлении* идет здесь речь.

Итак, рассмотрим сосуд, разделенный на две половины целлофановой пленкой (рис. К.17,а). В левую половину налита вода, в правую — раствор сахара. Такая система термодинамически *неравновесна*. Естественно, она будет «стремиться» к равновесию, т. е. к выравниванию концентрации сахара в обеих половинах сосуда. Поэтому и начнется *односторонняя диффузия* молекул воды из левой половины в правую, что приведет, очевидно, к *прогибанию* целлофановой пленки влево (рис. К.17,б). При некотором прогибе пленки процесс диффузии прекратится. Создается впечатление, что *упругая сила* прогнувшейся пленки *уравновешивает* некую силу, *давящую на пленку справа*.





Я. Х. Вант-Гофф в 1887 г. объяснил природу этого давления. Он уподобил молекулы сахара, движущиеся в растворителе, молекулам идеального газа, движущимся в вакууме. Ударяясь о перегородку, молекулы сахара тем самым и создают давление на нее. Вант-Гофф показал, что при относительно небольших концентрациях раствора рассматриваемое давление (его обозначают как  $\pi$ ) описывается точно такой же формулой, что и *давление идеального газа*:

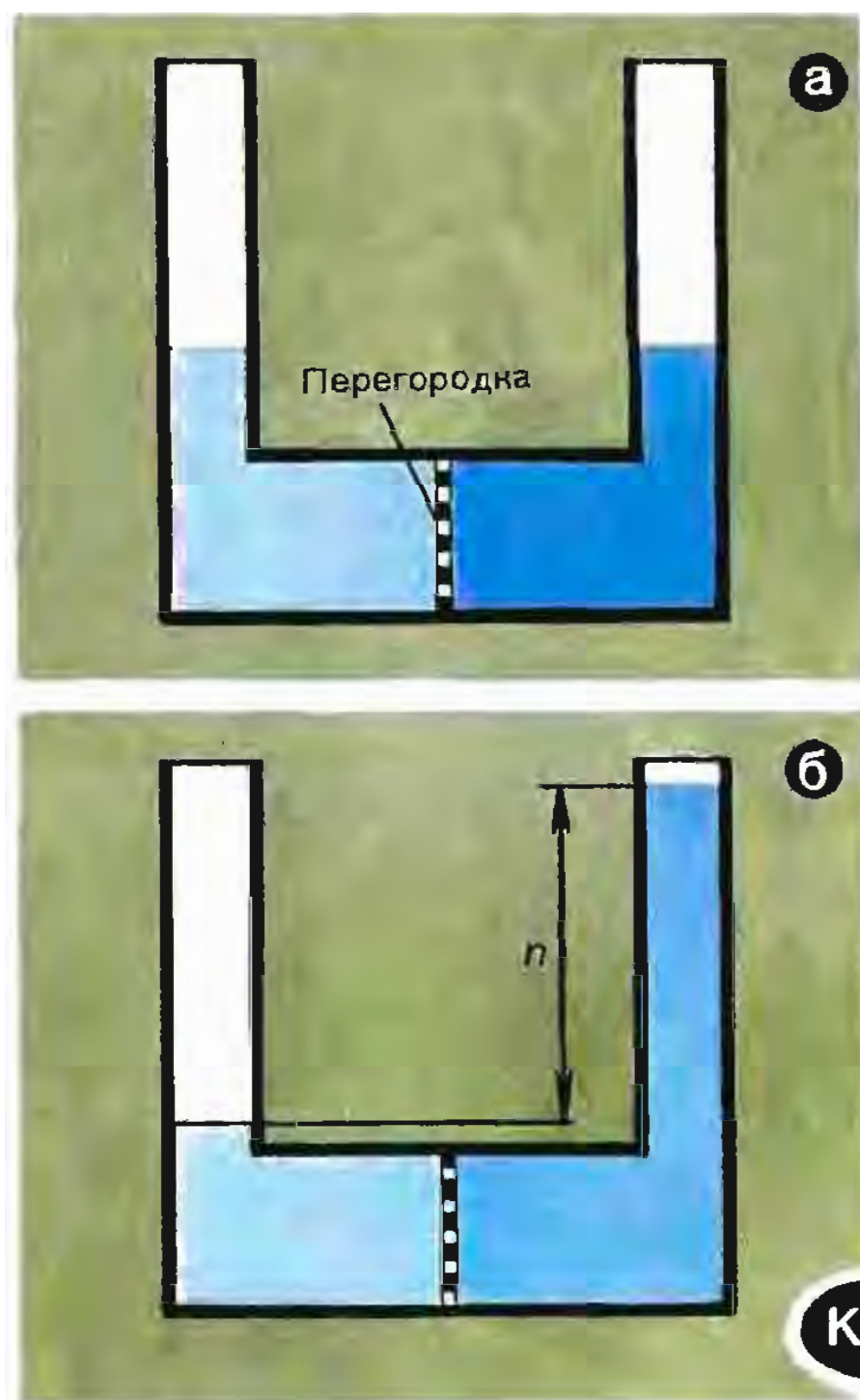
$$\pi = \frac{nRT}{V}.$$

Здесь  $n$  — число молей растворенного вещества,  $V$  — объем растворителя,  $T$  — температура,  $R$  — универсальная газовая постоянная. Давление  $\pi$  получило название *осмотического давления*.

Используя понятие осмотического давления, можно наглядно объяснить явление осмоса, не прибегая к общим фразам типа: «система стремится выровнять концентрацию сахара в растворе». Нельзя забывать, что неодушевленный объект не может к чему-либо *стремиться*, так что данный глагол допустимо употреблять здесь только в кавычках. Итак, мы налили в левую половину сосуда воду, а в правую раствор сахара. Молекулы сахара будут оказывать давление на целлофановую пленку (осмотическое давление). Под действием давления пленка начнет прогибаться влево, а это возможно лишь при условии, что какое-то количество молекул воды продиффундирует сквозь пленку из левой половины сосуда в правую. Мы видим, таким образом, что осмотическое давление *органически связано* с явлением

односторонней диффузии молекул сквозь полупроницаемую перегородку, т. е. с осмосом.

Далее предположим, что полупроницаемая перегородка жесткая и прогибаться не может. В связи с этим изменим конструкцию нашей опытной установки (рис. К.18). Исходная ситуация изображена на рисунке К.18,а: как и прежде, слева вода, а справа раствор сахара. В предыдущем опыте осмотическое давление заставляло *прогибаться эластичную перегородку*. Теперь перегородка жесткая, она неподвижна, и осмотическое давление приводит к другому эффекту — оно заставляет раствор *подниматься по правой трубке*. Одновременно уровень





воды в левой трубке будет опускаться. Этот процесс прекратится, когда гидростатическое давление  $\rho gh$ , определяемое разностью  $h$  высот жидкости в трубках (рис. К.18,б), уравнивается осмотическое давление:

$$\pi = \rho gh$$

(полагаем, что вода и раствор сахара имеют одинаковую плотность  $\rho$ ).

Заметим, что осмотическое давление в случае 4% -ного раствора сахара при комнатной температуре равно 0,3 МПа (1 МПа =  $10^6$  Па = 9,8 атм). Если же взять 50% -ный раствор сахара, то осмотическое давление оказывается равным 10 МПа — это почти сто атмосфер! Напомним, что степень солености морской воды составляет 0,035 (3,5%). Осмотическое давление в этом случае оказывается примерно таким же, как и для 4% -ного раствора сахара; оно равно 0,27 МПа.

Теперь мы можем вернуться к поставленным вопросам. Причина, заставляющая подниматься соки внутри ствола дерева, — это осмотическое давление. В данном случае в роли раствора выступает уже не раствор сахара, а растворы определенных химических соединений (неорганических и органических). Да и целлофановую перегородку здесь заменяют различные растительные полупроницаемые пленки. (Таких пленок много в мире живой природы, их обычно называют мембранами.) Ясно, что осмотическое давление заставляет подниматься оживляющую влагу по внутренним сосудам срезанной ветки. Заметим, что наряду с осмосом здесь играют определенную роль также капиллярные явления.

Ранее мы упоминали опыт с раздуванием целлофанового пакета с раствором сахара при погружении пакета в воду. Этот пакет можно сопоставить с живой клеткой. Через внешнюю мембрану (оболочку) клетки происходит односторонняя диффузия воды внутрь клетки. Впрочем, не будем чрезмерно упрощать суть дела. Клетка — сложнейшая структура, в ней совершаются очень сложные процессы. Клеточные мембраны пропускают сквозь себя не только воду, но и некоторые ионы; вопрос об их проницаемости является одним из центральных в современной биологии. Здесь достаточно заметить, что в процессах взаимодействия клеток с окружающей средой, а также во внутриклеточных процессах явление осмоса играет важную роль. С ним связано, в частности, не только наполнение клеток водой, но и выведение воды и солей из организма, а также задержание и перераспределение их внутри организма.

**Почему некоторые племена Южной Америки считают мясо угрей целебным? Почему скату не надо гоняться за добычей? Почему рыбы могут охотиться ночью и в совершенно мутной воде? Почему сокращается мышца? Почему возникают биопотенциалы? Как передается нервное возбуждение? Как будто нет ничего общего между охотой одних рыб на других и проблемой передачи возбуждения вдоль нервной клетки (нейрона). Но это только на первый взгляд. Все эти вопросы связаны с биоэлектричеством — электрическими явлениями в живой природе.**

Жители Южной Америки давно подметили, что некоторые ры-

бы способны наносить парализующие удары; они называли их «арима», что означает «лишающий движения». Мясо таких необыкновенных рыб считалось целебным. Сегодня известно, что удивительные рыбы — это электрические угри, живущие в реках Южной Америки. Вдоль всего тела электрического угря располагаются специальные органы, создающие электрическое напряжение до 600 В. В ответ на внешнее раздражение угорь генерирует несколько импульсов электрического тока с интервалом примерно 5 мс; длительность отдельного импульса 2 мс.

