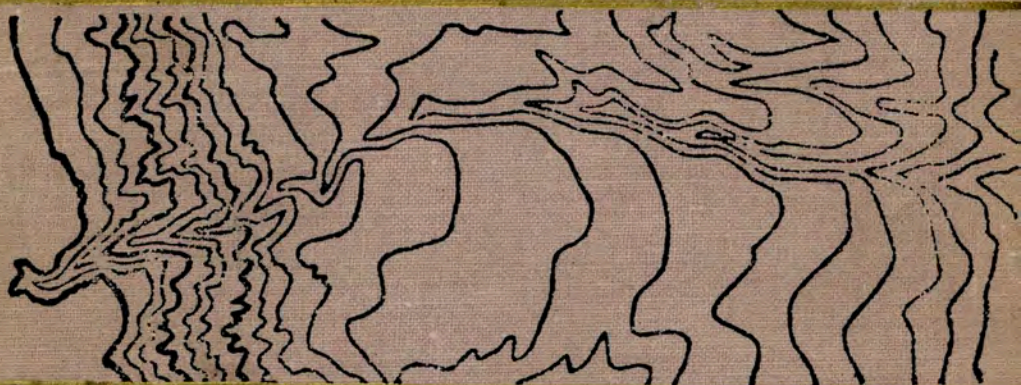


Ф. Шепард

ЗЕМЛЯ ПОД МОРЕМ



Francis P. Shepard

*The Earth
beneath the Sea*

Baltimore: The Johns Hopkins Press

Ф. Шепард

З Е М Л Я
под
М О Р Е М

Перевод с английского Н. А. МАРОВОЙ

Под редакцией Г. Б. УДИНЦЕВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «М И Р»

Москва · 1964

Автор книги — крупный американский океанограф известен советскому читателю своими специальными работами. «Земля под морем» — популярная книга, которая дает яркое представление о подводном мире. Шепард ведет читателя в глубокие подводные каньоны, прорезающие океанское дно, в темные пучины глубоководных впадин, на вершины подводных вулканов и подводных гор. Книга написана ярким и живым языком и содержит превосходные иллюстрации.

Книгу с интересом прочтут не только геологи и географы, но и любители природы, учителя и молодежь.

ОТ РЕДАКЦИИ

Вторая половина XX в. вошла в историю человечества как эпоха космических ракет; сначала автоматические межпланетные станции, а затем космонавты проникли в звездные просторы Вселенной. Одновременно со штурмом Космоса огромные успехи были достигнуты и в исследованиях нашей планеты Земли. Почти три четверти ее занято водами Мирового океана, и именно здесь, в пучинах глубоководных каньонов и на дне бесчисленных морей, за последние два десятилетия были совершены выдающиеся открытия.

В наши дни нельзя познать внутреннее строение Земли, изучая лишь материки и острова — «земную твердь», занимающую лишь четверть поверхности земного шара. К тому же теперь доподлинно известно, что ключи к тайнам земных недр надо искать в пучинах океана. Ведь именно здесь, на морском дне, тоньше всего слой земной коры, и именно здесь, на глубине, доступной современным исследователям, залегают текучие породы земной мантии, загадочной внутренней оболочки нашей планеты.

Книга видного американского ученого Фрэнсиса Шепарда посвящена новой науке — геологии моря. Ф. Шепард справедливо считается одним из отцов этой науки. Много лет сражался он на ее переднем крае, изучая таинственные подводные каньоны Калифорнии и грандиозные тихоокеанские «моретрясения».

Ф. Шепард не кабинетный ученый, а геолог-практик, и его книга — это прежде всего репортаж его собственных исследований. С автором настоящей книги советский читатель впервые познакомился в 1951 г., когда в русском переводе вышла его книга «Геология моря».

Но за те тринадцать лет, которые истекли с момента выхода в свет этой книги, морская геология одержала немало побед. И новая книга Ф. Шепарда — живое свидетельство успехов этой молодой науки.

Автор раскрывает перед читателем картины нелегкой жизни исследовательских коллективов, которые на специальных кораблях-лабораториях «штурмуют» морские пучины. Он объясняет, каким образом морские геологи «нащупывают» на дне горы и желоба; описывая несметные богатства океанского дна, он показывает, что подводные сокровищницы неисчерпаемы, что наземные залежи полезных ископаемых связаны с подводными. Он говорит о колоссальных залежах нефти, марганца, железа на дне океанских впадин, описывает таинственный мир подводных каньонов и рифов; сам он не раз спускался с аквалангом в «коралловые сады» теплых морей, и ему удалось передать их очарование.

Надо учесть, что в книге автор оперирует данными, относящимися прежде всего к Америке, но и для советского читателя эти данные интересны, так как освещают состояние американской науки и геологию дна Атлантического и Тихого океанов. Мы надеемся, что книга эта пробудит в читателе интерес к вопросам морской геологии, поможет разобраться в ее проблемах и оценить успехи и трудности, стоящие на пути ученых.

Меры длины, высоты, глубины и веса даны, как в оригинале, то есть в английской системе мер. Эти меры в переводе в метрические равны: морская миля — 1853 м, морская сажень — 1,853 м, фут — 0,3048 м, дюйм — 2,54 см, фунт — 0,4536 кг, статутная миля — 1,609 км.

ПРЕДИСЛОВИЕ К АМЕРИКАНСКОМУ ИЗДАНИЮ

Многие мои друзья часто высказывали пожелание приобрести книгу по морской геологии, которую они могли бы читать без специальной подготовки. Это главным образом и заставило меня написать эту книгу. «Земля под морем» — не просто популярный вариант моей более ранней работы «Геология моря», хотя бы потому, что написана она десятью годами позже, а за эти десять лет океанография развивалась необычайно быстро. Именно поэтому новая книга написана не только более популярно, но и на более современных материалах.

