

физика повседневности

ОТ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ
ДО КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

LE KALÉIDOSCOPE DE LA PHYSIQUE

Attilio Rigamonti, Andrey Varlamov, Jacques Villain

Андрей Варламов
Жак Виллен
Аттилио Ригамонти

ФИЗИКА ПОВСЕДНЕВНОСТИ

ОТ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ
ДО КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПЕРЕВОД С ФРАНЦУЗСКОГО



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

МОСКВА 2020

УДК 53
ББК 22.3
В18

Переводчик Мария Прилуцкая
Научный редактор Сергей Парновский, д-р физ.-мат. наук
Редактор Александра Бачурина

Варламов А.

В18 Физика повседневности. От мыльных пузырей до квантовых технологий / Андрей Варламов, Жак Виллен, Аттилио Ригамонти ; Пер. с фр. — М.: Альпина нон-фикшн, 2020. — 334 с.

ISBN 978-5-00139-107-4

Почему при течении воды в реках возникают меандры? Как заставить бокал запеть? Можно ли построить переговорную трубку между Парижем и Марселем? Какие законы определяют форму капель и пузырьков? Что происходит при приготовлении жаркого? Можно ли попробовать спагетти альденте на вершине Эвереста? А выпить там хороший кофе? На все эти вопросы, как и на многие другие, читатель найдет ответы в этой книге.

Каждая страница книги приглашает удивляться, хотя в ней обсуждаются физические явления, лежащие в основе нашей повседневной жизни. В ней не забыты и последние достижения физики: авторы посвящают читателя в тайны квантовой механики и сверхпроводимости, рассказывают о физических основах магнитно-резонансной томографии и о квантовых технологиях.

От главы к главе читатель знакомится с неисчислимыми гранями физического мира. Отмеченные Нобелевскими премиями фундаментальные результаты следуют за описаниями, казалось бы, незначительных явлений природы, на которых тем не менее и держится все величественное здание физики.

УДК 53
ББК 22.3

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru

ISBN 978-5-00139-107-4 (рус.)
ISBN 978-2701164878 (фр.)

© Attilio Rigamonti, Andrey Varlamov, Jacques Villain, 2014
© Издание на русском языке, перевод, оформление.
ООО «Альпина нон-фикшн», 2020

**Издание подготовлено в партнерстве
с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория»
(при финансовой поддержке Н.В. Каторжнова).**



ТРАЕКТОРИЯ

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

Содержание

Благодарности 9

Предисловие 10

ЧАСТЬ 1. ФИЗИКА ВОКРУГ НАС

Глава 1 Реки, меандры и озера 14

Глава 2 Искусственные и природные волноводы 21

Глава 3 Цвета моря и неба 29

Глава 4 Маятник Фуко и сила Кориолиса 42

Глава 5 Морские приливы и отливы 55

Глава 6 Капли и пузыри 64

Глава 7 Климат: почему лето становится жарче? 78

Глава 8 Следы на песке 93

Глава 9 От кристаллических снежинок к аморфному стеклу 103

ЧАСТЬ 2. ФИЗИКА ПОВСЕДНЕВНОСТИ

Глава 10 Беседа в поезде 114

Глава 11 Наследие Страдивари 124

Глава 12 Поющие и безмолвствующие бокалы 135

Глава 13 Энергия: покорная служанка или деспотичная хозяйка? 141

Глава 14 Nunc est bibendum 153

ЧАСТЬ 3. ФИЗИКИ НА КУХНЕ

Глава 15	В ожидании чашки чая.....	168
Глава 16	Физика на кухне	178
Глава 17	Ab ovo	189
Глава 18	В размышлениях о приготовлении пиццы	199
Глава 19	Макароны, спагетти и физика	208
Глава 20	Физика хорошего (и плохого) кофе.....	217
Глава 21	Наука, приготовление пицци и мороженое из жидкого азота.....	227

ЧАСТЬ 4. СТРАННЫЙ КВАНТОВЫЙ МИР

Глава 22	Неопределенность — основа квантовой физики	234
Глава 23	Физика, геометрия и красота.....	249
Глава 24	Вечное движение в сверхпроводниках.....	255
Глава 25	Применение сверхпроводников	272
Глава 26	Снежки из гелия.....	284
Глава 27	МРТ заглядывает внутрь нас.....	290
Глава 28	Полупроводники и нанофизика.....	301
Библиография.....		317
Предметно-именной указатель		323
Список иллюстраций		329

Благодарности

Авторы посвящают эту книгу своим внукам, которые вступают в мир, преображенный физиками; мир, значительно отличающийся от того, который в соответствующем возрасте открывался их бабушкам и дедушкам; мир более удобный, где куда сложнее заскучать, но где по-прежнему не так-то просто найти свое место и обрести счастье:

Маргерит Селене Строщи Ригамонти,
Матильде и Лукасу Шмитт,
Михаилу Варламову.

Наконец, мы благодарим всех, кто согласился критически прочесть нашу рукопись, и тех, кто, насколько это возможно, помог нам не потеряться среди повседневных проявлений физики и найти наш путь в сложнейшей науке, о которой не знают всего даже профессионалы.

В частности: Алена Аспекта, Джузеппе Балестрино, Себастьяна Балибара, Клода Бертъе, Патрика Брюно, Марка де Буасьё, Александра Буздина, Элен Бушиа, Александра Валанса, Юрия Гальперина, Сильвию Герен, Юрия Ерина, Мориса Голдмана, Дениса Гратиаса, Изабель Грило, Гая Делавала, Роберта Дотрэ, Анн-Мари Казаба, Кристиана Кароли, Дэвида Кере, Жака Ламберта, Дмитрия Ливанова, Уильяма-Луи Мама, Валери Массон-Дельмот, Кейзо Мурата, Филиппа Нозьера, Сергея Парновского, Жан-Луи Потра, Пьера Пуна, Оливье Пьер-Луи, Реймонда Пьерумбера, Альберта Стасенко, И. Сайто, Сергея Салихова, Стефанию Тантони, Эрве Тис, Игоря Тралле, Стефана Фова, Жан-Пьера Халина, Кэтрин Хил, Алексея Чепелянского, Сергея Шарапова, Даниела Эстива.

Предисловие

Мы не всегда осознаем, насколько наша повседневная жизнь наполнена проявлениями физики. Эта книга адресована тем, кто хочет понять окружающие нас удивительные природные явления. Почему небо голубое? Как появляется радуга? Что вызывает приливы и отливы? Почему пивная и морская пена белого цвета? На эти и другие вопросы мы отвечаем в первой части.