Еще древним римлянам было известно, что скаты обладают удивительной способностью поражать на расстоянии проплывающих вблизи мелких рыб, крабов, осьминогов. Оказавшись случайно поблизости от ската, они вдруг начинали конвульсивно дергаться и тут же замирали. Их убивали электрические разряды, которые генерировали специальные органы скатов. У обыкновенных скатов эти органы находятся в хвосте, а у обитающих в теплых морях электрических скатов — в области головы и жабер. Обыкновенные скаты создают напряжение около 5 В, электрические до 50 В.

На рисунке К.19 красным цветом обозначено расположение электрических органов на теле некоторых видов рыб. Там же показаны знаки электрических потенциалов.

У многих рыб (у электрического угря, рыбы-ножа, гимнарха, гнатонемуса) голова заряжается положительно, хвост отрицательно, а вот у электрического сома, наоборот, хвост заряжается положительно, голова отрицательно.

Обладающие электрическими свойствами рыбы используют эти свойства не только для нападения, но также для того, чтобы отыскивать жертвы, опознавать опасных противников и ориентироваться в неосвещенной или мутной воде. Рассмотрим, как это делает, например, гимнарх — крупный ночной хищник, обладающий высокой чувствительностью к малейшим изменениям напряженности окружающего его электрического поля (он способен воспринимать изменения напряженности, составляющие всего  $10^{-6}$  В/м). На рисунке К.20,а показана структура силовых линий электрического поля, которое создает вокруг себя гимнарх. Если недалеко от рыбы появляется какой-либо объект или если рыба оказывается вблизи препятствия, картина силовых линий искажается.

На рисунке К.20,б можно видеть, как будет выглядеть электрическое поле, если недалеко от хвоста гимнарха появился некий объект с высокой электрической проводимостью, а поблизости от головы рыбы оказалось препятствие (например, подводная скала). Гимнарх воспринимает все эти изменения поля и, таким образом, опознает объект и скалу.

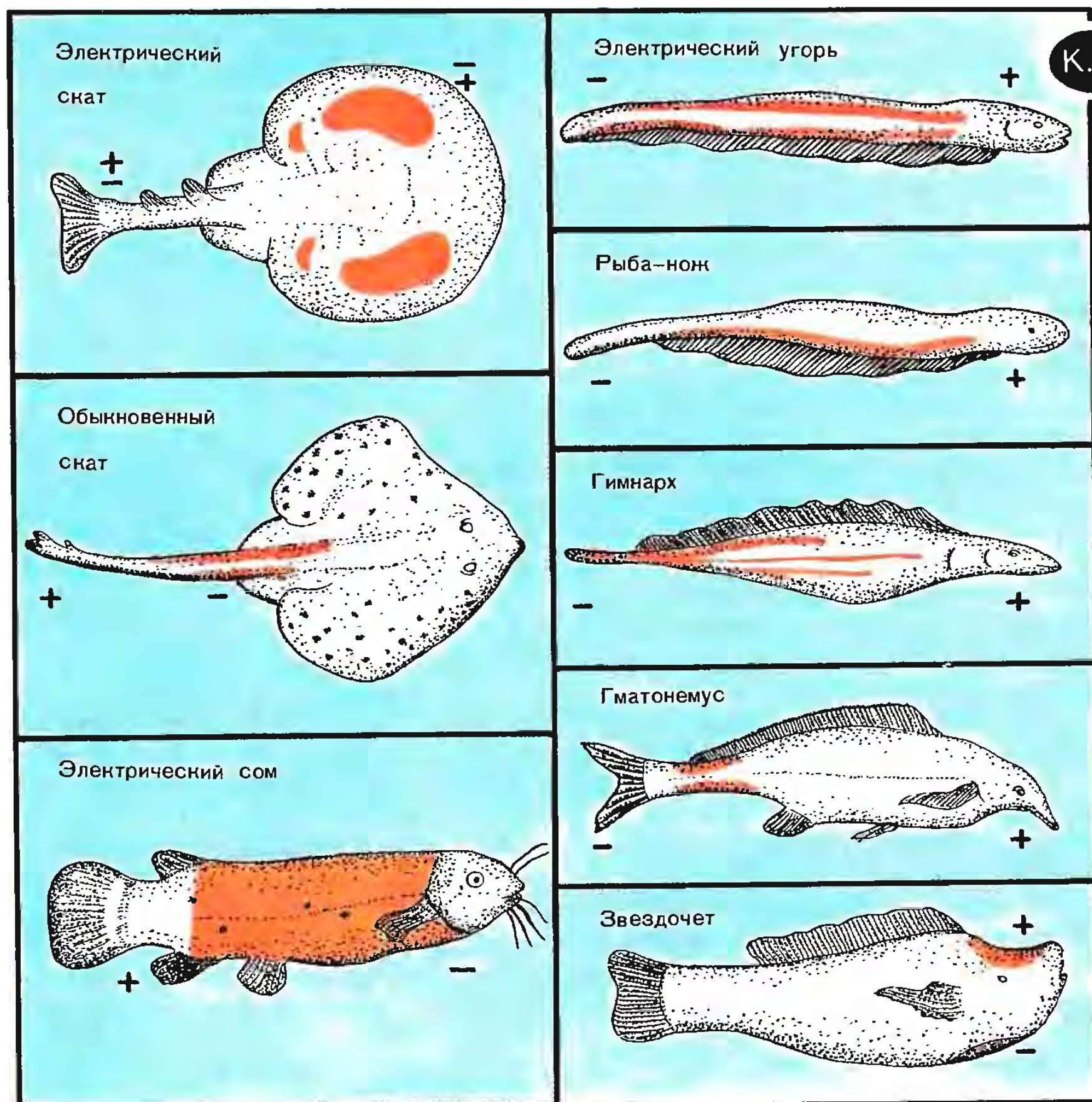
Не все рыбы обладают электрическими свойствами. Число живых существ, имеющих специальные органы для генерации и восприятия электрических полей, не так уж велико. Тем не менее в любом живом организме и даже в отдельных живых клетках создаются электрические напряжения; их называют биопотенциалами. «Биологическое электричество» является неотъемлемым свойством всей живой материи. Оно возникает при функционировании нервной сис-



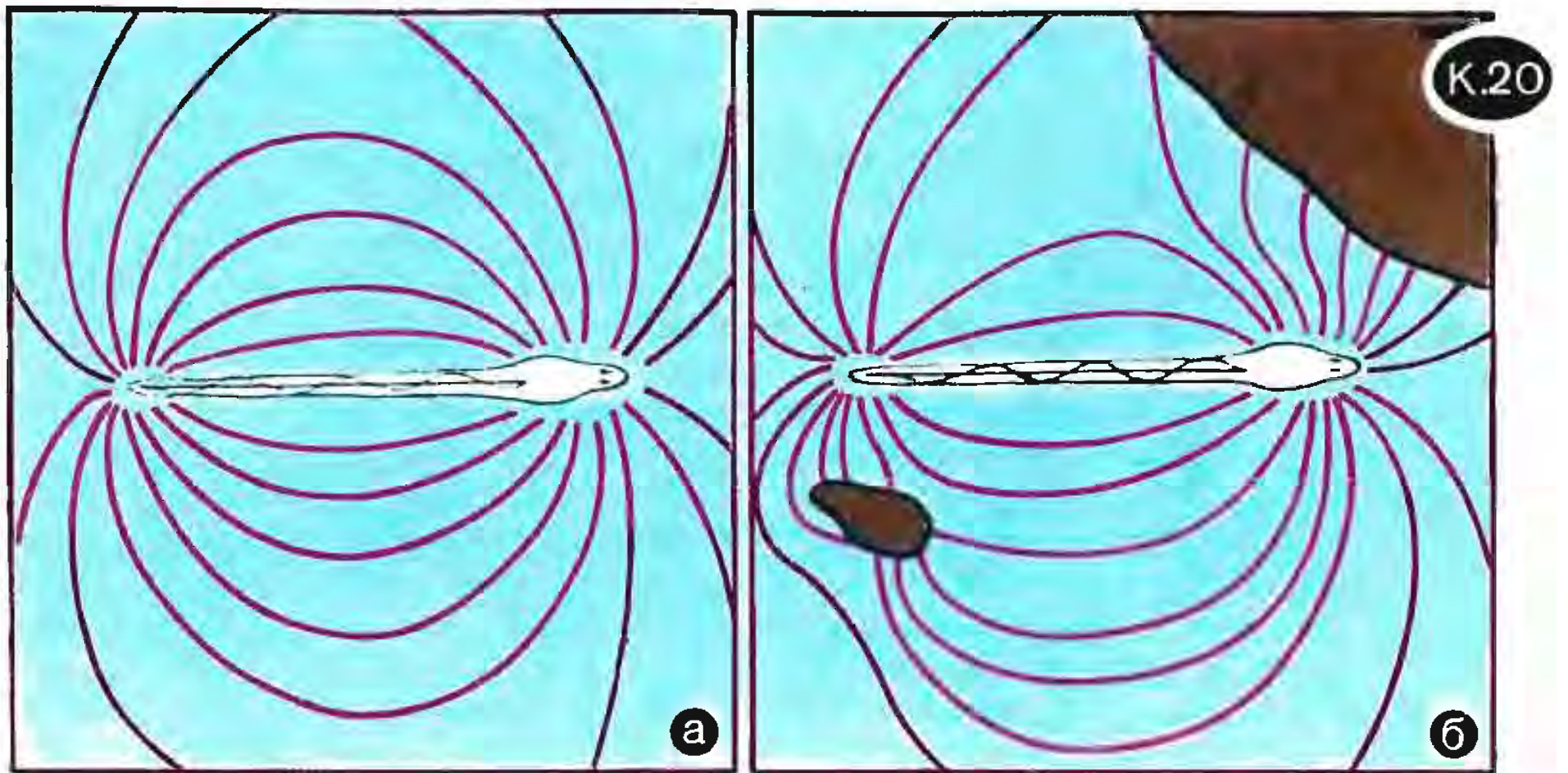
темы, при работе желез и мышц. Так, работающая сердечная мышца создает на поверхности тела ритмично изменяющиеся электрические потенциалы. Изменение этих потенциалов со временем может быть зафиксировано в виде электрокардиограммы, позволяющей специалисту судить о работе сердца.