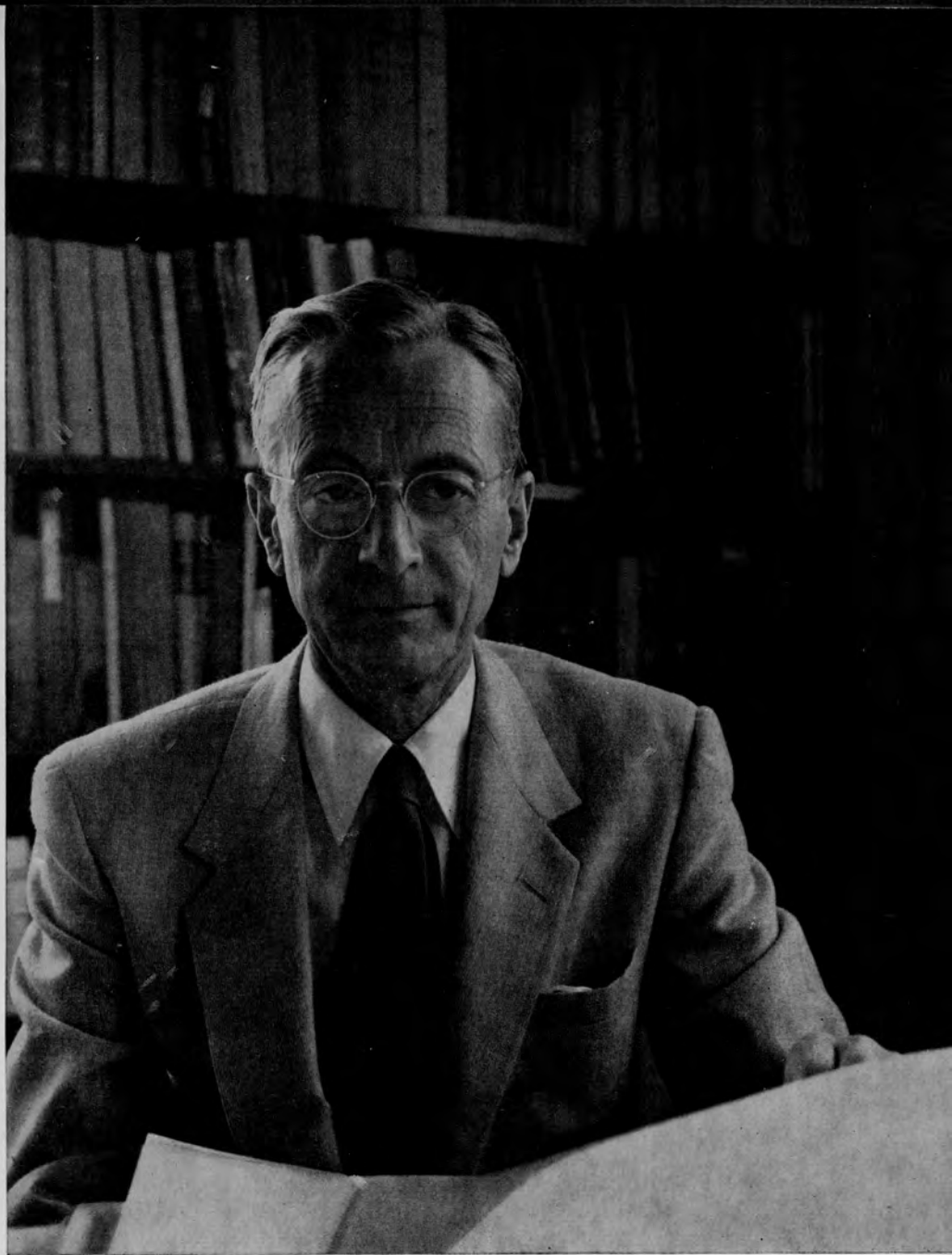
Другой моей целью было показать, с какими радостями открытий и горестями разочарований сталкивается ученый, работающий во всякой новой отрасли науки. Тридцать пять лет назад, только начиная свою работу, я был уверен, что я единственный на свете геолог, изучающий дно океана. Позднее я узнал, что попытки таких исследований были и до меня. Некоторые из них предпринимались задолго до того, как я еще только собирался приступить к своей работе. Совсем недавно я просматривал книгу французского геолога М. Делеза «Литология дна океана», опубликованную еще в 1886 г. В ней рассматриваются многие из тех же самых вопросов, которые пытался разрешить и я в своих ранних работах, но она осталась незамеченной, как и многие другие первые шаги разведчиков науки. Немецкий геолог К. Андрэ также издал в 1920 г. книгу по вопросам морской геологии — «Геология морского дна». Наконец, русский ученый М. В. Кленова опубликовала книгу о тех же проблемах, что и моя. Она сообщила мне, что ее книга появилась даже несколько раньше моей. Так уж всегда случается, что кто-то поднимает флаг раньше тебя!

Работая в одиночку, обязательно встречаешься с определенными трудностями. Впрочем, мой опыт в этом отношении непоказателен. Сейчас мы ужаснулись бы, узнав, что какой-то самоуверенный студент пытается поступить в аспирантуру Скриппсовского океанографического института с таким жалким

багажом знаний, какой был когда-то у меня. Большую часть своих познаний я получил уже после защиты докторской диссертации. Мне посчастливилось — я двадцать лет работал в тесном контакте со специалистами океанологами самых различных направлений. При этом я учился у них, и мы учились вместе. Работая над книгой, во всех сложных вопросах я мог в любой момент обратиться к своим коллегам за помощью.

Особенно много помогли мне сотрудники и специалисты Скриппсовского океанографического института и Лаборатории электроники военно-морского флота США, Геологической службы США, а также сотрудники Института по изучению Чесапикского залива.

Ф. Шенард



Ф. ШЕПАРД,

профессор Скриппсовского океанографического
института, Калифорнийский университет

Введение

Геология дна океана, или морская геология, занимается изучением происхождения и строения материковых шельфов и склонов, подводных каньонов и ложа океана (фиг. 1). Эта наука изучает подводные пространства Земли, составляющие примерно $\frac{3}{4}$ ее поверхности. Морские геологические исследования включают также изучение характера и происхождения донных осадков, которые частично покрывают эти обширные подводные пространства. Морские геологи, кроме того, ведут исследования коренных пород, подстилающих донные осадки.

Наступление геологов на подводный мир велось путем, совсем не похожим на пути развития наземной геологии. Область, изучаемая морскими геологами, находится почти полностью вне поля зрения человека и слишком глубока, чтобы можно было применять там горный компас и геологический молоток, эти незаменимые спутники геолога на суше. Морское дно долгое время исследовалось с помощью драги, путем взятия колонок грунтовыми трубками и лишь изредка фотографированием поверхности дна фотокамерами, защищенными водонепроницаемыми кожухами. Лишь совсем недавно на вооружение морских геологов пришел акваланг — аппарат, снабженный баллонами сжатого воздуха и трубкой для дыхания. Но с аквалангом можно исследовать лишь мелководья на глубинах, не превышающих 180 футов. Возможность распространить методы непосредственного исследования на значительно большие глубины появилась с созданием батискафа¹. Этот аппарат, изобретенный Огюстом Пиккаром в 1948 г., представляет собой нечто

¹ Рекордное погружение в Марианском желобе на глубину 10 919 м в батискафе «Триест» осуществили швейцарский ученый Ж. Пиккар и лейтенант военно-морского флота США Д. Уолш.

Съемки дна океана с помощью автоматической подводной фотокамеры производились советским ученым Н. Л. Зенкевичем до максимальной глубины в Мировом океане 10 022 м (Марианский желоб). — *Прим. ред.*

вроде подводного воздушного шара, наполненного бензином для придания ему плавучести. Вместо гондолы к этому шару подвешена толстостенная стальная батисфера с плексигласовыми иллюминаторами. В ней могут разместиться наблюдатели. Чтобы опустить батискаф на дно, его необходимо загрузить железным балластом, который сбрасывают, если батискафу