Список физических явлений, с которыми мы сталкиваемся каждый день, значительно обогатил сам человек. Как работают микроволновая печь или индукционная плита? Как вырабатывается электрическая энергия? Окружающие нас изобретения стали предметом рассмотрения второй части этой книги.

Третья часть — гастрономическая. Она посвящена искусству наших друзей — поваров. Если один цыпленок в два раза больше другого, его нужно жарить в два раза дольше? Конечно, мы не собираемся учить поваров готовить, но, возможно, сумеем ответить на некоторые вопросы, возникающие в связи с их искусством, или, по крайней мере, предложим им интересное занятие на то время, пока очередное блюдо томится в духовке.

Четвертая, заключительная часть — наиболее амбициозная. В ней мы пытаемся прояснить некоторые из самых загадочных аспектов современной науки, объяснить, как в течение последнего столетия привычный взгляд на природу коренным образом изменился благодаря открытой в начале века новой области физики — квантовой механике; и как на пороге нового тысячелетия эти потрясения стали предметом непосредственных экспериментальных наблюдений.

Не слишком ли на многое мы замахнулись? Надеемся, что читатель, изучая первые три части, обретет вдохновение и усердие, необходимые для освоения четвертой части.

Мы предполагаем, что наш читатель обладает некоторой научной подготовкой — будет достаточно математического багажа бакалавра. Но, насколько это возможно, мы избегали сложностей и использовали простой язык. Точно так же мы по мере возможности старались обходиться без уравнений и формул, но иногда они упрощают восприятие. Когда опускаются целые страницы вычислений, то время от времени одно или два уравнения разбавляют монотонность научного текста и привлекают внимание там, где это необходимо. В любом случае наш читатель имеет большое преимущество по сравнению с работающим с учебником старшеклассником

или студентом: он может пропустить отрывки, которые покажутся ему чересчур сложными или, наоборот, элементарными, и обратиться к другим главам, которые, как мы надеемся, придутся ему по вкусу.

Чтобы разбудить читателя, задремавшего за чтением, мы предлагаем несколько упражнений: задачи и несложные эксперименты.

Книга во многом навеяна работами выдающихся ученых, в том числе публикациями рано ушедшего из жизни замечательного физика и популяризатора науки Льва Асламазова. Главы 1, 4, 6 и 8 развивают темы, которым он посвятил ряд статей. Другие главы представляют темы, рассматриваемые ранее в книгах «Удивительная физика» А. Варламова и Л. Асламазова и «Чудесный калейдоскоп физики» (Rigamonti A., Varlamov A. *Magico caleidoscopio della fisica*. La Goliardica Paveze, 2007). Все они были дополнены и обновлены.



Физика вокруг нас

Согласно этимологии, физика — это наука о природе (др.-греч. φύσις) или, по меньшей мере, о природных явлениях. Действительно, созерцание этих явлений поставило перед людьми первые вопросы физики: среди них, например, приливы, поразившие марсельца Пифея, когда он направил свой корабль за пределы родного Средиземного моря; радуга, возникновение которой объяснил Декарт; видимое движение планет на небе, ошибочно описанное Аристотелем и стоившее многих неприятностей Галилею; форма капель и пузырей, интересовавшая Пьера-Симона Лапласа и Томаса Юнга. Многие из этих, казалось бы, простых вопросов нашли свои ответы только в XIX веке. И в прошлом столетии Альберт Эйнштейн все еще задавался вопросом о форме излучин реки... Некоторым из этих явлений мы и посвящаем первую часть книги.

Реки, меандры и озера

Течение воды в реке — сложный процесс, который происходит в неоднородной среде. Хотя наука не объясняет всех нюансов ее движения, она дает ключ к пониманию основных свойств этого явления.

Сколько раз, гуляя по тропе вдоль ручья или реки, мы задавались вопросом: почему поток вместо кратчайшего пути (прямой линии) петляет из стороны в сторону? Конечно, некоторые его части почти прямые — из-за особенностей рельефа местности или проложенного человеком русла. Однако, когда водный поток свободно распространяется по равнине, обычно он вырисовывает петли и изгибы. Иногда образующиеся петли повторяются относительно регулярно (илл. 1). Как объяснить появление этих излучин, или меандров?

Чайники в чашке...

Одним из первых, кто задумался о причинах формирования этих изгибов, был Альберт Эйнштейн. В 1926 году он представил Прусской академии наук доклад без каких-либо уравнений, озаглавленный «Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра». В чем же суть этого знаменитого закона? Основываясь на наблюдениях выдающихся географов XIX века, естествоиспытатель Карл Бэр пришел к выводу, что в Северном полушарии, в равнинной местности, правый берег рек обычно более крут, чем левый, а в Южном полушарии все наоборот: левый берег круче правого.

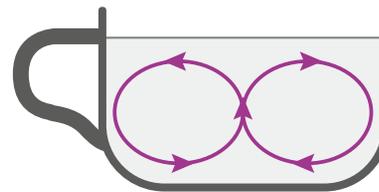
Прежде чем перейти к изучению излучин рек и формы берегов, Эйнштейн предлагает поставить небольшой опыт, воспроизводящий повседневное привычное нам действие: размешать ложечкой сахар в чашке чая. В этом эксперименте Эйнштейна заинтересовало явление, которое на первый взгляд кажется противоречащим здравому смыслу: вызываемое ложкой вращение жидкости создает вертикальные вихри (илл. 2). Чтобы их увидеть, Эйнштейн добавляет в воду чайники. При размешивании жидкости ложкой видно, что чайники собираются в центре дна чаш-



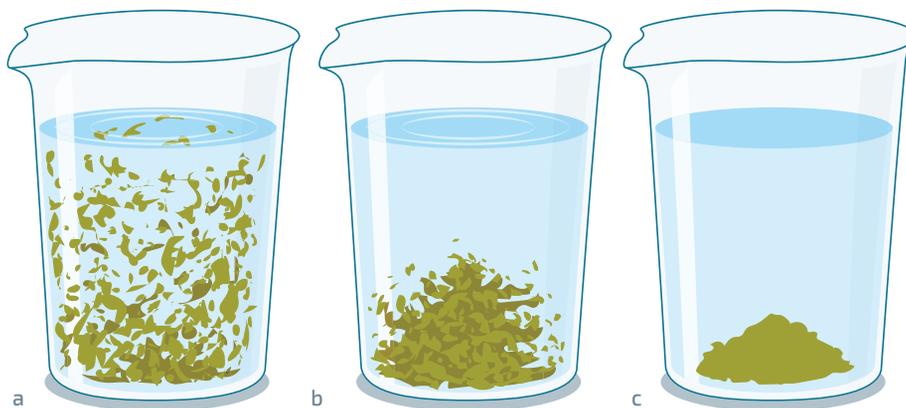
ки (илл. 3). Предлагаем читателю убедиться в этом самостоятельно!