*Почему происходит сокращение мышцы? Луиджи Гальвани*

в 1780 г. наблюдал сокращение мышц препарированных лягушек в серии опытов, один из которых состоял, например, в следующем. На протянутом над домом проводе ученый подвесил лягушек за бедра; к лапкам лягушек он присоединил длинную проволоку, опущенную одним концом в воду колодца. И вот что он записал: «...Сколько раз вспыхивала молния, столько же раз все мыш-







цы в тот же момент впадали в сильнейшие и многократные сокращения». Подобные опыты позволили ученому сделать вывод: «Из того, что мы до сих пор узнали и исследовали, можно, я полагаю, с достаточным основанием заключить, что животным присуще электричество...» Правда, Гальвани ошибочно считал, что «животное электричество» имеет особую природу, отличную от обычного электричества. В действительности же никакого особого «животного» электричества нет; электричество в живых организмах то же самое, что и в неживой природе.

Но вернемся к вопросу о сокращении мышцы. Сегодня нам известно, что сокращение мышцы является результатом происходящего в соответствующих тканях прямого превращения химической энергии в механическую работу. Сокращающаяся мышца использует энергию, запасенную в молекулах аденозинтрифосфорной кислоты (молекулах АТФ). Эти молекулы можно рассматривать как

биологический аккумулятор энергии. Аккумулятор разряжается при химических процессах, сопровождающих сокращение мышцы, и заряжается при химических процессах, сопровождающих дыхание.

Получается, что электрическая энергия не имеет отношения к работе мышц? — может спросить читатель. Имеет. Дело в том, что те или иные химические процессы управляются электрическими импульсами, поступающими от мозга к мышечной ткани по специальным нервным клеткам — *нейронам*. Чтобы понять, как это происходит, мы должны проследить за возникновением биопотенциалов на клеточном уровне.

Известно, что через внешнюю мембрану (оболочку) живой клетки все время проходят ионы натрия и калия. При этом клетка старается как бы обменять натрий на калий: в клетке действует некий механизм, своего рода «ионный насос», который «накачивает» в клетку ионы калия и в то же время изгоняет из клетки ионы натрия. Этот насос использует хими-



ческую энергию молекулы АТФ. Как он действует, до сих пор не вполне понятно. «Накачанные» в клетку ионы натрия за счет диффузии сквозь мембрану постепенно покидают клетку; «изгнанные» же из клетки ионы калия, диффундируя сквозь мембрану, возвращаются обратно в клетку. Обычно внутри клетки концентрация ионов калия выше, а ионов натрия ниже, чем снаружи.

Кроме положительно заряженных ионов натрия и калия, в растворах внутри и вне клетки имеются отрицательно заряженные ионы хлора (все рассматриваемые ионы появились в результате диссоциации молекул NaCl и KCl в растворах). Общее количество положительных ионов уравновешено количеством отрицательных, так что в целом раствор, заполняющий живую ткань, электронейтрален. Но это только в целом. Перераспределение ионов может приводить к пространственному разделению зарядов разного знака в том или ином месте, т. е. к возникновению там разности потенциалов.

Рассмотрим некоторый участок клеточной мембраны, обладающий свойством пропускать ионы калия и не пропускать ионы хлора. Предположим, что заряды разного знака не разделены и при этом концентрация ионов калия и хлора внутри клетки больше, чем снаружи (рис. К.21,а). Вследствие разности концентраций ионы калия будут диффундировать сквозь мембрану из клетки наружу, ионы же хлора будут оставаться внутри клетки. В результате на данном участке мембраны возникнет разность потенциалов: область с внутренней стороны мембраны будет заряжена отрицатель-

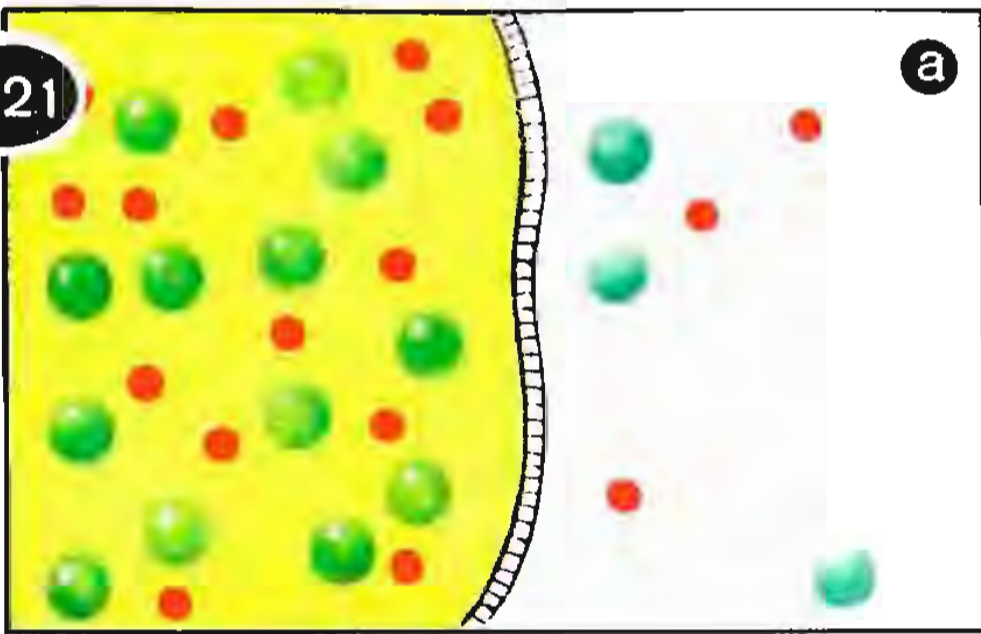
но, а с внешней положительно (рис. К.21,б). Обычно живая клетка имеет по отношению к внешней среде отрицательный потенциал, равный 0,01...0,08 В.

Теперь рассмотрим, как распространяется электрический сигнал по нервной клетке (нейрону). Схема строения нейрона дана на рисунке К.22. Здесь: 1 — ядро клетки, 2 — вытянутый отросток (аксон), 3 — так называемая миелиновая оболочка, 4 — мышечное волокно. Собственно говоря, следует рассмотреть распространение электрического сигнала по аксону.

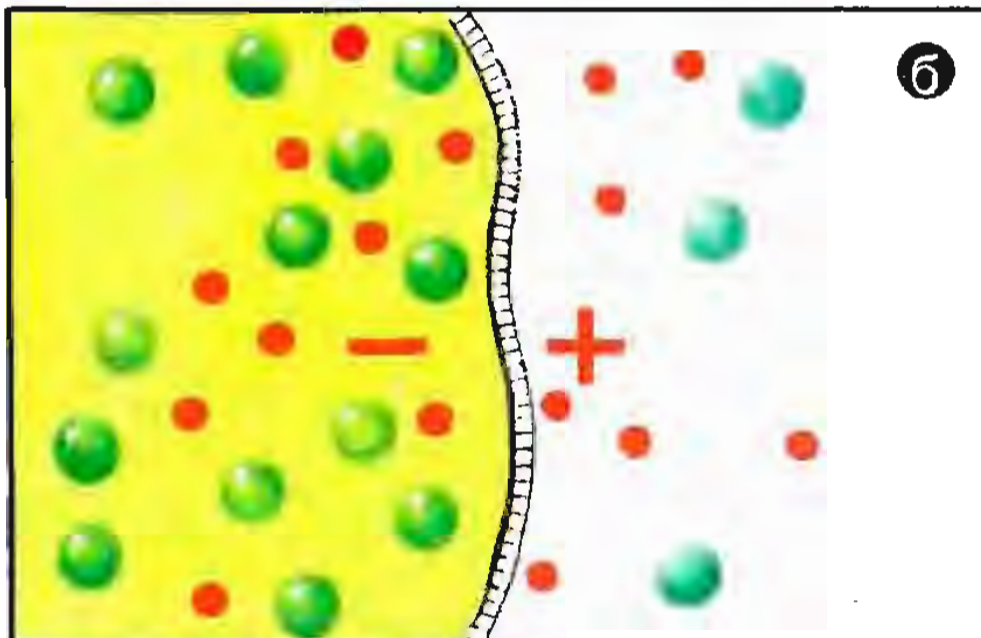
В обычном состоянии (в отсутствие возбуждения) мембрана аксона хорошо проницаема для ионов калия и плохо для ионов натрия и хлора. Учитывая замечания, сделанные ранее, заключаем, что в рассматриваемом состоянии аксон по всей своей длине будет иметь отрицательный потенциал по отношению к окружающей его оболочке. Мембрана аксона обладает интересным свойством: если с помощью внешнего поля понизить разность потенциалов между аксоном и его оболочкой, мембрана будет становиться проницаемой для ионов натрия, причем в тем большей степени, чем меньше окажется разность потенциалов. Теперь представим себе, что на верхний конец аксона (рис. К.22) поступил электрический сигнал, который немного сдвинул в этом месте потенциал аксона в положительную сторону (интенсивность такого сигнала должна быть выше некоторого порогового значения). Мембрана аксона в данном месте немного «просветлится» для ионов натрия, и, поскольку концентрация этих ионов вне клетки, как обычно, выше, они начнут понемногу диффундировать внутрь