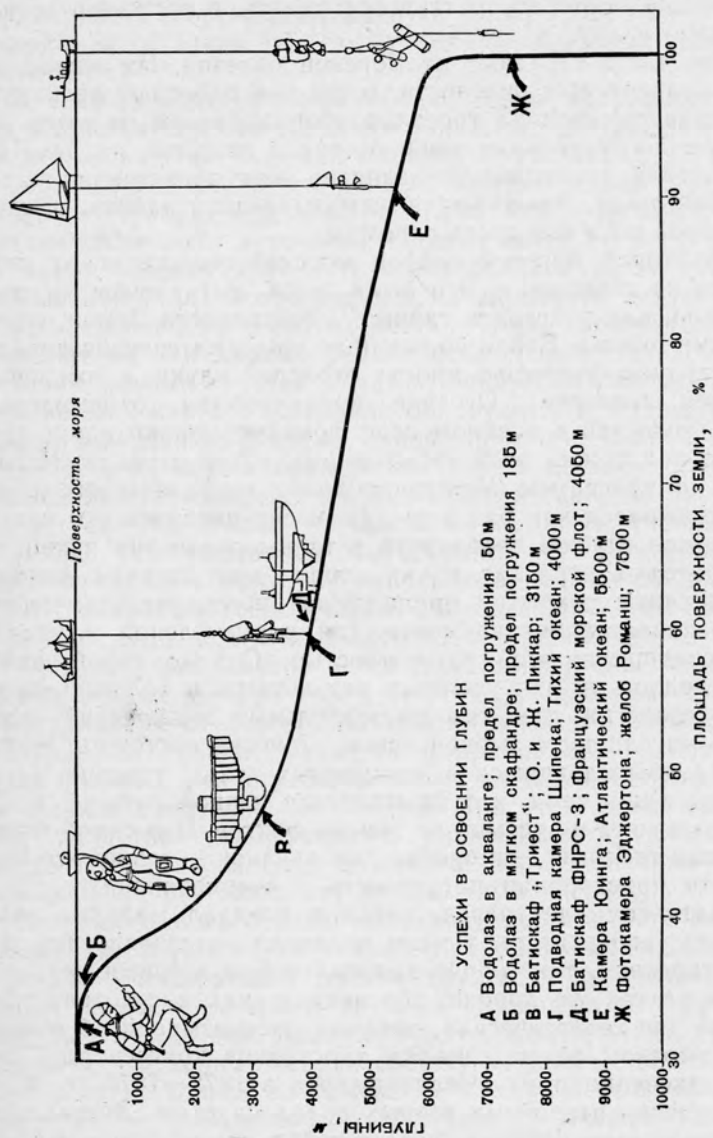


Фиг. 1. Физиографическая диаграмма, показывающая различные типы провинций морского дна. Вертикальный масштаб увеличен в 20 раз.

нужно всплыть на поверхность. Передвигается батискаф с помощью винтов, вращаемых электромотором.

Человек уже добился успехов в освоении больших океанских глубин (фиг. 2). Однако морские геологи по-прежнему вынуждены вести большую часть своих исследований все еще с палубы корабля.

Трудности эти непонятны тем, кто не сталкивался с ними. Потери при этом дорогостоящего оборудования — самое обычное дело. Приборы цепляются за выступы скал, в то время как



Ф и г. 2. На гипсографической кривой указано непосредственное исследование дна современными методами.

ветер, течения и волны качают и носят корабль по океану. Геологи даже не могут увидеть, что угрожает их драгоценным приборам! Огромное давление воды часто раздавливает приборы. Низкие температуры сгущают смазку, и трущиеся детали «примерзают» друг к другу.

Ученые часто страдают от морской болезни. Их жизнь постоянно подвергается опасности, когда они работают на палубе с раскачивающимися на тросах приборами весом от сотен килограммов до нескольких тонн. Морская геология на деле совсем не столь романтическое занятие, как представляют себе сухопутные люди. Это тяжелая, изматывающая работа, результаты которой пока еще очень скромны.

Перед второй мировой войной морские геологи всего мира собрались на совещание. Это были люди, пытавшиеся ни много, ни мало, как разгадать тайны $\frac{3}{4}$ поверхности Земли, скрытые водами океана. Война со всеми ее ужасами способствовала, как ни странно, развитию многих отраслей науки, в том числе и морской геологии. Осознав преимущества, открываемые морской геологией в военном деле, военные моряки вдруг снизили до поддержки этой забытой ими ранее отрасли. Исследования по программе Международного геофизического года, развертывавшиеся как раз в те дни, когда писалась эта книга, позволят еще глубже проникнуть в тайны океанских пучин.

В некоторых отраслях науки, таких, как ядерная физика, многие крупные открытия принадлежат исследователям-теоретикам, располагавшим временем для размышлений и удачно воспользовавшимся этой возможностью. Однако такой философский подход не дал успешных результатов в большей части отраслей геологии, так как умозрительные заключения основывались на слишком зыбкой основе. Многие проблемы геологии, долго обсуждавшиеся в лекционных залах, успешно были разрешены лишь теми, кто не гнушался черной работой и отправлялся в горы и пустыни на поиски фактов. И в самой молодой отрасли геологии — геологии дна океанов — также все еще велика эта прискорбная потребность в «чернорабочих».

Тридцать семь лет назад, когда я покидал мрачные залы Чикагского университета, у меня возникло подозрение, что некоторые гипотезы, так горячо защищавшиеся нашими учителями, вовсе не так уж хорошо обоснованы, как нас хотели убедить. В те дни геологические учебники рассказывали об океане главным образом по материалам участников кругосветной английской экспедиции на «Челленджере» в 1872—1876 гг. и на основе изучения осадочных горных пород на суше. Экспедиция на «Челленджере», конечно, была в целом весьма успешной, но из-за примитивности средств измерения глубин и сбора проб со дна океана, применявшихся в то время, достижения ее в области морской геологии были весьма скромными. Точно так

же попытка представить современные условия на дне океана на основе одного только изучения древних осадочных горных пород была явно ошибочной. Это было подобно попытке классифицировать современную фауну и флору только на основании ископаемых остатков, но без изучения современных животных и растений.

В 1923 г., когда я впервые взял серию проб донных осадков в Массачусетском заливе, я узнал, что на морском дне все обстоит совсем не так, как описано в учебниках. Я двигался от берега. Меня учили, что донные морские осадки с удалением от берега становятся мелкозернистыми, что объяснялось уменьшением силы волн и течений. Однако почти во всех образцах по моему разрезу крупность зерен осадков после некоторого уменьшения стала возрастать. Я начал искать подтверждения своим наблюдениям в других местах, чтобы проверить, не представляют ли эти данные редкое исключение. Ознакомление с составом донных грунтов отметок, показанных на морских навигационных картах, позволило обнаружить примеры, подтвердившие мои данные. Видимо, никому просто не пришло в голову посмотреть на карты, прежде чем делать широкие обобщения. Посещение Национального музея Смитсоновского института в Вашингтоне еще больше убедило меня в том, что учебники врут. Я увидел там тщательно закупоренные бутылки с тысячами образцов донных грунтов, полученных во время промерных работ Береговой и геодезической службой США. Они покрылись пылью на чердаке музея. Никто не потрудился изучить образцы. А между тем именно здесь были доказательства того, что донные осадки шельфа вовсе не становятся более тонкими по мере удаления от берега. Во многих местах с внешнего края шельфа был собран гравий, а в прибрежных районах — ил. Лишь позднее океанографические учреждения получили образцы осадков с материковой отмели. При этом снова подтвердилось отсутствие закономерного уменьшения крупности зерен осадка по мере удаления от берега. Были получены данные, позволяющие разгадать эту любопытную загадку.

Колонки донных осадков заставили пересмотреть отдельные положения геологических теорий. Гидростатическое давление и поршень, уменьшающий трение грунта о внутренние стенки трубки, помогли тяжелым трубкам длиной до 60¹ футов проникнуть в толщу дна. Колонки грунта, взятые этими трубками, показали, что донные осадки состоят из множества слоев, указывающих не только на изменение климатических условий, но и на привнос грубозернистого материала с мелководий мощными потоками, стекающими по материковому склону на равнины

¹ По сообщениям советских ученых, ими получены колонки по 100 футов длины.