Вот как Эйнштейн объясняет это явление: в результате вращения на жидкость действует центробежная сила, отбрасывающая ее от оси вращения, и она тем сильнее, чем быстрее вращение (см. главу 4, с. 50). У стенок чашки жидкость тормозится трением, поэтому вращается немного медленнее, чем в центре чашки. «В частности, — добавляет Эйнштейн, — угловая скорость вращения, а следовательно, и центробежная сила у дна

1. Излучины реки Снейк («Змея»), США

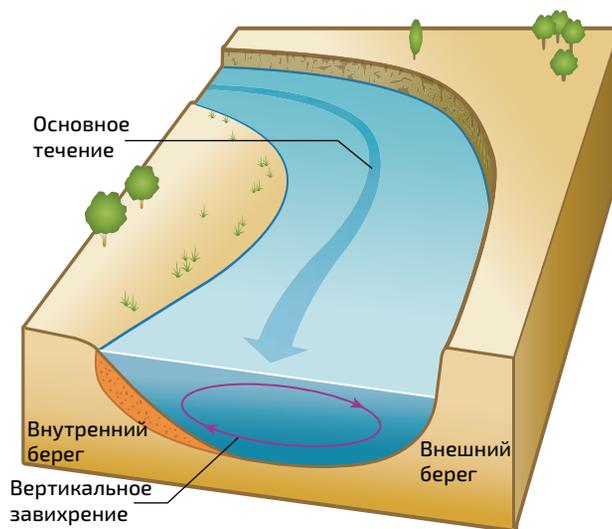


2. При размешивании воды в чашке ложечкой в жидкости образуются вертикальные вихри



3. Опыт Эйнштейна. Воду с чайинками размешивают ложечкой (а). Вскоре чайинки собираются в центре стакана (б) и в конечном итоге опускаются на дно (с). Их движение доказывает наличие вертикальных вихрей, хотя их существование, кажется, противоречит интуиции

4. Циркуляция воды на изгибе реки по Эйнштейну. Центробежная сила, направленная от внутреннего берега к внешнему, действует в каждой точке жидкости. Но вблизи дна ее действие уменьшается из-за трения, и в основном потоке возникает вертикальная циркуляция. Она захватывает песок с внешнего берега и относит во внутреннюю часть меандра

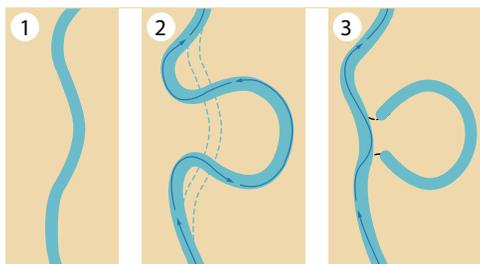


чашки меньше, чем у краев. Таким образом возникает циркуляция жидкости, показанная на илл. 2, которая и заставляет чайники собираться в центре чашки».

Как меняется русло рек?

Теперь проанализируем движение воды в той части реки, где она образует излучину. Оно аналогично движению воды в чашке, отмечает Эйнштейн. Так же как жидкость в ходе эксперимента тормозилась стенками чашки, скорость потока уменьшается трением в непосредственной близости от дна: таким образом, центробежная сила, направленная наружу от поворота, здесь меньше, чем у поверхности. Таким образом, возникает вертикальная циркуляция, обращенная во внешнюю сторону излучины около поверхности и внутрь вблизи дна (илл. 4).

Это завихрение переносит внутрь изгиба землю и гальку, которые вымывает из внешнего берега. На внутреннем берегу образуется намыв точно так же, как возникал «нанос» чайнок в центре дна чашки в предыдущем опыте. В обоих случаях, когда вода поднимается и под действием силы тяжести оставляет все, что влекла за собой, происходит осаждение. Эрозия внешнего берега и намыв на внутреннем берегу постепенно превращают едва заметный изгиб в меандр с крутым внешним и пологим внутренним берегом.



5. Изгиб реки, поначалу умеренный (1), постепенно увеличивается, образуя излучину с отложением нанесенного песка на внутреннем берегу (2), а затем приводит к образованию острова или озера в форме подковы (3)

Вследствие продолжающейся эрозии русло реки, скорее всего, в конце концов сольется у начала и конца изгиба и возникнет остров (илл. 5 и 6).

Вышеизложенные соображения делают понятным различие между



формой внешнего и внутреннего берегов в излучине, но это еще не все. Как объяснить закон Бэра, согласно которому формы правого и левого берегов различны не только на излучинах? И как объяснить наблюдения географов, которые указывают, что в Северном и Южном полушариях крутость берегов противоположна? Читатель уже догадывается, что здесь, вероятно, играет важную роль вращение Земли, мы вернемся к нему на с. 53.

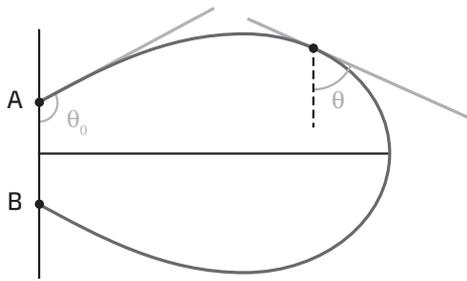
6. Меандр Сены в Лез-Андели, вид на замок Шато-Гайяр и остров. Внешний берег крутой, а внутренний — пологий

Какую форму принимают меандры?

Форма русла реки во многом зависит от рельефа местности, по которой река протекает. В районе с неоднородным ландшафтом река петляет, избегая неровностей и выбирая путь с наибольшим уклоном. Но и на равнине прямолинейность русла не сохраняется. Небольшой обвал земли или падение дерева на берегу заставляют поток образовать изгиб, который может постепенно увеличиваться, образуя меандр в соответствии с описанным выше процессом.