K.21

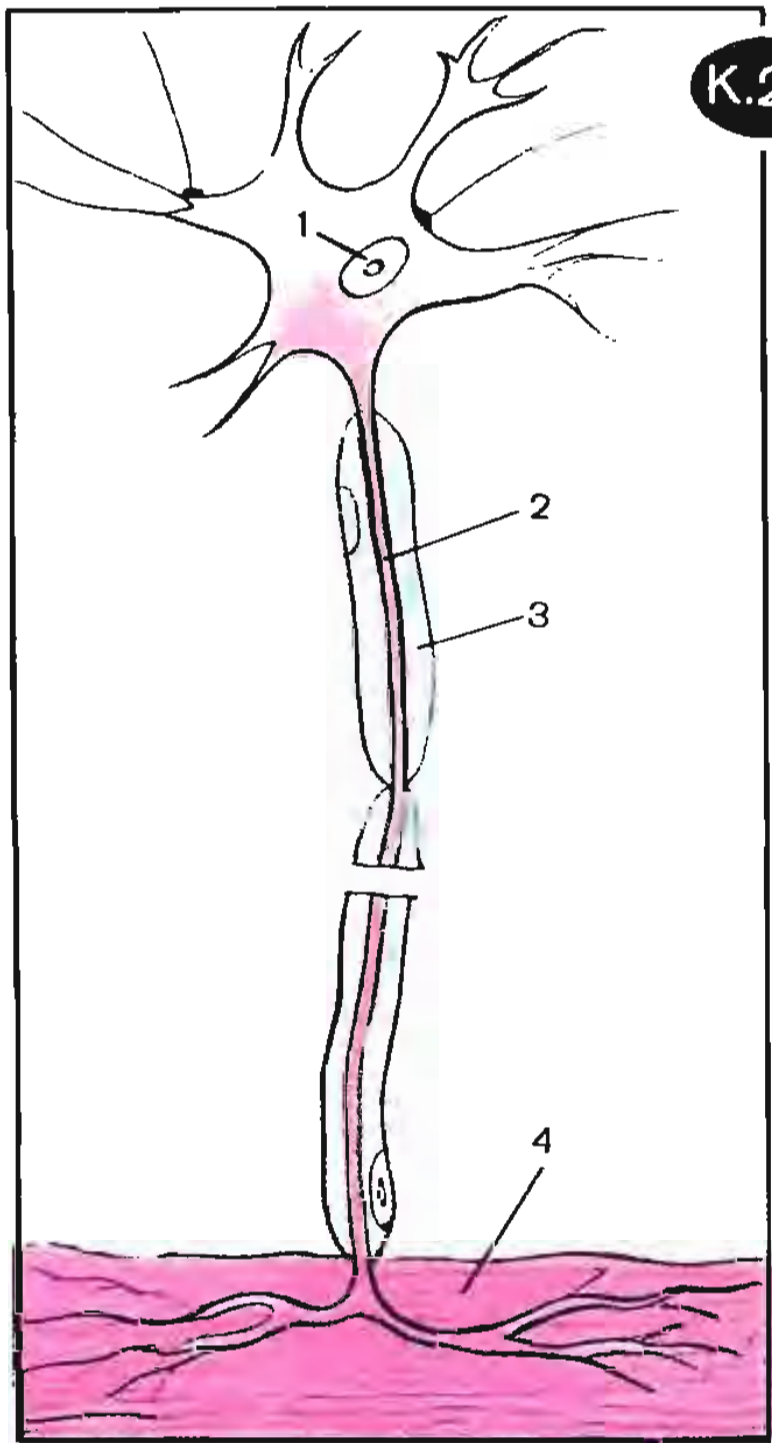
а



б

— Cl<sup>-</sup>— K<sup>+</sup>

K.22



клетки. В результате потенциал аксона еще сильнее сдвинется в положительную сторону, мембрана еще более «просветлится» для натрия, приток этих ионов внутрь клетки еще более усилится. Таким образом, первоначальный сигнал играет роль своеобразного «спускового крючка», который приводит в действие взаимно усиливающие друг друга процессы, следствием чего будет смена отрицательного потенциала верхнего конца аксона на положительный. Граница участка аксона, где произошла смена знака потенциала, будет, очевидно, расширяться, — ведь изменение разности потенциалов в нем будет неизбежно приводить к изменению натриевой

проницаемости мембраны на соседних участках. В то же время, после того как ионы натрия закончили на данном участке свое перемещение внутрь аксона, восстанавливаются прежние свойства мембраны и, как следствие, восстанавливается прежний потенциал аксона. Таким образом, по аксону сверху вниз распространяется «всплеск» положительного потенциала — это и есть электрический сигнал, несущий мышцам команду сокращаться. На все это требуется время порядка миллисекунды; по прошествии этого времени аксон снова приходит в исходное состояние и готов к «транспортировке» следующего импульса.



Нам не дано предугадать,  
Как слово наше отзовется,—  
И нам сочувствие дается,  
Как нам дается благодать...

Ф. И. Тютчев

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Беседа за круглым столом

*(В беседе участвуют автор  
и несколько воображаемых читателей)*

Автор. Вы прочитали книгу. Хотелось бы знать, как она «отозвалась», какие пробудила мысли, какие вызвала вопросы или возражения.

Читатель А. Здесь много совсем новой для меня информации. Я познакомился с явлениями природы, о которых раньше лишь кое-что слышал или вообще ничего не слышал. Я увидел, что даже привычные природные явления, над которыми мы обычно не задумываемся, имеют интересное физическое объяснение.

Читатель Б. А многие явления, как я понял, до сих пор по-настоящему не объяснены.

Читатель В. У меня сложилось представление (особенно после чтения «Калейдоскопа»), что немало природных явлений вообще осталось за рамками книги.

Автор. Согласен — здесь рассмотрено и проанализировано большое число явлений природы, но исчерпать тему, конечно, не удалось. Да это и невозможно. Остающееся после чтения ощущение, что разговор о физике в природе далеко не окончен, совершенно естественно. И, надо признаться, я сознательно хотел усилить такое ощущение, заканчивая книгу главой «Калейдоскоп». Полагаю, что все это должно пробуждать в читателе желание самому принять участие в изучении природы. А изложенный в книге материал, возможно, убедит его в том, что объект крайне интересен и заслуживает изучения. Одним словом, главную задачу я видел в том, чтобы привлечь внимание к явлениям природы и, в частности, к физике этих явлений.

Читатель А. Мне кажется, что книга эту задачу решает. Раньше я как-то не обращал внимания на снег, лед, туман, облака, радуго. Слишком уж все это привычно. Сообщения о том, что где-то случилось землетрясение или произошло извержение вулкана, воспринимались безразлично: услышал — и тут же забыл. Теперь у меня появился интерес ко всему этому. Я не знаю, буду ли когда-нибудь изучать природу, но во всяком случае воспринимать то, что в ней происходит, я буду не безразлично.

И потом хочу сказать, что сам предмет физики стал казаться более интересным. В учебнике почти ничего нет о природе. А ведь такие «скучные» разделы, как фазовые переходы (конденсация, кипение, испарение, замерзание, таяние), наверное, показались бы совсем не скучными, если их «проиллюстрировать» туманом, облаками, гейзерами, ледниками и т. п.

Читатель В. Почему вы выбрали именно такую последовательность рассмотрения явлений в книге? Была ли в этом какая-нибудь идея?

Читатель Б. Может быть, следовало распределить все явления, придерживаясь структуры учебника по физике?

Автор. С самого начала мне было ясно, что раскладывать явления природы по четырем привычным «полочкам» — механика, теплота, электричество, оптика — я не стану. Возможно, что так удобнее изучать физику, однако природе до этого нет дела. Очевидно, что многие явления попросту «не укладываются» в рамки того или иного раздела физики. В грозе «представлены» и теплота, и электричество, и оптика. В полярных сияниях — электричество и оптика. Говоря о снеге и льде, мы используем механику, теплоту, оптику. Но дело не только в этом. Все это не главное. А главное то, что в центре внимания в книге должна была стать, как я считал, сама природа, и уже только потом — науки, исследующие ее. Вряд ли следует по данной книге изучать физику — в ней рассматривается не физика, а природа. А физика используется как одно из средств изучения природы. Причем используется не только физика, привлекаются также химия, биология, геология.

Читатель В. И все же почему природные явления обсуждаются в книге именно в такой, а не в какой-то другой последовательности?

Автор. Я начал с рассмотрения явлений, масштабы которых относительно невелики; такие явления можно наблюдать при соответствующих условиях в любой стране, практически в любой местности. Они почти или вовсе не опасны. Все могут их наблюдать и наблюдали неоднократно. Это закат солнца, мираж (его ведь можно увидеть отнюдь не только в пустыне), туман, облака, тучи, молния, радуга, гало, эхо. Затем я перехожу к явлениям крупномасштабным. Рассматривая их, приходится обращаться к географической карте. Среди этих явлений много грозных: тайфуны, цунами, извержения вулканов, землетрясения, бури, лавины.

Кроме того, есть логика в том, что те или иные главы соседствуют друг с другом. Миражи поставлены рядом с солнечными закатами, так как главное здесь — рефракция света в атмосфере. Туман, облака, тучи, молния — эта «связка» глав совершенно очевидна. Радуга и гало имеют одну и ту же природу. Органически взаимосвязаны полярные сияния и свечение моря (в обоих случаях мы имеем дело с люминесценцией), эхо и природные сонары, волны на море и нашествия морских волн, вулканы и землетрясения. Последняя «связка» состоит из трех глав — все они посвящены снегу и льду. При обсуждении того или иного явления практически не приходилось «забегать вперед», зато ссылок на предыдущие главы в книге немало. Это также указывает на логичность выбранной последовательности рассмотрения природных



явлений. При всем том следует заметить, что можно было бы, наверное, выбрать и какой-то иной порядок рассмотрения. Думаю, что это не так принципиально.