у его подножия. Изучение колонок поможет уточнить геологическую шкалу времени, уточнить продолжительность различных стадий оледенения.

Я помню, как еще в университете потрясло меня сообщение, что дно океана — ровная гладкая поверхность, лишь с незначительными неровностями на окраинах. Эти заключения были умозрительными. Считали, что осадки уже заполнили дно океанских котловин и выровняли его, захоронив существовавшие ранее холмы. Измерения глубин, выполненные на «Челленджере» с интервалами в сотни миль одно от другого, почти не внесли ясности в этот вопрос. Только в 1924 г., когда немецкая экспедиция на «Метеоре» впервые провела непрерывные измерения глубин котловины Атлантического океана, обнаружили, что дно океана, видимо, изрезано не меньше, чем суша. Это представление подтвердилось и расширилось благодаря многочисленным эхограммам с записями профилей дна в самых различных частях Мирового океана. Открыты сотни высоких подводных гор. Особенно много оказалось их в Тихом океане. Эти горы часто образуют гигантские горные цепи. Взору исследователей открывались глубокие вытянутые желоба (некоторые из них были обнаружены до применения эхолота) — еще один комплекс крупнейших форм подводного рельефа. С другой стороны, исключительно точные самописцы глубин показывают существование на дне океана совершенно выровненных, плоских поверхностей. По современным представлениям о происхождении этих равнин, они образовались в результате отложения осадков из насыщенных взвешенными веществами потоков, которые устремлялись вниз по материковому склону и за его пределы в глубоководные области океана. Результатов одной экспедиции на «Челленджере» было бы недостаточно, чтобы установить этот процесс.

Подводные каньоны относятся к наиболее поразительным и интересным формам подводного рельефа. Существование долин, спускающихся вниз по склонам подводных окраин материков, было известно не менее ста лет назад благодаря промерным работам гидрографов различных стран. Много дали в этом отношении работы гидрографов Береговой и геодезической службы США и Британского адмиралтейства¹. Сначала этим каньонам уделялось мало внимания, и большинство геологов, интересовавшихся ими, объясняли их происхождение местным погружением окраин материков и речных долин под уровень океана. Такое объяснение ни у кого не вызывало удивления — ведь образование горных цепей на дне моря происходило, несомненно, вследствие вертикальных движений земной коры.

¹ Глубоководные долины дна океана изучались советскими исследователями в Бенгальском заливе Индийского океана. — *Прим. ред.*

Однако в результате эхолотных съемок было установлено, что подводные каньоны распространены чрезвычайно широко. Они были встречены на всех побережьях земного шара. Выяснилось, что склоны многих каньонов настолько круты, что их можно сравнивать со склонами Большого каньона реки Колорадо. С появлением этих данных многие геологи стали уже скептически относиться к гипотезе происхождения подводных каньонов в результате погружения речных долин суши. В самом деле, ведь такое происхождение их означало бы, что берега суши повсюду опустились на тысячи футов!

Совсем недавно М. Юинг и руководимая им группа ученых Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета (Палисейдс, вблизи Нью-Йорка), проследившая некоторые из этих долин, в частности подводный каньон реки Гудзон, установили, что долины опускаются до самого дна глубоководных котловин Атлантического океана. Они обнаружили там трогообразную долину, врезанную в окружающую поверхность дна на 100 и более футов. Долина спускается до глубины около 15 тысяч футов. Такие же сравнительно неглубоко врезанные долины были найдены на больших глубинах Тихого океана, где они служили продолжением подводных каньонов. Две такие долины спускаются на дно Атлантического океана по обе стороны Гренландии из Баффинова залива и Датского пролива. Эти неглубоко врезанные долины, расположенные на больших глубинах, нельзя считать остатками речных долин, некогда образовавшихся на суше. Многие геологи убеждены теперь, что подводные каньоны большей частью являются не погруженными речными долинами, а созданы каким-то еще не известным нам процессом на дне океана. Однако факт остается фактом: верховья хорошо изученных подводных каньонов имеют поразительное сходство с речными долинами.

Производившиеся в последние годы исследования проб донных осадков и коренных пород, поднятых со дна океана, принесли ученым массу сюрпризов. Так, например, были проделаны тщательные расчеты возможной мощности донных осадков, покрывающих ложе океана. Эти расчеты основывались на определениях объема осадочного материала, ежегодно сносимого ныне в океан с суши, и на соображениях о возрасте океанов. Исходя из таких данных, известный голландский морской геолог Ф. Кюннен в 1949 г. рассчитал, что средняя мощность осадков на дне океана должна быть равна примерно 2 милям. Вскоре после этого морские геофизики начали проводить сейсмоакустическое зондирование донных осадков океана, применяя методику сейсмической разведки геологов-нефтяников. И сразу же выяснилось, что мощность донных осадков в океане значительно меньше, чем предполагалось Кюнненом, в некоторых местах осадки вообще отсутствуют. Нередко мощность их не превы-

шает нескольких сотен футов. Предложено несколько объяснений этой загадки, но, насколько они достоверны, пока сказать трудно.

По мере того как исследования стали проникать все глубже в земную кору, под покровом донных осадков океанов были обнаружены горные породы, резко отличающиеся от пород, развитых под материками. Оказалось, что скорость распространения звука в породах, подстилающих дно океанов, значительно выше, чем в породах, залегающих под материками на тех же самых глубинах земной коры. Благодаря геофизическим исследованиям причины расположения ложа океана на более низком уровне, чем поверхность материков, стали понятнее. В самом деле, породы с более высокой скоростью распространения звука должны быть более тяжелыми, поэтому и поверхность земной коры под океанами должна быть опущена ниже материков.

Для изучения геологической истории океанов удалось использовать даже глубокое бурение. Одним из долго дискутировавшихся вопросов геологии было происхождение кольцевидных коралловых рифов — атоллов, столь широко распространенных в Тихом океане. Еще сто лет назад Чарлз Дарвин высказал предположение, что эти атоллы представляют собой прибрежные вулканические острова, медленно погружающиеся в море. Коралловые полипы строили на них свои колонии, поднимая их к уровню воды с той же скоростью, с какой погружался остров. Эта гипотеза вызвала долгие и жаркие споры. Лишь в последние годы бурение на атолле Эниветок, проведенное военно-морским флотом и Геологической службой США, помогло разрешить эту спорную проблему. Бурение показало, что представления Дарвина были совершенно правильными.

Волны и течения играют важную роль в преобразовании морского дна. Эта роль значительно важнее, чем считалось ранее. До самых последних лет предполагалось, что с увеличением глубины океанские течения либо полностью затухают, либо становятся практически неощутимыми уже на глубинах в несколько сотен футов. Мы обнаружили, однако, что в колонках донных осадков, взятых нами с больших глубин океана, имеются прослойки песка и гравия, указывающие на существование на больших глубинах сильных течений. Ныне считают, что на материковых склонах по окраинам океанов время от времени возникают потоки со скоростями, возможно не меньшими, чем в реках на суше. Эти потоки, стекая по материковым склонам, достигают глубоководного дна океана. Некогда предполагалось также, что действие морских волн на дно океана ограничено лишь мелководьями. Теперь известно, что морские волны воздействуют на поверхность океанского дна вплоть до глубин в несколько тысяч футов. Правда, это уже волны другого рода, чем волны на поверхности океана. Знаки ряби со-

вершенно такого же типа, какие образуются под действием волн, на берегу были обнаружены на подводных фотографиях, сделанных на больших глубинах на вершинах подводных гор.