Какую именно форму обычно принимают меандры реки, текущей по равнине? В 1960-х годах геологи пришли к выводу, что каждая извилина имеет специфическую форму — такую, которую принимает гибкий стержень, если его согнуть, приблизив концы друг к другу (илл. 7). Она представляет собой эйлерову кривую, названную так в честь швейцарского математика Леонарда Эйлера (1707–1783), который первым решил

7. Форма, принимаемая упругим стержнем, концы которого зафиксированы в А и В, называется кривой Эйлера. Угол Θ между касательной и прямой АВ позволяет определить кривизну $d\Theta/ds$, производную от Θ относительно пути, пройденного по кривой. Эйлера кривая минимизирует среднюю квадратичную кривизну стержня, то есть минимизирует интеграл $\int (d\Theta/ds)^2 ds$, где Θ — угол между касательной и некоторым выбранным направлением, а s — длина вдоль кривой. Интеграл берется вдоль всего стержня



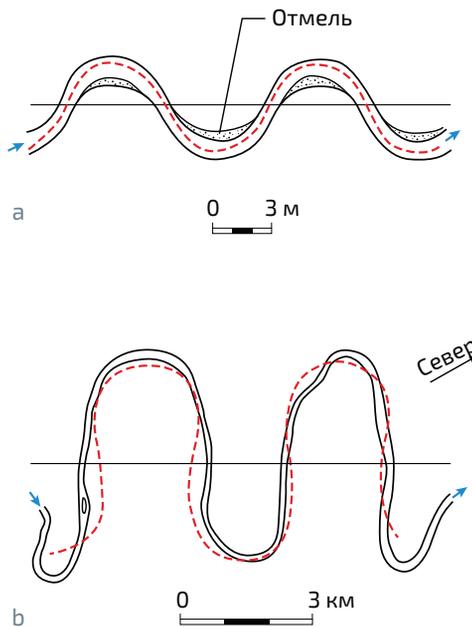
моделировался процесс эволюции русла реки «в идеальных условиях». Оказалось, что в изначально прямолинейном русле очень быстро образуются меандры, хорошо описываемые кривой Эйлера (илл. 8а). Очевидно, что в природе поведение русла реки существенно сложнее «лабораторного» русла (например, из-за неровной местности). И все же подобные структуры, обычно периодические, возникают естественным образом, когда река течет по равнине (илл. 8б). Как правило, чем шире река, тем больше на ней излучин.

Термин «меандры» породила очень извилистая турецкая река Большой Мендерес (тур. Büyük Menderes), название которой происходит от греческого *Μαλανδρος* («меандрос»). Помимо излучин реки, меандрами называют также извилистые потоки, которые образуются на поверхности ледников, или океанические течения, такие как Гольфстрим.

Для всех этих явлений, происходящих в однородных средах, случайные процессы способствуют образованию более или менее периодических излучин, однако причины их возникновения различны.

8. а. Меандры, появившиеся в лабораторных условиях в первоначально прямолинейном канале, проложенном в однородной рыхлой среде. Через несколько часов под действием эрозии он изгибается и появляются меандры. Соответствующая кривая Эйлера обозначена пунктиром.

б. Форма природной реки (Потомак в Поупоу, США) и ее приближение эйлеровой кривой (пунктирная линия)



эту задачу. Работа Эйлера по-прежнему широко цитируется в руководствах о прочности балок — те начинают изгибаться, если слишком сильно надавить на их концы (см. врезку на с. 19).

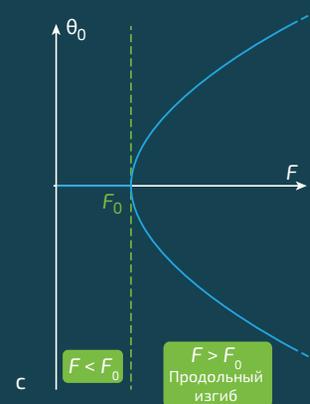
Это заключение согласуется с ранее проведенными лабораторными экспериментами, в которых

Озера и реки

В большое озеро обычно впадает много водных потоков. Например, в Женевское озеро втекает не только Рона, но и небольшие реки, такие как Дранс на юге и Вёвез на севере. А вытекает из него одна Рона. И это общее утверждение: независимо от количества впадающих в озеро рек, из него никогда не вытекает более одной! Как это объяснить?

Причина заключается в том, что вода из озера вытекает по самому глубокому (низкому) руслу, которое она находит. Если не принимать во внимание исключительные случаи паводков, то обычно поверх-

Опыт с продольным изгибом



Возьмем плоскую пластиковую линейку, поставим ее на стол и надавим на верхний конец. Пока приложенная сила невелика, линейка остается прямой (см. илл. выше). Но при определенном давлении линейка сгибается: это явление называется продольным изгибом. Оно возникает, когда сила, действующая на концы, превышает некоторый предел, который тем ниже, чем длиннее и гибче линейка. Очевидно, архитекторы и строители не должны превышать этот предел, когда, например, подпирают террасу металлическими опорами...

В нашем опыте, когда сила воздействия превысила этот предел, линейка согнулась вправо. Но с той же вероятностью она могла бы согнуться и влево! Эту ситуацию можно сравнить с выбором, стоящим перед путешественником, который оказался на незнакомой развилке. Физическое явление, которое открывает две равновероятные возможности изменения какого-либо параметра, ученые называют бифуркацией (от лат. *bifurcus* — «раздвоенный»).

Явление продольного изгиба

а. До тех пор, пока вертикальная сила F , прилагаемая к линейке, остается меньше предела F_0 , линейка не деформируется. б. Как только $F > F_0$, линейка начнет сгибаться (и даже может сломаться, если сила станет слишком большой). с. Изменение угла θ_0 , который образует вертикальная линейка в зависимости от величины силы F . Когда последняя достигает величины F_0 , линейка может изогнуться вправо ($\theta_0 > 90^\circ$) или влево ($\theta_0 < 0$): кривая изменения угла θ_0 имеет две ветви, которые создают бифуркацию

ность воды в озере находится на уровне самого низкого из возможных мест вытекания, поэтому из него выходит только один поток. Даже если из озера в данный момент вытекает несколько рек, такая ситуация будет нестабильной: ее можно наблюдать только на недавно сформировавшихся озерах. Действительно, самый глубокий поток с более быстрым течением вызовет и более сильную эрозию. В результате его пропускная способность будет увеличиваться, что приведет к снижению уровня озера. Поэтому другие русла будут постепенно мелеть и в конце концов заполнятся грязью. Таким образом, из всех вытекающих из одного озера рек «выживает» только самая глубокая.



9. Дельта Роны. Подходя к Средиземному морю, река разделяется на несколько рукавов

Аналогичными свойствами обладают и реки. Хорошо известно, что реки способны сливаться (когда одна впадает в другую), в то время как разветвляются они очень редко. Поток воды повсюду следует по пути с наибольшим уклоном, и маловероятно, что в каком-то месте этот путь раздвоится. Лишь одна специфическая область является исключением: это устье реки, то есть место ее впадения в море, водохранилище, озеро или другую реку. Здесь река иногда разделяется на несколько рукавов, образуя дельту (илл. 9). Дело в том, что вдали от моря поток выстраивает свой путь через складки местности, которые формировались долгие миллионы лет. В дельте же, напротив, река сама формирует свои берега, при этом вынося песок в море и перекрывая этими отложениями свой путь.