Читатель В. В книге рассказывается в основном о неживой природе. Не следовало ли уделить побольше внимания живой природе?

Автор. Действительно, физика живой природы рассматривается только в главах «Живой свет», «Природные сонары» и «Калейдоскоп». Главное же внимание в книге уделено неживой природе. В этом есть свой резон — ведь именно в неживой природе законы физики проявляются в наиболее «чистом виде». В живой природе они выступают в теснейшей связи с биологическими законами. Более или менее серьезно говорить о физике в живой природе можно, лишь учитывая одновременно законы биологии. Это — тема отдельной книги. Ее можно было бы назвать, например, «Биофизика в природе».

Читатель Б. Вступительная глава книги начиналась с критики сонета В. Г. Бенедиктова:

Повсюду прелести, везде живые краски.

Для всех природы длань исполнена даров...

Эта критика становится совершенно понятной после того, как познакомишься с молниями, тайфунами, землетрясениями, вулканами, бурями, лавинами. Какие уж там «дары»! Тут погибло десять тысяч человек, там погибло двадцать тысяч...

Автор. В связи с этим вспоминается любопытная сцена из «Звездных дневников Ийона Тихого» Станислава Лема. Ийон попадает на чужую планету в день, когда там в школах проходят экзамены на аттестат зрелости. Его приглашают как почетного гостя на экзамен — и вот перед ним экзаменующийся, который весьма убедительно доказывает, что жизнь на Земле невозможна. Как пишет Лем, «юноша приступил к исчерпывающим, логически построенным рассуждениям, в которых неоспоримо доказал, что большую часть Земли покрывают холодные, чрезвычайно глубокие воды, температура которых около нуля из-за постоянно плавающих ледяных гор; что не только полюсы, но и окружающие их пространства — это районы жестоких вечных холодов и что в течение полугода там царит вечная ночь; что, как отлично видно в астрономические приборы, сушу, даже в областях с более теплым климатом, несколько месяцев в году покрывает замерзший водяной пар, белым слоем лежащий на горах и в низинах, что большая Луна Земли создает на ней приливные и отливные волны, имеющие эрозионное действие, что в атмосфере возникают страшные циклоны, тайфуны и бури и что все вместе взятое полностью исключает возможность существования жизни...».

Читатель Б. А ведь есть еще вулканы, землетрясения, цунами.

Автор. И тем не менее жизнь на Земле существует. В шутке Станислава Лема есть серьезная мысль. Ее высказал в свое время В. Гюго. В романе «Человек, который смеется» В. Гюго писал: «Природа вовсе не так милосердна, как это предполагают». Это очень важно понимать в наше время, когда мир сотрясается конфликтами, вспыхивающими то в одном, то в другом регионе. А между тем как было бы важно объеди-

нить усилия человечества в борьбе против грозных сил природы, как нужно международное сотрудничество для прогноза землетрясений и извержений вулканов, как нужна помощь всех стран по ликвидации последствий катастрофических природных явлений!

Читатель А. Насколько мне известно, такое международное сотрудничество осуществляется. Есть советско-американское соглашение об охране окружающей среды. В его рамках более десяти лет проводятся совместные исследования по прогнозированию землетрясений. Ведутся международные исследования в Антарктиде.

Автор. Думаю, что масштабы подобной деятельности могли бы быть более крупными.

Читатель Б. Как все это непросто — и беречь природу, и бороться с ней.

Автор. Призыв беречь природу — не просто красивый призыв. Мы должны беречь ради людей, которые живут в этой природе и сами являются частью ее. Если сегодня мы не будем активно бороться за поддержание чистоты морей, сохранение лесов и фауны, не примем решительных мер против загрязнения атмосферы, то завтра мы окажемся лицом к лицу с еще более грозными явлениями природы. Это важно понимать, чтобы не возникали иллюзии, будто все само собой образуется, будто природа «все стерпит».

Читатель В. Если вы разрешите, я бы еще раз вернулся к открывающему книгу сонету Бенедиктова. Мне кажется, что фраза «для всех природы длань исполнена даров» в известном смысле справедлива. Почему бы не понимать «дары природы» в том смысле, что природа дарит нам идеи, учит нас, подсказывает нам решение тех или иных проблем?

Автор. Вы высказали хорошую мысль. Признаюсь, когда я критиковал сонет, я как-то не думал о возможности такой трактовки «даров природы».

Читатель В. Наверное, поэтому в книге не нашли отражения вопросы использования природных явлений в технике.

Автор. Нет, не поэтому. Задумывая книгу, я предполагал уделить внимание связи между явлениями природы и различными техническими применениями. Но в процессе работы понял, что это предмет специального разговора. Ведь тогда пришлось бы достаточно подробно рассказать также и о самих технических устройствах и приборах. Все это отвлекло бы от основной линии, а главное, потребовало бы дополнительного (и немалого) объема. Поэтому я, в конечном счете, решил ограничиться природой. К тому же на тему «Физика и техника» написано немало хороших книг.

Читатель В. В целом мне книга понравилась. Я нашел в ней много интересной и полезной информации. Без сомнения, книга заставит многих читателей внимательнее относиться к природе.

Читатель А. Я уже говорил, что мне книга тоже понравилась. Но мне хотелось бы сейчас поговорить о другом.

Автор. Пожалуйста.

Читатель А. Вы сказали, что вряд ли следует по данной книге изучать физику. Я не могу безоговорочно согласиться с этим.



Автор. Но ведь понятно, что эта книга не может рассматриваться как учебник по физике.

Читатель А. Конечно. Я имею в виду другое. Как мне кажется, отсутствие или, точнее, снижение интереса к физике у многих современных молодых людей объясняется не только и не столько тем, что физика — трудный предмет, а скорее тем, что о ней рассказывают и пишут зачастую неинтересно, скучно, казенно. И дело даже не в этом. Просто нас приучают смотреть на физику как на некоторую хотя и важную, но все же специальную науку. Общеизвестно, что литература нужна всем — иначе не будешь культурным человеком, математика нужна многим — ведь на дворе научно-техническая революция. А вот физика, дескать, понадобится в жизни немногим.

Я, конечно, согласен насчет литературы и математики. Но не согласен насчет физики. Я убежден, что физика, как и литература, нужна всем — и потому, что иначе нельзя считать себя сегодня культурным человеком, и потому, что сегодня на дворе научно-техническая революция. Очень важно, что данная книга подчеркивает эту мысль, помогает ее усвоить. Читая, я еще раз почувствовал, что все же физика — наука не узкоспециальная, а общечеловеческая. Конечно, в ней есть много специальных вопросов. Однако в целом это наука, которую нельзя, как я убежден, относить только к точным наукам, она в значительной мере является также гуманитарной.

В свое время кто-то не совсем умно придумал проблему «физиков и лириков», тем самым противопоставив точные и гуманитарные науки. Скорее тут следовало бы говорить о математиках и лириках, хотя я не уверен и в этом. Но уж во всяком случае физика никак не противоречит поэзии; наоборот, у нее с поэзией есть глубокая связь. Тем, кто будет не согласен со мной, я предложу прочитать книгу, которую мы сегодня обсуждаем.

Автор. Меня очень порадовала ваша точка зрения. Между естественными и гуманитарными науками и в самом деле есть внутренняя связь. Рациональное и эмоциональное постижение истины — это единый процесс; тут нельзя оторвать одно от другого. Как и вы, я убежден, что в физике содержится мощный гуманитарный потенциал. Как устроен окружающий нас мир, что лежит в основе его развития, как овладеть силами природы, как совершается процесс познания ее законов — все эти «физические» вопросы, конечно, нельзя считать узкоспециальными; в самом прямом смысле они являются вопросами общечеловеческого плана. Известный физик И. Раби подчеркивал: «Физика составляет сердцевину гуманитарного образования нашего времени». В. Вайскопф в статье «Человеческое ли дело физика?» дает утвердительный ответ на поставленный вопрос: «Физика, бесспорно, человечна. Это можно и нужно показывать, когда мы пишем о физике и преподаем ее».

Читатель А. Поэтому-то физику и следовало бы изучать иначе, чем это делается сейчас. В ней содержится большой гуманитарный потенциал, значит, и изучать ее надо так, чтобы этот потенциал был выявлен. Я понимаю, что данная книга — не учебник физики. Но мне кажется, что изучать физику надо как раз по таким книгам.

А в т о р. При изучении физики необходимы разные книги. Прежде всего должен быть учебник — основная книга, дающая систематизированные представления о физике, ее понятиях, законах, методах. В дополнение к учебнику пишутся различные книги, которые могут отличаться определенным подходом к физическим проблемам, выбором проблем, глубиной их рассмотрения. Среди этих книг соответствующее место займет, как я надеюсь, и данная книга.

Ч и т а т е л ь А. Все-таки мне хочется особо выделить именно те книги, где, как и в данной, дается широкий подход к проблемам, где видна связь этих проблем с общенаучными и, более того, общечеловеческими проблемами. Именно такой подход интересен и нужен всем людям. Уверен, что только при таком подходе можно выйти за рамки специальной науки и продемонстрировать общечеловеческий характер физики, ее гуманитарный потенциал.