Серьезная проблема защиты морских берегов от разрушения, возникшая в связи со строительством молов и других береговых сооружений, привела к объединению усилий в инженерных и геологических исследованиях процессов на морских берегах. В последние годы накоплено много данных, проливающих свет на эти процессы. Это позволит более продуманно строить порты вдоль таких негостеприимных побережий, как побережья Калифорнии и Флориды, где природные гавани — редкая счастливая случайность.

Прежние работы по изучению береговых процессов, проводившиеся в Скриппсовском институте, помогли рассеять мифы об опасностях береговых противотечений. Нашими измерениями установлены определенные придонные движения воды в сторону моря, но опасные течения существуют лишь у поверхности воды. Скорость их во много раз превышает скорость придонных течений, и именно они опасны для человека.

Итак, в наши дни морская геология развивается хотя и медленно, но верно. Нам предстоит теперь добиться, чтобы грунтовые трубки глубже проникали в толщу донных осадков. Впереди массовые измерения придонных течений, фотографирование дна в самых широких масштабах. С помощью батискафов мы должны не только заглянуть в таинственный мир океанских глубин, но и начать активно изучать его. Уже сейчас мы располагаем достаточными возможностями для разрешения этой проблемы. За последние десятилетия мы узнали о существовании огромных гор и долин на дне океана, а также каньонов, столь же глубоких, как и на суше по его окраинам. Распределение осадков даже на больших глубинах оказалось более сложным, чем мы раньше предполагали. Течения и волны, неизвестные нам ранее, действуют даже на самых больших глубинах океана. Необычайное сходство осадочных горных пород суши с современными донными осадками позволяет восстанавливать условия накопления этих пород в геологическом прошлом. Постепенно дно океана раскрывает человеку свои богатства. Перспективы их использования особенно заманчивы, поскольку в будущем могут быть исчерпаны наземные запасы нефти, кобальта, никеля, марганца и других полезных ископаемых.

КАК ВОЛНЫ И ТЕЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗУЮТ ДНО ОКЕАНА

Наше знакомство с различными областями дна морей и океанов целесообразно начать с явлений, влияющих на их развитие: с волнами и течениями. Почти каждая пядь дна океана — от береговой линии до максимальных глубин — находится под воздействием течений или различного рода волн. Влияние обычных морских волн, вызываемых ветром на поверхности океана, не проникает глубже нескольких сотен футов. Основное же значение для развития дна океана имеет совместное действие более глубоких волн и течений различного рода. Узнали мы об этом совсем недавно благодаря новым методам исследований.

ЗНАЧЕНИЕ ВОЛН

Волны на поверхности океана, образующиеся под влиянием ветра, имеют важное значение для деятельности человека. Именно поэтому вот уже более ста лет их изучают инженеры, физики, геологи и судостроители. Особенно большие успехи были достигнуты в этих исследованиях в годы второй мировой войны, когда военные моряки различных стран столкнулись с проблемой действия волн на морских берегах. В том, что успех десантных операций самым непосредственным образом зависит от характера волнения, союзные войска убедились, к сожалению, лишь после попытки высадить десант на атолле Тарава. Тогда стало ясно, что прогнозы волнения нужно готовить за несколько дней до высадки, чтобы назначить десантную операцию на время, когда волнение будет наименьшим. Следовало также учитывать различия в условиях волнения вдоль побережья и проводить высадку там, где ожидалось наиболее слабое волнение. Но для этого необходимо выяснить происхождение волн и пути их распространения из штормовых центров. В даль-

нейшем прогнозы волнения готовились для всех десантных операций, и успех союзников как в Атлантическом, так и в Тихом океане в значительной мере зависел от точности расчетов океанографов. Так, например, при вторжении в Нормандию день высадки десанта, назначенный первоначально на 5 июня 1944 г., был отложен на сутки, так как по прогнозам в этот день ожидалось сильное волнение. В последующие дни командование, планируя высадку солдат и выгрузку снаряжения, получало прогнозы волнения почти через каждый час. Связь между характером волнения и возможностью выгрузки при этом была настолько тесной, что прогнозы волнения на тот или иной день определяли, в сущности, количество снаряжения, которое можно было рассчитывать выгрузить в этот день.

После окончания второй мировой войны исследования в области метеорологии и океанографии отнюдь не прекратились; совершенствовалась созданная ранее техника, результаты исследований находили все большее применение в мирной жизни. Уже доказано, что предсказание характера волнения совершенно неопределимо при проектировании и устройстве таких дорогостоящих морских сооружений, как эстакады и искусственные острова, применяемые для бурения в море, или как морские радарные башни. Ценность прогнозов волнения состоит, конечно, не только в том, что они помогают предотвращать повреждение этих сооружений и обслуживающих их барж и буксиров, но и в том, что они уменьшают опасность для человека. Получив неблагоприятный прогноз, можно своевременно эвакуировать людей, прежде чем налетит ураган и начнется сильное штормовое волнение!

МЕХАНИЗМ ВОЛНОВОГО ДВИЖЕНИЯ

Подробное рассмотрение физической сущности волнения потребовало бы привлечения сложных математических формул и выкладок, а это не входит в задачи нашей книги. Но чтобы объяснить действие волн, следует все же ознакомиться с некоторыми их свойствами. На фиг. 3,А показана теоретическая волна, ее основные элементы и параметры. Верхняя точка волны называется ее *гребнем*, или вершиной, а нижняя — *ложбиной*, или подошвой. Расстояние от одного гребня до другого — это *длина* волны, а расстояние от подошвы до вершины по вертикали — ее *высота*. Время, в течение которого два гребня проходят последовательно мимо какой-то фиксированной точки, например мимо конца причала, называется *периодом* волны. Стрелки на фиг. 3,А показывают движение частиц воды в различных элементах волны. При этом видно, что на гребне частицы смещаются в сторону движения волны, а в ложбине —

в обратном направлении. Стрелки показывают, что слева от ложбины частицы воды поднимаются навстречу приближающемуся гребню. Справа от ложбины частицы воды подобным же образом опускаются соответственно смещению ложбины. В результате такого движения частицы воды совершают за каждый период волны полный цикл перемещения по круговой орбите, как это видно на фиг. 3,Б.



Фиг. 3. Показан характер движения воды в различных частях волн. Обратите внимание, что движение частиц воды на глубине, равной $\frac{1}{4}$ длины волны, значительно затухает.

Так обстоит дело в теоретической волне. В природе же волны значительно сложнее. Под действием ветра на поверхности воды образуются неровные холмы и ложбины, быстро передвигающиеся по морю. Форма их при этом постоянно меняется.

Медленно пролетая на вертолете низко над морем вслед за какой-нибудь приметной, особенно высокой волной, можно наблюдать, что очень скоро она затухает и теряется среди других небольших волн. В море одновременно видно множество волн самых различных размеров, перемещающихся в разных направлениях. Такое разнообразие объясняется очень большой изменчивостью силы и направления ветра. Волны, поднявшиеся во время шторма, продолжают двигаться примерно в том же направлении до тех пор, пока не достигнут берегов суши. При этом они могут выйти далеко за пределы штормового района.