Итак, река добралась до моря, и эта глава подходит к концу! Мы еще вернемся на морской берег в главе 5 на с. 58, чтобы обсудить другое удивительное природное явление — прилив.

Искусственные и природные волноводы

Каким чудом звук, порожденный вблизи австралийского побережья, достигает Бермудских островов в десятках тысяч километров от него? Чтобы это понять, проведем параллель между распространением звука и света, для описания которого мы привыкли использовать понятие «луч». Затем мы погрузимся в океан в поисках таинственного волновода, который может передавать звук на огромные расстояния.

За последние 20 лет огромное, постоянно растущее количество данных перемещается с одного континента на другой благодаря оптоволоконным кабелям, пересекающим океаны (илл. 1). На илл. 2 показан путь сообщения, отправленного с вашего компьютера или телефона американскому или японскому коллеге. Конечно, эти световые волны слабеют во время пути, но затухание относительно невелико, а необходимое количество промежуточных станций удивительно мало.

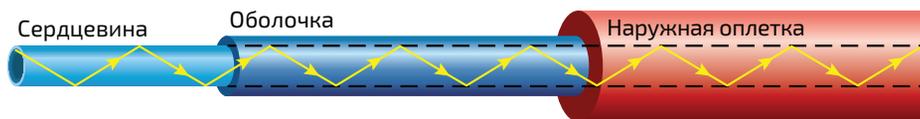
Распространение звуковых волн

Оказывается, что океан способен выступать в качестве акустического волновода. Это удивительное явление обнаружили советские и американские ученые в 1940-х годах: звуковые волны, распространяющиеся в океане, иногда обнаруживаются в тысячах километров от их источника! В одном из самых впечат-



1. Пучок оптических волокон в защитной оболочке. Оптические волокна из стекла или пластика имеют в диаметре 125 мкм

2. Распространение светового луча в оптоволокне. Передаваемый луч много раз отражается от границы между сердцевинной и оболочкой и таким образом направляется по волокну. Данные кодируются изменением интенсивности света



ляющих экспериментов звук подводного взрыва у побережья Австралии обогнул половину земного шара и был зарегистрирован на уединенном архипелаге Атлантического океана — Бермудских островах. Звуковой сигнал прошел под водой более 19 600 км — абсолютный рекорд!

Интенсивность звукового сигнала падает по мере удаления от источника. Действительно, излучаемая источником энергия распределяется равномерно во всех направлениях. При этом в отсутствие затухания общая энергия звуковой волны остается неизменной. На расстоянии R от источника эта энергия распределяется по площади сферы, пропорциональной R^2 . Таким образом, интенсивность звука при удалении от источника падает по закону $1/R^2$ (илл. 3). И это еще не учитывая рассеивающих явлений, поглощения и диффузии в среде, где распространяется звук!

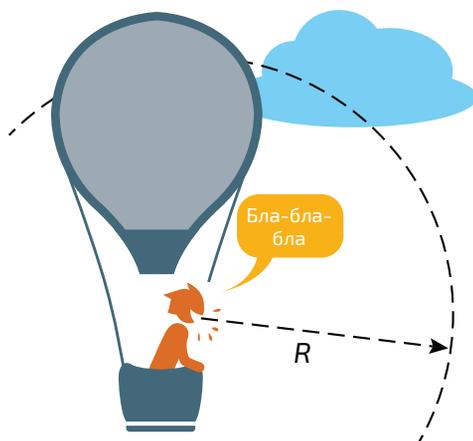
Чтобы австралийский взрыв был услышан на Бермудских островах, интенсивность дошедшей туда волны должна оказаться достаточно заметной. А для этого необходимо, чтобы излучаемая источником волна была направлена на архипелаг и не рассеивалась в других направлениях. Чтобы волна распространялась соответствующим образом, нужно, чтобы у волновода были полностью отражающие стенки: непроницаемые и не поглощающие звук.

На каком же принципе основывается этот «акустический волновод» в океане? Можно предположить, что он аналогичен принципу оптических волноводов, который предполагает полное внутреннее отражение волн от стенок (см. с. 24). Значит, происходит полное отражение акустических волн на границе между водой и воздухом? Нет! Скорость звука в воде намного выше, чем в воздухе (в холодном Гренландском море она составляет в среднем 1411 м/с, в теплом Средиземном море — 1554 м/с, в то время как скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна 335 м/с). Это означает, что вода

для звука является средой гораздо менее «плотной», чем воздух, — ситуация, прямо противоположная случаю распространения света.

Отсюда следует, что условия полного отражения для звуковой волны, распространяющейся из воды в воздух, не соблюдаются. Когда исходящая от дна моря звуковая волна доходит до поверхности, всегда возникают преломленная и отраженная волны. Еще одно следствие: в случае

3. Интенсивность звука, издаваемого говорящим, уменьшается как $1/R^2$ по мере удаления от него, при отсутствии препятствий или фокусировки звука в одном направлении



акустической волны преломленный луч не отклоняется от вертикали, а, наоборот, приближается к ней.

Значит, предположение, что поверхность океана может быть отражающей поверхностью, неверно? Не так быстро! Фактически доля энергии, которая преломляется на границе между водой и воздухом, во многом зависит от угла падения и соотношения скоростей между средами. В случае очень разных скоростей, как в нашей ситуации, интенсивность преломленной (вышедшей



в воздух) волны невелика вне зависимости от угла падения. Таким образом, на поверхности океана отражение почти полное: доказано, что не более 1% интенсивности падающей звуковой волны, распространяющейся почти горизонтально, проходит из воды в воздух. Следовательно, поверхность океана, похоже, способна хорошо отражать звук из глубин...

Так что же, мы, наконец, нашли объяснение распространения звука на большие расстояния в океанах? Увы, нет — по двум причинам. Во-первых, часть энергии все равно теряется каждый раз, когда звуковой луч попадает на поверхность океана. Во-вторых, она почти всегда неровная, что препятствует отражению звуковой волны. В конечном счете поверхность океана, за исключением случаев шторма, не может сформировать верхнюю границу природного океанического волновода, который мы пытаемся разыскать. Что касается дна океана, то оно еще меньше подходит для образования такой границы. Донные отложения не отражают звук, а, наоборот, склонны поглощать его. Таким образом, стенки океанического проводника звука должны находиться где-то между дном и поверхностью... именно здесь мы их и обнаружим! Чтобы продолжить наше исследование, давайте подробнее рассмотрим процесс распространения звука в океане.