А в т о р. Совершенно согласен с вами. Признаюсь, в последние годы меня все более привлекает широкий подход к физическим проблемам. С огромным удовольствием прочитал я написанные именно в таком духе книги О. П. Мороза «В поисках гармонии» (Атомиздат, 1978), А. Б. Мигдала «Поиски истины» (Молодая гвардия, 1983), Е. А. Седова «Одна формула и весь мир» (Наука и прогресс, 1982), Л. И. Пономарева «Под знаком кванта» (Советская Россия, 1984). В последней книге высказана, между прочим, следующая мысль: «Уже давно поэты мечтают не просто о поэзии, а о «поэзии мысли». Ученые, со своей стороны, берутся объяснить желающим «поэзию в науке». И те и другие вышли, наконец, из своих укрытий, дабы разрушить искусственные границы кланов и забыть давние распри о древности рода: нет смысла спорить, какая рука важнее — левая или правая, хотя развиваются и работают они по-разному».

Широкий подход к физике и ее проблемам я старался осуществить в книге, которую мы сегодня обсуждаем. И не только в ней, но и в двух предыдущих книгах: «Этот удивительно симметричный мир» (Просвещение, 1982) и «Мир, построенный на вероятности» (Просвещение, 1984). Все эти книги писались с позиций современной физики. Они адресованы в первую очередь вам — тем, кто вступает в самостоятельную жизнь. Я был бы рад, если бы они хотя бы в какой-то мере помогли вам приобщиться к проблемам этого сложного мира, в познание которого физика внесла и вносит огромный и бесценный вклад.

*Краткая справка о двух предыдущих книгах автора.* Книга «Этот удивительно симметричный мир» состоит из двух частей. Первая часть («Симметрия вокруг нас») посвящена геометрической симметрии; здесь рассматриваются многочисленные проявления симметрии в окружающем нас мире — от симметрии бордюров и орнаментов к симметрии природных объектов, атомов и молекул. Во второй части («Симметрия в основе всего») делается шаг вглубь — шаг от симметрии геометрической к симметрии физических законов; здесь рассказывается о пространственно-временной симметрии, законах сохранения, дискретных симметриях, проблеме физической различимости правого и левого,



кварк-лептонной симметрии. Открывается книга диалогом между автором и читателем о том, что есть симметрия, а завершается беседой о развитии понятия симметрии, о месте и роли симметрии — асимметрии в научном познании мира и человеческом творчестве. Книга адресована в первую очередь молодежи — школьникам старших классов. Значительно расширяя представления о сущности и роли симметрии и асимметрии в окружающем мире, она должна побудить вас задуматься над многими принципиально важными вопросами, почувствовать фундаментальность принципа симметрии, не признающего межпредметных границ и проявляющего себя в равной мере и в физике, и в химии, и в биологии.

Книга «Мир, построенный на вероятности» также состоит из двух частей. Первая часть («Прирученная случайность») показывает читателю, что «мир случайностей» начинается буквально за порогом его комнаты и что в этом мире можно неплохо ориентироваться и активно действовать. Приручение случайности совершается через введение и использование вероятности. Рассмотрев элементы теории вероятностей, автор переходит в данной части книги к обсуждению систем массового обслуживания, сущности и применениям метода Монте-Карло, знакомит с элементами теории игр, началами кибернетики и теории информации. Во второй части книги («Фундаментальность вероятностных законов») показывается, что законы природы в основе своей вероятностные. Говоря о вероятности в классической физике, автор уделяет большое внимание энтропии, ее связи с информацией. Рассматривая вероятность в микромире, он знакомит читателя с идеями квантовой физики, обсуждает принципиальный вопрос о причинности в «вероятностном мире». Наконец, говоря о вероятности в биологии, автор выделяет вопросы случайного комбинирования генов при скрещивании, мутации, эволюционной теории. Перейдя от первой части книги ко второй, читатель должен убедиться, что вероятность не только «вокруг нас», но и «в основе всего». Открывается книга беседой автора с читателем о роли случайности, ее негативных и позитивных сторонах, а завершается итоговой беседой, где обсуждается связь между необходимым и случайным, с одной стороны, и симметрией и асимметрией, с другой. Как и предыдущая, эта книга предназначена прежде всего для школьников. Прочитав ее, вы познакомитесь с современным подходом к явлениям природы и к самой человеческой практике, поймете, что случай может быть не только злом, но и благом, и, возможно, почувствуете красоту и глубину «вероятностного мышления», выходящего за рамки однозначных ответов и жестко predetermined решений.



## КТО ЕСТЬ КТО?

*(Кратко о тех, чьи имена встречаются в книге)*

- Альхазен** (Ибн Аль-Хайтан) (965—1039) — арабский физик, астроном, математик, врач.
- Андерсен Ханс Кристиан** (1805—1875) — датский писатель.
- Анненский Иннокентий Федорович** (1856—1909) — русский поэт.
- Араго Доминик Франсуа** (1786—1853) — французский ученый и политический деятель, член Парижской АН, иностранный член Петербургской АН.
- Ариосто Лудовико** (1474—1533) — итальянский поэт.
- Аристотель** (384—322 до н. э.) — древнегреческий философ и ученый.
- Байрон Джордж Ноэл Гордон** (1788—1824) — английский поэт-романтик.
- Бальзак Оноре де** (1799—1850) — французский писатель.
- Бальмонт Константин Дмитриевич** (1867—1942) — русский поэт-символист.
- Баратынский Евгений Абрамович** (1800—1844) — русский поэт.
- Беллинсгаузен Фадей Фадеевич** (1778—1852) — русский мореплаватель, адмирал.
- Белый Андрей** (Бугаев Борис Николаевич) (1880—1934) — русский советский писатель, один из ведущих деятелей символизма.
- Бенедиктов Владимир Григорьевич** (1807—1873) — русский поэт.
- Блок Александр Александрович** (1880—1921) — русский поэт.
- Бодлер Шарль** (1821—1867) — французский поэт, участник революции 1848 г.
- Бойль Роберт** (1627—1691) — английский физик и химик, член Лондонского королевского общества.
- Бор Нильс Хенрик Давид** (1885—1962) — выдающийся датский физик, один из создателей современной физики, президент Датского королевского общества, иностранный член АН СССР, лауреат Нобелевской премии.
- Броун (Браун) Роберт** (1773—1858) — английский ботаник, иностранный член-корр. Петербургской АН.
- Брюсов Валерий Яковлевич** (1873—1924) — русский советский поэт.
- Бунии Иван Алексеевич** (1870—1953) — русский писатель и поэт, лауреат Нобелевской премии.
- Вайскопф Виктор Фредерик** (р. 1908) — американский физик, член Национальной АН, иностранный член АН СССР.
- Вант-Гофф Якоб Хендрик** (1852—1911) — нидерландский физик и химик, один из создателей физической химии, иностранный член-корр. Петербургской АН, лауреат Нобелевской премии.



- Верн Жюль** (1828—1905) — французский писатель, один из создателей жанра научно-фантастического романа.
- Вернадский Владимир Иванович** (1863—1945) — видный советский ученый, основатель геохимии, биогеохимии, радиогеологии, член Петербургской АН, а позднее академик АН СССР.
- Верхарн Эмиль** (1855—1916) — бельгийский поэт и драматург.
- Воейков Александр Иванович** (1842—1916) — русский климатолог и географ, член-корр. Петербургской АН.
- Волошин** (Кириенко-Волошин) **Максимилиан Александрович** (1877—1932) — русский советский поэт.
- Высоцкий Владимир Семенович** (1938—1980) — советский поэт.
- Вяземский Петр Андреевич** (1792—1878) — русский поэт и литературный критик, член Петербургской АН.
- Гесс Виктор Франц** (1883—1964) — австрийский физик, лауреат Нобелевской премии.
- Гёте Иоганн Вольфганг** (1749—1832) — выдающийся немецкий писатель и поэт, основоположник немецкой литературы нового времени, мыслитель и естествоиспытатель, иностранный член Петербургской АН.
- Гильберт Уильям** (1544—1603) — английский физик.
- Гоголь Николай Васильевич** (1809—1852) — русский писатель.
- Гомер** — легендарный древнегреческий эпический поэт.
- Гончаров Иван Александрович** (1812—1891) — русский писатель.
- Гримм братья: Якоб** (1785—1863) и **Вильгельм** (1786—1859) — немецкие филологи и писатели.
- Гумилев Николай Степанович** (1886—1921) — русский поэт.
- Гюго Виктор Мари** (1802—1885) — французский писатель.
- Даль Владимир Иванович** (1801—1872) — русский писатель, лексикограф, этнограф, член Петербургской АН.
- Данте Алигьери** (1265—1321) — итальянский поэт, создатель итальянского литературного языка.
- Декарт Рене** (Картезий) (1596—1650) — французский философ, физик, математик и физиолог.
- Децим Магн Авсоний** — римский поэт IV в.
- Диккенс Чарлз** (1812—1870) — английский писатель.
- Доплер Кристиан** (1803—1853) — австрийский физик, математик и астроном, член Австрийской АН.
- Дудин Михаил Александрович** (р. 1916) — советский поэт.
- Еврипид** (около 480—406 до н. э.) — древнегреческий драматург.
- Есенин Сергей Александрович** (1895—1925) — русский советский поэт.
- Жолио-Кюри Фредерик** (1900—1958) — французский физик и общественный деятель, председатель Всемирного Совета Мира, член Парижской АН, иностранный член АН СССР.
- Жуковский Василий Андреевич** (1783—1852) — русский поэт.

**Заболоцкий** Николай Алексеевич (1903—1958) — русский советский поэт.  
**Захаров** Владимир Григорьевич (1901—1956) — советский композитор, народный артист СССР.  
**Золя** Эмиль (1840—1902) — французский писатель.

**Исаковский** Михаил Васильевич (1900—1973) — русский советский поэт.

**Капица** Петр Леонидович (1894—1984) — выдающийся советский физик, один из создателей физики низких температур и физики сильных магнитных полей, академик АН СССР, лауреат Нобелевской премии.