Волны в районе шторма называют ветровыми, а за пределами штормового района — зыбью. Волны зыби значительно равномернее ветровых волн. При распространении волн на большие расстояния происходит как бы сортировка их, так как равномерные длиннопериодные волны зыби движутся быстрее, чем волны с коротким периодом. В результате этого короткопериодные и наиболее неравномерные волны отстают от зыби, оставаясь вблизи штормового района, а зыбь уходит далеко от него. Однако и зыбь тоже не вполне равномерна, и это связано с особенностями ее происхождения. Понаблюдайте, как катятся мимо пирса отдельные волны зыби, и вы заметите, что временами появляются серии особенно больших валов, совершенно одинаковых по размеру и периоду. Серии таких крупных волн обычно чередуются с более мелкими, но и более многочисленными волнами. Кстати сказать, промежутки времени, когда проходят эти более низкие волны, наиболее удобны для преодоления на шлюпке зоны прибоя. Если вы хотите подойти к берегу во время сильного прибоя, то присмотритесь к волнам. После того как вы заметите несколько особенно сильных прибойных волн, не теряйте времени и постарайтесь пробиться сквозь прибой к берегу: именно в этот момент пойдут первые более низкие волны. Этот метод, конечно, не гарантирует полной безопасности, но, как правило, выручает.

Как видно на фиг. 3, в теоретической волне частицы воды за каждый период совершают движения по замкнутой круговой орбите, возвращаясь в начальную точку. В природных же условиях частицы воды испытывают также небольшое поступательное движение и перемещаются поэтому подобно точке на ободе автомобильного колеса, буксующего на скользкой дороге. Бросьте с пирса или со шлюпки вблизи берега в воду какой-нибудь плавучий предмет, и вы увидите, как он будет неуклонно двигаться к берегу в результате поступательного движения частиц воды в волнах.

С глубиной орбитальные волновые движения частиц воды быстро затухают (фиг. 3, Б). На глубине, равной половине длины волны, эти движения становятся почти незаметными. Вот почему подводные лодки в погруженном состоянии во время шторма почти не испытывают качки; здесь создаются идеальные условия для ведения наиболее точных научных наблюдений, которым может помешать малейшая качка. Однако при особенно сильных штормах волновые движения могут проникать на довольно большую глубину. Известны случаи, когда после сильной зыби ловушки для омаров, поставленные у входа в Ла-Манш на глубине 180 футов, оказывались забитыми камнями весом до фунта каждый. У западных берегов Ирландии волны перемещали камни весом в несколько сотен фунтов на глубинах до 100 футов. У маяка Бишоп-Рок близ

берегов Англии волны иногда выбрасывают крупный песок, поднятый с глубины 150 футов.

На побережье южной Калифорнии часто можно наблюдать, как к берегу подходит крупная зыбь, хотя вокруг не заметно даже признаков шторма. Такая зыбь обычно обладает большим, 8—18 секунд, периодом. Некоторые из этих длиннопериодных волн приходят сюда издалека, из южной части Тихого океана, от берегов Новой Зеландии. Такая «южная зыбь» наблюдается в северном полушарии летом. Как раз в этот период в южном полушарии свирепствуют жестокие зимние штормы. Наоборот, зимой к берегам южной Калифорнии зыбь приходит с северо-запада, из центра штормовой области, лежащей к югу от Алеутских островов. Для побережий Европы характерна крупная зыбь, приходящая из различных районов Атлантического океана, расположенных южнее Гренландии. Исключительно крупная зыбь, образующая мощный прибой на западном берегу Африки у Касабланки, также служит примером волн, зарождающихся где-то очень далеко в открытом море. Силу этого прибоя пришлось испытать многим солдатам, участвовавшим в высадке десанта в Марокко во время второй мировой войны.

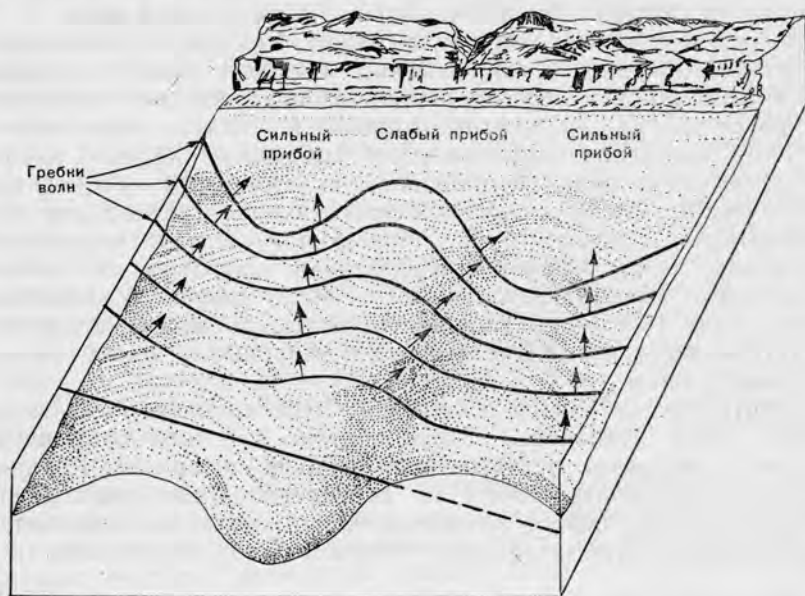
Жителям восточного побережья США крупная раскатистая зыбь почти незнакома. Здесь обычны короткие порывистые волны — результат местных или близких штормов. Крупная зыбь обычно обрушивается на противоположные, европейские и африканские, берега Атлантического океана, так как волны разгоняются ветрами главным образом западных румбов.

Прибой

Развитие волны при выходе на мелководье можно объяснить довольно простыми физическими процессами. Здесь происходит преобразование формы волны при сохранении ее общей энергии. В глубоком море ее энергия приводила в движение относительно мощный слой воды, а на мелководье передается все меньшему и меньшему объему воды. При этом скорость перемещения и длина волны уменьшаются, а высота увеличивается. Толщина водного слоя под ложбиной и гребнем волны оказывается неодинаковой, и соответственно увеличивается скорость движения гребня по сравнению со скоростью перемещения ложбины. Гребень волны обгоняет ложбину, и волна опрокидывается и разрушается, образуя прибой. Глубина разрушения зависит от длины волны и ее крутизны, то есть соотношения высоты и длины волны. Так, короткопериодные волны опрокидываются и разрушаются в прибое на участках с большей глубиной воды, чем длиннопериодные волны та-

кой же высоты¹. Это объясняется тем, что крутизна короткопериодных волн больше, поскольку их гребни располагаются ближе один к другому.

За полосой прибоя движение воды становится возвратнопоступательным. При подходе волны вода устремляется на пляж, а затем сбегает назад. Сила откатывающейся волны так велика,



Фиг. 4. На рисунке представлен изгиб гребня волны относительно подводного рельефа. Следует учесть, что энергия гребня воды, идущей по подводному каньону, уменьшается вследствие дивергенции, в то время как энергия гребня на подводных возвышенностях увеличивается благодаря конвергенции.