4. Пример направленного распространения акустических волн в воздухе. Дети делятся секретом... Держа руку у рта, девочка предотвращает распространение звукового сигнала во всех направлениях

Скорость звука в морской воде

В такой жидкости, как морская вода, скорость звука зависит от ее свойств, которые неодинаковы в разных частях океана. Здесь и находится ключ к решению нашей задачи! В зависимости от содержания соли, температуры и давления воды, скорость звука варьирует от 1400 до 1540 м/с. Например, давление на глубине возрастает, что, как правило, делает звук быстрее. Также звук распространяется быстрее при более высокой температуре. Но более плотная холодная вода опускается на дно океана. Эти два противодействующих эффекта объясняют изменение скорости звука в зависимости от глубины (илл. 5). В непосредственной близости

Отражение и преломление световых волн

Напомним свойства отражения и преломления в случае оптики. Если луч света из среды 1 попадает на границу (предположительно плоскую) со средой 2, часть света отражается в среду 1, а другая часть проходит в среду 2 (см. илл. а): это явление преломления. Угол преломления α_2 связан с углом падения α_1 законом Снеллиуса:

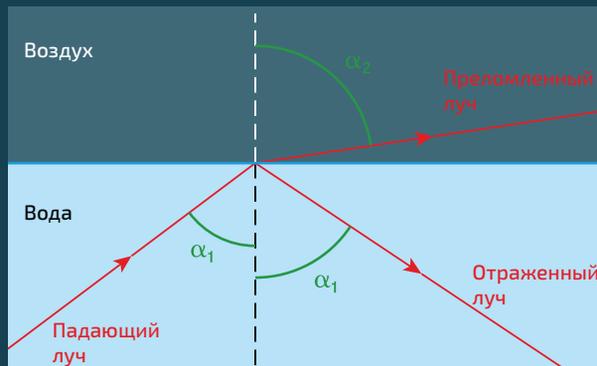
$$\frac{\sin \alpha_2}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{c_1},$$

где c_1 и c_2 — скорости света соответственно в средах 1 и 2.

Эту формулу можно также написать, используя индексы преломления сред 1 и 2, соответственно $n_1 = c/c_1$ и $n_2 = c/c_2$, где c — скорость света в вакууме.

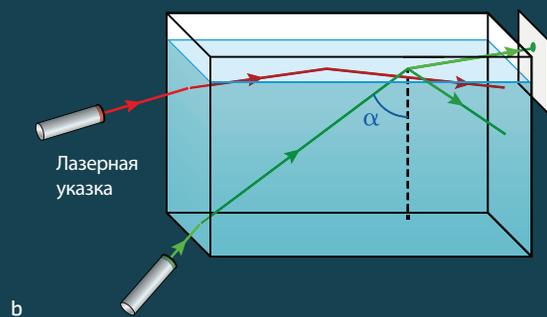
Если световой луч попадает на поверхность с достаточно большим углом падения α_1 , то величина $\frac{c_2}{c_1} \sin \alpha_1$ становится больше 1, и не существует такого значения угла α_2 , которое соответствовало бы приведенной выше формуле. Таким образом, преломление луча оказывается невозможным, и происходит полное внутреннее отражение (см. илл. б). Это явление используется в оптических волноводах: луч претерпевает целый ряд отражений внутри проводника, и поэтому свет распространяется по нему с минимальными потерями. Самый известный пример оптического волновода — оптоволокно.

Как и световые волны, звуковые волны могут отражаться и преломляться. Формула Снеллиуса остается применимой и к описанию поведения «звуковых лучей», но c_1 и c_2 в этом случае, очевидно, представляют собой скорости звука, а не света.



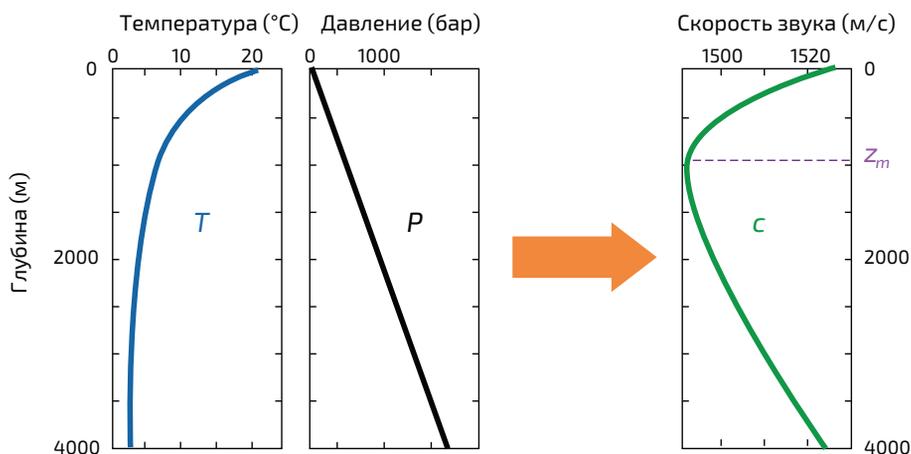
а

Преломление и отражение светового луча (красные стрелки), выходящего из воды (показатель преломления равен 1,33) в воздух (показатель преломления близок к 1,0)



б

Опыт с лазерными указками демонстрирует явление полного отражения на границе между водой и воздухом. Луч, падающий на поверхность воды под небольшим углом α (зеленый), подвергается лишь частичному отражению: часть энергии покидает воду с преломленным лучом, и на экране появляется световое пятно. Скользящий луч (красный) испытывает полное внутреннее отражение



5. Пример изменения скорости звука c в океане в зависимости от глубины. В результате повышения давления и понижения температуры по мере приближения ко дну скорость достигает минимума на глубине z_m , чаще всего около 1000 м

сти от поверхности резкое понижение температуры сначала приводит к постепенному уменьшению скорости звука c . На больших глубинах изменение температуры не так ощутимо, преобладает эффект увеличения давления, и это приводит к возрастанию c по мере приближения ко дну. Глубина z_m чаще всего составляет от 1000 до 1200 м, но может достигать и 2000 м на низких широтах, где теплым остается более толстый слой воды. В высоких широтах, наоборот, z_m может составлять всего 500 или даже 200 м, или еще меньше в полярных регионах. Изменение солёности в зависимости от глубины, как правило, незначительно и не оказывает заметного эффекта.