**Кент** Рокуэлл (1882—1971) — американский художник, писатель, общественный деятель.

**Кеплер** Иоганн (1571—1630) — немецкий астроном, физик и математик, один из создателей астрономии нового времени.

**Кёрай** (1651—1704) — японский поэт.

**Киплинг** Джозеф Редьярд (1865—1936) — английский писатель, лауреат Нобелевской премии.

**Костылев** Валерий Иванович (1884—1950) — советский писатель.

**Крылов** Алексей Николаевич (1863—1945) — советский кораблестроитель, механик и математик, член Петербургской АН, а позднее академик АН СССР.

**Кусто** Жак Ив (р. 1910) — французский океанограф.

**Левитан** Исаак Ильич (1860—1900) — русский художник.

**Лермонтов** Михаил Юрьевич (1814—1841) — русский писатель и поэт.

**Ломоносов** Михаил Васильевич (1711—1765) — великий русский ученый, поэт, художник, историк, основатель Московского университета, первый русский академик (член Петербургской АН).

**Лонгфелло** Генри Уодсуорт (1807—1882) — американский поэт.

**Лондон** Джек (Гриффит Джон) (1876—1916) — американский писатель.

**Лоренц** (Лорентц) Хендрик Антон (1853—1928) — нидерландский физик, член Нидерландской АН, иностранный член АН СССР, лауреат Нобелевской премии.

**Лоррен** (Желле) Клод (1600—1682) — французский художник.

**Лукреций** (Тит Лукреций Кар) — римский поэт и философ-материалист, живший в I в. до н. э.

**Лю Дабай** (1880—1932) — китайский поэт.

**Майков** Аполлон Николаевич (1821—1897) — русский поэт, член-корр. Петербургской АН.

**Мандельштам** Леонид Исаакович (1879—1944) — советский физик, один из основателей научной школы по радиофизике в СССР, академик АН СССР.

**Мартынов** Леонид Николаевич (р. 1905) — русский советский поэт.

**Маяковский** Владимир Владимирович (1893—1930) — русский советский поэт, реформатор поэтического языка.

**Миннарт** Марсел (1893—1970) — нидерландский астрофизик.

**Моне** Клод (1840—1926) — французский художник-импрессионист.

**Нансен** Фритъоф (1861—1930) — норвежский исследователь Арктики, иностранный член Петербургской АН, лауреат Нобелевской премии.

**Низами** (Низами-Гянджеви) Абу Мухаммед Ильяс ибн Юсуф (около 1140—1210) — азербайджанский поэт и мыслитель.



**Ньютон** Исаак (1643—1727) — великий английский физик, математик, механик, астроном, создатель классической физики, президент Лондонского королевского общества.

**Обинье** Теодор Агриппа (1552—1630) — французский поэт и историк.

**Островой** Сергей Григорьевич (р. 1925) — советский поэт.

**Островский** Александр Николаевич (1823—1886) — русский драматург.

**Паустовский** Константин Георгиевич (1892—1968) — русский советский писатель.

**Петрарка** Франческо (1304—1374) — итальянский поэт, основоположник итальянской национальной поэзии.

**Пири** Роберт Эдвин (1856—1920) — американский полярный путешественник, адмирал.

**Платон** (428—348 до н. э.) — древнегреческий философ.

**Птолемей** Клавдий (около 90—160) — древнегреческий астроном.

**Пушкин** Александр Сергеевич (1799—1837) — великий русский писатель и поэт, родоначальник новой русской литературы, создатель русского литературного языка.

**Раби** Изидор Айзек (р. 1898) — американский физик, член Национальной АН, лауреат Нобелевской премии.

**Райнис** Янис (Плиекшанс) (1865—1929) — народный поэт Латвийской ССР, общественный деятель.

**Рихман** Георг Вильгельм (1711—1753) — русский физик, член Петербургской АН.

**Рэлей** (Стретт Джон Уильям) (1842—1919) — английский физик, президент Лондонского королевского общества, иностранный член Петербургской АН, лауреат Нобелевской премии.

**Свифт** Джонатан (1667—1745) — английский писатель.

**Сенека** Луций Анней (около 4 г. до н. э.— 65 г. н. э.) — римский политический деятель, философ, писатель.

**Серафимович** (Попов) Александр Серафимович (1863—1949) — русский советский писатель.

**Смолуховский** Мариан (1872—1917) — польский физик.

**Спалланцани** Ладзаро (1729—1799) — итальянский натуралист.

**Суриков** Иван Захарович (1841—1880) — русский поэт.

**Такамура** Оно-но — японский поэт XII в.

**Тиндаль** Джон (1820—1893) — английский физик, член Лондонского королевского общества.

**Тихов** Гавриил Андрианович (1875—1960) — советский астроном, член-корр. АН СССР.

**Толстой** Алексей Константинович (1817—1875) — русский писатель и поэт, член-корр. Петербургской АН.

**Торричелли** Эванджелиста (1608—1647) — итальянский физик и математик.

**Тургенев** Иван Сергеевич (1818—1883) — русский писатель.

**Тютчев** Федор Иванович (1803—1873) — русский поэт, член-корр. Петербургской АН.

**Ушаков** Георгий Алексеевич (1901—1963) — географ, исследователь Арктики.

**Федоров** Александр Митрофанович (1868—1949) — русский поэт.

**Фег** (Шеншин) Афанасий Афанасьевич (1820—1892) — русский поэт.

**Фламмарин** Камиль (1842—1925) — французский астроном.

**Флемстид Джон** (1646—1719) — английский астроном.

**Франклин Бенджамин** (1706—1790) — американский просветитель, ученый, государственный деятель, иностранный член Лондонского королевского общества и Петербургской АН.

**Хокусай Кацусика** (1760—1849) — японский живописец и рисовальщик.

**Цераский Витольд Карлович** (1849—1925) — русский советский астроном, член-корр. Петербургской АН.

**Цураюки Ки-но** — японский поэт, живший в X в.

**Цюй Цюбо** (1899—1935) — китайский поэт.

**Чайковский Петр Ильич** (1840—1893) — выдающийся русский композитор, крупнейший симфонист, музыкальный драматург и лирик.

**Чоконан-Витез Михай** (1773—1805) — венгерский поэт.

**Шекспир Уильям** (1564—1616) — выдающийся английский драматург и поэт, крупнейший гуманист эпохи позднего Возрождения.

**Шелли Перси Биш** (1792—1822) — английский поэт-романтик.

**Шефнер Вадим Сергеевич** (р. 1915) — советский писатель и поэт.

**Шиллер Иоганн Фридрих** (1759—1805) — немецкий поэт и драматург, один из основоположников немецкой классической литературы.

**Щербина Николай Федорович** (1821—1869) — русский поэт.

**Эванс Артур Джон** (1851—1941) — английский археолог.

**Эйнштейн Альберт** (1879—1955) — выдающийся физик, один из создателей современной физики, член многих академий наук и научных обществ, в частности иностранный член АН СССР, лауреат Нобелевской премии. Родился в Германии, в 1933 г. эмигрировал в США.





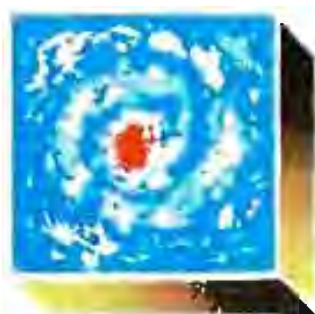
## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Алексеева Л. М. Небесные сполохи и земные заботы.— М.: Знание, 1985.
- Булат В. Л. Оптические явления в природе.— М.: Просвещение, 1974.
- Бялко А. В. Наша планета — Земля.— М.: Наука, 1983.
- Варикаш В. М., Кимбар Б. А., Варикаш И. М. Физика в живой природе.— Минск: Народная асвета, 1984.
- Владимиров А. В. Рассказы об атмосфере.— М.: Просвещение, 1981.
- Галактионов С. Г., Юрин В. М. Ботаники с гальванометром.— М.: Знание, 1979.
- Гительзон И. И. Живой свет океана.— М.: Наука, 1976.
- Гриффин Д. Эхо в жизни людей и животных: Пер. с англ.— М.: Физматгиз, 1961.
- Дюнин А. К. В царстве снега.— Новосибирск: Наука, 1983.
- Ильченко В. Р. На перекрестках физики, химии и биологии.— М.: Просвещение, 1986.
- Имянитов И. М., Чебарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.
- Кадомцев Б. Б., Рыдник В. И. Волны вокруг нас.— М.: Знание, 1981.
- Кан С. И. Океан и атмосфера.— М.: Наука, 1982.
- Лилли Дж. Человек и дельфин: Пер. с англ.— М.: Мир, 1965.
- Лосев К. С. По следам лавин.— Л.: Гидрометеиздат, 1983.
- Мизун Ю. Г. Полярные сияния.— М.: Наука, 1983.
- Миннарт М. Свет и цвет в природе: Пер. с англ.— М.: Наука, 1969.
- Молэн П. А. Охотники за тайфунами: Пер. с франц.— М.: Мир, 1967.
- Морозов В. П. Занимательная биоакустика.— М.: Знание, 1983.
- Муранов А. П. В мире необычных и грозных явлений природы.— М.: Просвещение, 1977.
- Наливкин Д. В. Ураганы, бури и смерчи.— М.: Наука, 1969.
- Никонов А. А. Землетрясения: прошлое, современность, прогноз.— М.: Знание, 1984.
- Патерсон У. С. Б. Физика ледников: Пер. с англ.— М.: Мир, 1984.
- Паундер Э. Физика льда: Пер. с англ.— М.: Мир, 1967.
- Раст Х. Вулканы и вулканизм: Пер. с нем.— М.: Мир, 1982.
- Резанов И. А. Атлантида: фантазия или реальность? — М.: Наука, 1975.
- Росс Д. Энергия волн: Пер. с англ.— Л.: Гидрометеиздат, 1981.
- Сергеев Б. Ф. Живые локаторы океана.— Л.: Гидрометеиздат, 1980.
- Стафеев К. Г. Жизнь вулкана.— М.: Просвещение, 1982.
- Стаханов И. П. О физической природе шаровой молнии.— М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Тарасов Л. В., Тарасова А. Н. Беседы о преломлении света.— М.: Наука, 1982.
- Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество: Пер. с англ.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.
- Шулейкин В. В. Очерки по физике моря.— М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962.
- Щетников Н. А. Цунами.— М.: Наука, 1981.