что может сбить человека с ног и увлечь его в кипящую полосу прибоя. Однако никаких сильных придонных течений в сторону моря, о которых часто приходится слышать самые невероятные истории, при этом не образуется; если такие течения и возникают, то лишь очень слабые.

Высота прибоя меняется вдоль берега в зависимости от рельефа дна. Наиболее простой случай показан на фиг. 4. Как видно, берег здесь прямой, но на дне возвышаются подводные гряды, разделенные ложбинами. Приближаясь к берегу, волны

¹ Высота длиннопериодных волн увеличивается перед их разрушением. Поэтому длиннопериодная волна, на больших глубинах имеющая высоту 5 футов, выходя на мелководье, образует 10-футовую прибойную волну.

выходят на мелководье; при этом движение их замедляется. Однако над подводными ложбинами, где глубина больше, этого не происходит. В результате фронт волны изгибается по синусоиде, над ложбиной он выдвигается вперед, и волны охватывают гребни подводных гряд, как клещами. Энергия волн



Фиг. 5. Фотография волны, опрокидывающейся над рифом. Фотография снята в Ла-Холье, Калифорния. Эта волна прошла тысячи миль из центра шторма, прежде чем разбилась на калифорнийском побережье.

над грядами особенно велика, поэтому здесь у берега образуется очень высокий прибой. Энергия же волн, проходящих над подводными ложбинами, уменьшается, и сильного прибоя не возникает. Таким образом, в зависимости от подводного рельефа высота прибоя на разных участках берега может сильно

изменяться. Во многих местах волны, пройдя над подводными долинами, вообще не создают прибоя или образуют его только при очень сильном шторме. Естественно, что такие места очень удобны для высадки на берег. Например, на побережье Калифорнии в Ла-Холье рыбаки всегда вытаскивают лодки на берег у верховьев подводных ложбин. В Западной Европе два рыбацких поселка — Назаре в Португалии и Кап-Бретон во Франции — также находятся непосредственно у верховьев подводных



Фиг. 6. Фотография волны, разрушающейся постепенно на большом расстоянии от берега. Фотография снята в Марбкед-Некк (Массачусетс) при ветре силой 11 баллов.

ложбин. В Калифорнии некоторые причалы и молы сооружены именно так, чтобы использовать преимущества участков побережья со слабым прибоем: эти молы в Редондо и Хьюнеми, а также причал в Мосс-Лендинге¹.

Воздействие различных видов морского волнения на дно не одинаково. Особенно сильно размывают его волны прибоя. Выберите тихий безветренный день, встаньте где-нибудь на пирсе и понаблюдайте, как подходят к берегу и разбиваются в зоне прибоя длиннопериодные волны зыби. Вы увидите, что, подходя к берегу, гребни волн опрокидываются и обрушиваются на

¹ Эксплуатация этих молов и причалов связана, впрочем, с другими трудностями, возникающими из-за оползней в подводных ложбинах (см. гл. VII).

гладкую поверхность воды у подножия волны. Такая опрокидывающаяся волна (фиг. 5) производит значительно больше разрушений и сильнее размывает дно, чем волна, разрушившаяся, не доходя до берега (фиг. 6), которая только бурлит и пенится, словно горный поток. Правда, волны последнего типа взмучивают осадки на значительном пространстве дна, поэтому общий эффект их воздействия может быть значителен. Нырните и проплывите у дна там, где происходит обрушение гребней опрокидывающихся волн, и вы легко заметите, что в момент прохождения над вами гребня волны песок на дне несколько взмучивается, однако количество взмученного материала оказывается не таким уж большим. А теперь, если вы сможете преодолеть волнение, плывите в полосу наката, где движутся уже разрушенные волны. Ничего вы там не увидите, потому что вода там совершенно мутная! Измерения с помощью приборов показали, что мгновенные значения скоростей придонных движений воды в зоне прибоя во много раз больше, чем за ее пределами.

ВДОЛЬБЕРЕГОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Течения, связанные с накатом волн на берег

Взмучиваемые волнами донные осадки переносятся во взвешенном состоянии вдольбереговыми течениями. В настоящее время причина возникновения этих течений изучена достаточно хорошо, хотя механизм их многими понимается часто еще неправильно. Вероятно, при этом слишком переоценивают роль придонных противотечений. С нашей точки зрения, основной причиной вдольбереговых течений служит небольшой суммарный перенос частиц воды к берегу, происходящий при волнении. Если волны подходят к берегу под некоторым углом, то поступательное движение воды отражается от него и превращается во вдольбереговой поток. Так, например, если волны подходят к берегу под углом слева, то вдольбереговой поток направлен вправо, и, наоборот, при подходе волн справа вдольбереговой поток идет влево. Скорость вдольбереговых течений может достигать 1 мили в час или даже больше и часто превышает скорость, с которой движется пловец.

Течения, направленные навстречу волнам

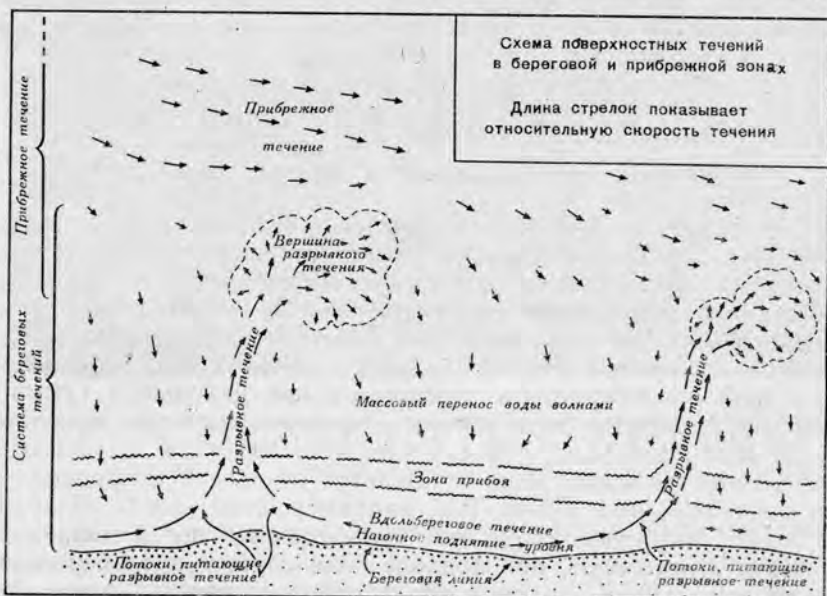
В некоторых случаях, когда соединяются волны различных направлений, течения бывают направлены навстречу волнам. Сталкиваясь, волны вызывают подъем уровня воды, например над подводными грядами (фиг. 4, 7). В результате такого схождения волн возникает течение, которое направлено из места

с наибольшим поднятием уровня вдоль берега навстречу подходящим волнам.

Эти два типа вдольбереговых течений могут образовать вблизи берега довольно глубокие промоины. Вот почему, купаясь, вы часто встречаете у самого берега значительную глубину. За этими желобами-промоинами глубина обычно снова уменьшается, так как здесь располагаются отмели — бары. На некоторых участках течения в таких желобах настолько сильны, что представляют серьезную опасность для пловцов.