Когда звук распространяется зигзагами

Теперь рассмотрим звуковой луч, источник которого находится на глубине z_m . Независимо от того, пойдет ли он вверх или вниз, в области, в которой он оказывается, скорость звука выше, чем на оси. Таким образом, в результате последовательного прохождения слоев воды на своем пути звуковой луч постепенно искривляется, вплоть до скользящего падения под таким углом, для которого происходит полное отражение (см. врезку). Тогда он начинает искривляться в направлении увеличения (или уменьшения) глубины, пока снова не достигнет глубины z_m , где изменение скорости звука меняет знак. Таким образом, луч движется по зигзагообразной траектории между двумя плоскостями (илл. 6).

Эти две плоскости эквивалентны верхней и нижней границам волновода, у которого нет боковых стенок. Тем не менее благодаря описанному явлению звук способен распространяться в океане на большие расстояния. Наконец-то мы закончили расследование!

Эффективность океанического волновода

Не все исходящие из источника звуковые лучи попадают в этот «океанический волновод». Первоначально звук из источника распространя-

Звуковые волноводы, созданные человеком

Распространение звука в газах или жидкостях представляет собой возмущение, периодически изменяющее в пространстве и времени плотность частиц, эту среду составляющих. Любой выделенный объем жидкости локально подвергается периодической череде сжатий и расширений.

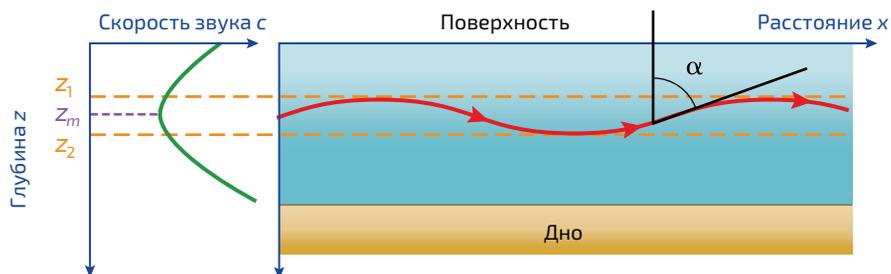
Скорость звука в жидкостях и твердых телах, вообще говоря, выше, чем в газах. Это и не удивительно, ведь в вакууме звук не распространяется вообще, а разреженный газ имеет плотность промежуточную между вакуумом и конденсированным веществом. Однако если скорость звука в двух средах сильно отличается, то передача звука из одной в другую может быть затруднена. Это явление используется в стетоскопе — инструменте, который доносит в ухо врача звуки из грудной клетки пациента. Первоначально он представлял собой простую деревянную трубку.

Другой пример волновода, основанного на явлении полного отражения, которое возникает при переходе звука из воздуха в твердое тело, — это старинная система акустических труб, соединяющая различные уровни на кораблях. Сделанная обычно из меди или латуни, она передает приказ с капитанского мостика в машинное отделение. В таком волноводе волна практически одномерна — это означает, что интенсивность звуковой волны остается постоянной по всей длине трубы, даже на удалении от источника. Затухание звука в воздухе настолько низкое, что, если бы можно было построить прямую трубку длиной 750 км и избежать поглощения звука стенками, она послужила бы телефоном между Парижем и Марселем. К сожалению, скорость звука в воздухе составляет всего 340 м/с, так что слова из Парижа в Марсель добирались бы более получаса...

ется во всех направлениях, и превращение его в «звуковой луч» зависит от угла, образуемого между ним и вертикалью. Если этот угол достаточно велик, то звуковой луч распространяется безгранично. Если же угол слишком мал, звуковой луч достигнет поверхности или дна океана. Но дно океана неровное, и оно, как и поверхность (кроме редких моментов, когда она совершенно спокойна), рассеивает звук. Таким образом, море, как правило, может послужить волноводом только для звуковых лучей, которые не достигают ни поверхности, ни дна океана. На практике существуют «акустические каналы», по которым звук передается на большие расстояния, и «теневые зоны», куда звук никогда не попадает.

Изучение распространения звука в океанах серьезно интересовало британских и американских ученых во время Второй мировой войны. Тогда речь шла об обнаружении немецких подводных лодок раньше,

6. Акустический луч (красный), излучаемый на глубине z_m , проходит между двумя плоскостями, от которых он полностью отражается. Зависимость скорости звука от глубины $c(z)$ в океане представлена зеленой кривой. Значения z_1 и z_2 (считаем, что глубина равна 0 на поверхности) зависят от угла падения луча на глубине z_m и определяются законом Снеллиуса: $c(z_1) = c(z_2) = c_m / \sin \alpha(z_m)$



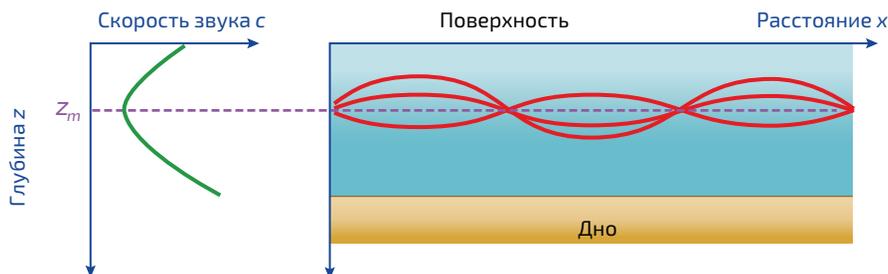
чем они подплывут достаточно близко, чтобы атаковать американские или английские суда. Акустическое обнаружение подводных лодок с помощью сонаров сыграло важную роль в битве за Атлантику: в 1943 году, после тяжелых потерь, союзники сумели уничтожить значительное количество немецких подлодок, установив тем самым свое превосходство на море.

Простая модель

Интересно рассмотреть случай, когда скорость звука c — простая функция глубины z . Например, функция, имеющая минимум в z_m : $c(z) = c(z_m) + k(z - z_m)^2$, где k — константа. В этом случае кривая, иллюстрирующая изменение скорости звука в зависимости от глубины (зеленая на илл. 5 и 6), является параболой. На самом деле это приближение почти всегда справедливо для глубин z , близких к z_m . Звуковой луч, немного отклоняющийся от горизонтали, следует по синусоиде, период которой не зависит от угла падения, так что все звуковые лучи в одной вертикальной плоскости сходятся в точках оси $z = z_m$ (илл. 7). Эти точки аналогичны фокусам оптических приборов, таких как линзы, в которых сходятся падающие световые лучи, поэтому наблюдается явление фокусировки звуковых волн. Параболическая форма кривой хорошо описывает изменение скорости звука в зависимости от частоты в глубинах океана. Однако, поскольку кривая $c(z)$ на практике не является параболой, то фокусировка звука не идеальна.