## СОДЕРЖАНИЕ

Обращение автора к читателю . . . . . 3



Импровизация. **Природа и человек** . . . . . 5

*Тема первая.*

Во все века жила, затаена,  
Надежда — вскрыть все таинства природы.

*Тема вторая.*

Ты открой мне, природа, объятья,  
Чтоб я слился с красою твоей.



Глава 1. **Закат солнца** . . . . . 17

Удивительное в солнечных закатах. Красный цвет заходящего солнца и голубой цвет дневного неба. Рефракция света в атмосфере. Небольшой исторический экскурс. Сплюснутость заходящего солнечного диска. Зеленый луч. Объяснение появления «слепой полосы». Кажущееся увеличение размеров заходящего солнца.



Глава 2. **Мираж** . . . . . 33

Некоторые виды миражей. Искривление светового луча в оптически неоднородной среде. Радиус кривизны светового луча. Объяснение нижнего («озерного») миража. Простые верхние миражи. Двойные и тройные миражи. Миражи сверхдальнего видения.



Глава 3. **Туман** . . . . . 45

Туман глазами внимательного наблюдателя. Туман под микроскопом. Насыщенный водяной пар. Задача, имеющая отношение к возникновению тумана. Возникновение тумана. Туманы испарения и туманы охлаждения. Некоторые подробности физики возникновения тумана. Туман и цвет.





**Глава 4. Облака . . . . . 57**

Облачное небо. Земная атмосфера. Адиабатное расширение газа. Как образуются облака. Кучевое облако. Микрофизика облаков. Осадки. Серебристые облака.



**Глава 5. Грозовая туча . . . . . 77**

Гроза глазами внимательного наблюдателя. Восходящие и нисходящие воздушные потоки в грозовой туче. Два вопроса, касающиеся физики процессов в туче. Электрические заряды в туче. Атмосферное электричество. Как быстро могла бы разрядиться Земля? Почему происходит разделение зарядов в туче или облаке.



**Глава 6. Молния . . . . . 91**

Постижение природы молнии. Какие бывают молнии. «Паспортные данные» линейной молнии. Физика линейной молнии, проскакивающей между тучей и землей. Гром.



**Глава 7. Шаровая молния . . . . . 101**

Наблюдения шаровой молнии. Как выглядит шаровая молния? Как она себя ведет? Сколько энергии содержится в шаровой молнии? Опасна ли шаровая молния? Как она возникает? Как часто она появляется? О физической природе шаровой молнии.



**Глава 8. Радуга . . . . . 115**

Радуга глазами внимательного наблюдателя. Развитие представлений о физике возникновения радуги. Ход светового луча в капле дождя. Наибольший угол между падающим на каплю и выходящим из нее лучами. Объяснение возникновения дополнительной радуги. Чередование цветов в основной и дополнительной радугах. Влияние размеров капель на вид радуги. Радуга на других планетах. Физика и красота.



**Глава 9. Гало . . . . . 131**

Структура гало в общем случае. Гало, наблюдаемые в действительности. Общие замечания о физике гало. Наименьший угол отклонения луча в призме. Объяснение возникновения малого гало. Большое гало. Горизонтальный (парелический) круг, светящиеся столбы и кресты. Ложные солнца; парантелии.



**Глава 10. Полярное сияние . . . . . 141**

Формы полярных сияний. Где и когда они наблюдаются. Что такое полярное сияние. Сила Лоренца; векторное произведение двух векторов. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Особенности движения заряженной частицы в неоднородном магнитном поле. Магнитное поле Земли. Люминесценция. Электронные полярные сияния. Протонные полярные сияния. Магнитные бури.



**Глава 11. Живой свет . . . . . 165**

Свечение моря. Светящиеся организмы. Особенности свечения живых организмов. Хемилюминесценция. Биолуминесценция как особый вид хемилюминесценции. Зачем они светятся?



**Глава 12. Эхо . . . . . 175**

Удивительное эхо. Мир звуков. Эхо однократное и многократное. Искривление звукового луча в акустически неоднородной среде. Когда существенна длина звуковой волны? Эффект Доплера.



**Глава 13. Природные сонары . . . . . 187**

Сонары летучих мышей. Летучая мышь на охоте. Локационные сигналы летучих мышей. Удивительные свойства природных сонаров. Сонар дельфина. Два типа слуха дельфинов. Другие природные сонары.



**Глава 14. Волны на море . . . . . 197**

Такие разные волны. Ветровые волны глазами внимательного наблюдателя. Скорость волн на глубокой и мелкой воде. Движение частиц в волне. Ветер и волны. Волны на мелководье. Рифели.



**Глава 15. Нашествие волн . . . . . 215**

Бедствия, причиняемые волнами цунами. Закономерности цунами. Физика цунами. Бедствия, причиняемые тропическими циклонами. Физика тропического циклона. Штормовые приливы. Ленинградские наводнения.





**Глава 16. Вулканы и гейзеры . . . . . 233**

Некоторые вулканические катастрофы. Путешествие в недра Земли. Концепция тектоники литосферных плит. Вулканы. Характер вулканических извержений. Роль вулканических газов. Что такое гейзер. Физика гейзера. Гейзеры и обычные термальные источники.



**Глава 17. Землетрясение . . . . . 251**

Бедствия, причиняемые землетрясениями. Основные понятия и характеристики. Три типа землетрясений. География тектонических землетрясений. Что происходит в очаге землетрясения? К вопросу о предсказании землетрясений.



**Глава 18. Снег и лед . . . . . 263**

Снежинки в воздухе. Этот изменчивый снег. Снежинки на земле. Слоистая структура снежных покровов. Десять вопросов — десять ответов. Что такое режеляция. Лед на Земле. Горный ледник. Движение ледника. Практическое снеговедение.



**Глава 19. Метель . . . . . 285**

Какие бывают метели. Микроструктура низовых метелей. Волны на снегу. Как далеко переносится снег метелью. Горные метели. Пылевые бури и метели: сходство и различия. Метелевое электричество.



**Глава 20. Лавина . . . . . 297**

География лавин. Когда рождаются лавины. Почему они рождаются (физика возникновения лавин). Внимание! Лавина. Борьба с лавинной опасностью.



Почему море начинает замерзать от берегов? Как происходит замерзание морской воды? Почему молодой морской лед настолько эластичен, что может изгибаться на волнах? Почему в открытом море образуется твердый полярный лед (паковый лед)? Почему вода, получаемая при таянии многолетнего полярного льда, пригодна для питья? — Почему реки извиваются? Почему на повороте реки один берег, как правило, крутой, а другой — пологий? Почему у крутого берега глубоко, а у пологого мелко? — Почему в озеро втекает много рек, а вытекать может только одна? — Почему деревья не растут до неба? Почему особенно крупные животные не бывают грациозными? Почему на суше нет животных крупнее слона? Почему самые крупные животные сохранились в море? Почему не встречаются млекопитающие размером с муху? Почему слон флегматичен, а мышь, напротив, очень подвижна? — Почему так прочна скорлупа куриного яйца? Почему стебель злаков (соломина) внутри пустой? Почему кости так прочны и в то же время относительно легки? Почему у некоторых растений листья имеют складчатую форму? — Почему человеческая рука представляет собой столь совершенный рычаг? — Почему соки поднимаются по стволу дерева от корней к листьям? Почему начавшая вянуть срезанная ветка оживает, когда ее ставят в воду? Почему вода поступает внутрь животных и растительных клеток, обеспечивая тем самым их жизнедеятельность? — Почему некоторые племена Южной Америки считают мясо угрей целебным? Почему скату не надо гоняться за добычей? Почему рыбы могут охотиться ночью и в совершенно мутной воде? Почему сокращается мышца? Почему возникают биопотенциалы? Как передается нервное возбуждение?

Заключение. <i>Беседа за круглым столом</i> . . . . .	334
Кто есть кто? . . . . .	341
Кратко о тех, чьи имена встречаются в книге	
Дополнительная литература . . . . .	346



**Лев Васильевич Тарасов**

## **ФИЗИКА В ПРИРОДЕ**

Зав. редакцией

*И. А. Иванов*

Редактор

*О. В. Серышева*

Младший редактор

*О. В. Агапова*

Художники

*В. П. Лухина, С. Ф. Лухин*

Макет

*Е. В. Богдановой*

Художественный редактор

*В. М. Прокофьев*

Технические редакторы

*Е. В. Богданова, Н. Н. Матвеева*

Корректоры

*Н. В. Бурдина, Л. С. Вайтман*

ИБ № 9955

Сдано в набор 01.09.87. Подписано к печати 06.11.87. Формат  $70 \times 90^{1/16}$ . Бумага офсетная № 1. Гарн. Балтика. Печать офсетная. Усл. печ. л.  $25,74 + 0,29$  форз. Усл. кр.-отт.  $104,71$ . Уч.-изд. л.  $25,71 + 0,37$  форз. Тираж 100 000 экз. Заказ 1528. Цена 2 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Калининский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. 170040, Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.