Заключение

Когда звук излучается на соответствующей глубине в море, значительная часть звуковой энергии оказывается заперта в «акустических каналах». Достаточно ли это объяснение для прохождения звука от Австралии до Бермудских островов? Попробуем подсчитать. Хотя рассмотренный нами механизм описывает именно распространение звука в океане, остаются возможными еще два направления. Звуковая волна, излучаемая в середине океана, проходит в течение времени t расстояние R порядка $c_{\text{зв}} t$, где $c_{\text{зв}}$ — средняя скорость звука в воде, скажем, 1500 м/с. Даже если предполагается, что потери равны нулю, энергия звуковой волны должна распределяться по всей, примерно цилиндрической, поверхности



7. Явление фокусировки звуковых лучей



8. Пример миража в Ливийской пустыне. По мере приближения к раскаленному песку солнечные лучи встречают все более горячий воздух (и, следовательно, среду с уменьшающимся показателем преломления): таким образом, они, как и звуковые лучи на илл. 7, все сильнее отклоняются вплоть до отражения. Наблюдателю кажется, что в продолжении этих отраженных лучей он видит воду

зоны $2\pi R h$, где разница в глубине h между верхней и нижней границами канала может достигать глубины океана. Таким образом, интенсивность звука уменьшается как $1/R$ по мере удаления от источника. Это происходит не так резко, как затухание, пропорциональное $1/R^2$ звука в воздухе (илл. 3), но и оно едва ли оставляет надежду на то, что звук, раздавшийся в Австралии, будет услышан на Бермудах. Однако если приемник звука находился в точке фокуса, где сходятся звуковые лучи (илл. 7), а величина h невелика, то в принципе отголосок взрыва мог быть услышан. Кроме того, можно допустить, что колебания солености и температуры в толще океана на пути звуковых лучей создают и вертикальные отражающие стенки, препятствующие рассеянию энергии звуковой волны. И все же удивительно, что звук достигает Бермудских островов в обход мыса Доброй Надежды, учитывая дополнительное поглощение энергии, например, пузырьками воздуха или планктоном.

Распространение звука в естественных подводных каналах — не единственный случай волновода, созданного природой. Еще несколько примеров связаны со спецификой распространения электромагнитных волн. Наиболее эффектны миражи, которые возникают из-за непрямолинейного распространения света в очень неравномерно нагретой атмосфере (илл. 8). Кроме того, можно вспомнить короткие радиоволны, которые распространяются на большие расстояния благодаря отражению в ионосфере — верхней области атмосферы на высоте от 60 до 800 км. При определенных условиях радиоприемник может принимать радиопередачи из других стран.

Цвета моря и неба

Когда стоит хорошая погода, днем небо голубое, а в сумерках — алое. Через несколько часов опускается ночная тьма, и на черном небе вспыхивают мириады звезд. Днем облака белые или сероватые. В дождливую погоду иногда появляется радуга... Какие физические принципы объясняют все эти цвета? Ответ вы найдете в этой главе. И поскольку речь идет о небесах, мы поговорим и об их крылатых обитателях — птицах и насекомых.

Море и небо дарят нам разнообразные цвета, вдохновившие многих художников. Аркадий Рылов воспроизвел эти цвета на картине, выставленной в Третьяковской галерее в Москве (илл. 1). Белые хмурые облака плывут по небу всех оттенков синего. Поверхность моря более темная, подошвы волн — почти черные, а гребни местами образуют белые «барашки».

1. «В голубом просторе», картина художника-символиста Аркадия Рылова (1870–1939)

Цвет моря и сила ветра

Количество «барашков» и высота волн зависят от скорости ветра. Эта информация имеет важное значение для моряков: для определения скорости ветра они пользуются эмпирической таблицей, которую разработал британский адмирал сэра Фрэнсиса Бофорта (1774–1857) (с. 28). На картине Рылова наличие небольшого количества «барашков» свидетельствует о ветре 12–19 км/ч, то есть 7–10 морских узлов. Такой ветер считается слабым и соответствует силе в 3 балла по шкале Бофорта.



Шкала Бофорта

Представление о скорости ветра можно получить не только с помощью шкалы Бофорта, но и по контрасту между яркостью моря и неба. Они одинаковы, когда на море штиль, а горизонт едва различим. Как правило, легчайшего ветра достаточно, чтобы встревожить поверхность воды и создать контраст: небо ярче моря, горизонт выглядит как четкая линия. Это явление было изучено несколько десятилетий назад российскими учеными на борту исследовательского судна «Дмитрий Менделеев»

Баллы Бофорта	Словесное определение силы ветра	Скорость ветра на высоте 10 м		Внешний вид моря
		в морских узлах	в км/ч	
0	Штиль	< 1	< 1	Море зеркально гладкое
1	Тихий ветер	1–3	1–5	Рябь, пены нет
2	Легкий ветер	4–6	6–11	Гребни не опрокидываются
3	Слабый ветер	7–10	12–19	Короткие волны (< 60 см), маленькие «барашки»
4	Умеренный ветер	11–15	20–28	Удлиненные волны (< 1,5 м), «барашки» во многих местах
5	Свежий ветер	16–20	29–38	Умеренные волны (2 м) и слабые брызги
6	Сильный ветер	21–26	39–49	Крупные волны (4 м), белые пенистые гребни и брызги
7	Крепкий ветер	27–33	50–61	Следы пены и гребни высотой до 5,5 м, которые начинают бушевать
8	Очень крепкий ветер	34–40	62–74	Вихри пены на гребнях волн и полосы пены. Волны до 7,5 м в высоту
9	Шторм	41–47	75–88	Волны бушуют, брызги ограничивают видимость. Волны достигают 10 м в высоту
10	Сильный шторм (буря)	48–55	89–102	Волны до 12,5 м в высоту, гребни покрыты пеной
11	Жестокий шторм	56–64	103–117	Море покрыто пеной, взбиваемой ветром. Волны до 16 м
12	Ураган	> 65	> 118	Белое море пены, воздух полон брызг, почти нулевая видимость

Яркость морской поверхности зависит от угла наблюдения. Действительно, луч света, падающий на поверхность моря, как частично преломляется, так и частично отражается (см. главу 2, с. 24). Интенсивность отраженного луча зависит, в частности, от показателя преломления воды и угла падения. Чем острее угол, тем сильнее отражение. Поэтому поверхность моря кажется более яркой у горизонта, чем вблизи наблюдателя.

А что насчет его цвета? Цвет поверхности практически непредсказуем, так как зависит от многих факторов, таких как глубина моря, положение солнца, цвет неба, наличие взвешенных частиц и водорослей и т. д. Все эти факторы влияют на отражение света от поверхности, его рассеяние и поглощение в воде. И все же море чаще всего синее. Причина в том,