Разрывные течения

Вода, принесенная к берегу волнами, должна вернуться обратно, она стекает в море через небольшие понижения в прибрежных барах. Такие противотечения особенно хорошо выра-



Фиг. 7. На рисунке даны типичные направления течений, связанных с переносом водных масс волнами в направлении берега. Обратите внимание на повышение уровня вдоль берега в центре рисунка, а также на течения, идущие из центра в обоих направлениях. Эти потоки усиливаются в разрывных течениях и ослабевают за пределами зоны бурунов.

жены около берегов с сильным прибоем. Противотечения — явление довольно опасное (фиг. 7, 8), их называют разрывными течениями, а в народе их именуют разрывными отливами¹.

¹ Такое название неправильно, так как разрывное течение не связано с приливо-отливными явлениями.

Большинство несчастных случаев с купальщиками связано именно с этими противотечениями. При изучении разрывных течений выяснилось, что сами по себе они не могут затянуть пловца в глубину, как считают многие. Они лишь уносят его в сторону открытого моря, а так как при этом пловец может попасть на мелководный бар, то со страху ему кажется, что течение тащит его на дно. Если к тому же он наглотается воды



Фиг. 8. Фотография разрывного течения, снятая с самолета у побережья штата Орегон. Течение выходит из зоны прибоя и образует водоворот по часовой стрелке. Подобные течения опасны для пловцов вследствие сильных потоков, направленных в море.

и выбьется из сил, борясь с волнами, то дело может кончиться плохо. Вблизи берега разрывное течение захватывает всю толщу воды до дна, но дальше в море оно становится уже поверхностным. В южной Калифорнии почти все случаи, когда сотрудникам спасательных станций приходится спешить на выручку утопающим, связаны с разрывными течениями. Опасность разрывных течений теперь уже достаточно хорошо известна, поэтому Береговая служба иногда посылает вертолеты, чтобы спасти унесенных такими течениями купальщиков.

Конечно, для сильного и опытного пловца разрывное течение не так уж опасно, но даже тренированные пловцы лишь с

большим трудом могут выплыть к берегу против такого течения. Лучшее средство избежать в таких случаях опасности — это плыть не к берегу, а вдоль него в ту или другую сторону, чтобы выбраться из промоины на мелководье, где течение ослабевает или даже направлено к берегу.

Иногда из разрывного течения можно извлечь и некоторую пользу. Например, спортсмены, увлекающиеся плаванием на доске, часто ищут разрывное течение, чтобы воспользоваться им и скорее выбраться за полосу прибоя. К тому же и прибой над ложбиной стока разрывного течения всегда бывает слабее и преодолеть его там легче. Точно так же разрывные течения могут использоваться опытными гребцами, чтобы пройти на шлюпке сквозь полосу прибоя. Им помогают при этом большая глубина воды в промоине и уменьшающаяся высота прибоя над ней.

Находясь на пляже, часто можно наблюдать разрывное течение. Внимательно приглядевшись, вы замечаете, что в каком-нибудь месте прибой почему-то слабее, чем по сторонам. Значит, глубина там больше. Кроме того, легко обнаружить, что небольшие короткопериодные волны разбиваются здесь немного дальше от берега. Вода в полосе разрывного течения нередко покрыта небольшими, но очень четкими и стремительными волнами. Разрывные течения иногда выносят мутную воду с большим количеством песка, тогда как по сторонам от течения вода совершенно чистая. Если вы стоите на каком-нибудь небольшом возвышении, например на вышке спасательной станции и на береговом обрыве, то вам легче заметить резкое отличие цвета воды вдоль разрывного течения. Часто по его краям собирается пена.

Вдольбереговые и разрывные течения играют важную роль в переносе донных осадков. Во время сильного волнения в море заметно большое количество взвешенных частиц, выносимых разрывными течениями на расстояние в тысячи футов от берега. При штормах у берегов Калифорнии, которые обычно сопровождаются сильными ливнями, в океан стекают бесчисленные потоки мутной воды. Разрывные течения выносят эту воду далеко в океан, а вместе с ней и осадочный материал. Отчетливая граница между чистой морской водой и потоками мутной воды позволяет проследить такие течения на большое расстояние от берегов, иногда на сотни миль и больше.

Разрывные течения коралловых рифов

Течения, в принципе сходные с разрывными, наблюдаются в проходах коралловых рифов. Они особенно опасны из-за своего непостоянства. В периоды, когда этих течений нет, вода в проходах совершенно спокойна и манит к себе пловцов. Воз-

никают эти течения так. Риф играет роль волнолома для зыби, идущей из открытого океана. Время от времени отдельные особенно крупные волны перехлестывают через риф и создают избыток воды в лагуне. В конце концов накопившаяся в лагуне вода должна вернуться в океан. Когда она находит себе проход сквозь рифы, то с большой скоростью устремляется через него в океан. Я однажды попал в такое течение, собирая кораллы в проходе на рифе острова Мидуэй. К счастью, я успел ухватиться за какой-то выступ и держался за него изо всех сил, чтобы не быть унесенным в полосу прибоя с внешней стороны рифа. Мне повезло, течение было непродолжительным, и я вскоре смог выбраться на берег.

Приливные течения

В образовании течений, размывающих дно океана, важную роль играют приливы, возникающие под влиянием Луны и Солнца. Явление это очень сложное, но в общих чертах сущность его объяснить легко. Притяжение Луны, а также Солнца вызывает подъем воды в океане, называемый приливной волной. Однако нельзя представлять себе, что прилив должен быть самым высоким именно тогда, когда Луна стоит у нас над головой. Если бы дело ограничивалось влиянием одной Луны и земной шар был бы сплошь покрыт водой, то приливная волна поднималась бы в тот момент, когда Луна находится у нас над головой. Одновременно приливная волна возникла бы и на противоположной стороне земного шара, потому что Луна притягивает не только воду с обращенной к ней стороны Земли, но и саму Землю, так что на обратной стороне вода как бы отстает по инерции. Примерно так получается, если дернуть человека за руку: он качнется при этом в вашу сторону, а другая рука его невольно поднимется.

Однако к действию Луны примешивается еще и влияние Солнца. Если Луна и Солнце оказываются одновременно с одной стороны Земли или, наоборот, с противоположных сторон Земли, то их совместное воздействие на воду океана будет наиболее сильным. Такое положение наблюдается в новолуние и в полнолуние, и приливы при этом действительно самые высокие. Их называют сизигийными. Когда же Луна и Солнце располагаются к Земле под прямым углом друг к другу, силы их притяжения вызывают противоположное действие, в результате приливы бывают самыми низкими. Называют их квадратурными.

Время наступления прилива и направление возникающих при этом приливных течений зависят также и от других причин. Берега материков преграждают путь приливной волне и вызывают сложные приливные движения воды вдоль материко-

вых окраин. Как следствие этого в центре океанов — в точках, называемых подальными, — приливы и отливы оказываются почти неощутимыми, ибо уровень воды там почти не изменяется. Но к бережьям материков приливы подходят уже в виде высоких длиннопериодных волн. Особенно высокими оказываются приливные волны в верховьях узких и вытянутых заливов, таких, как залив Фанди, или в проливах, например в Ла-Манше. Это связано с тем, что естественные периоды колебаний воды в таких заливах или проливах совпадают с периодом приливных колебаний уровня, и здесь возникает явление резонанса. С другой стороны, в большинстве внутренних морей — в Мексиканском заливе, Средиземном море и т. п. — высота приливов невелика, потому что проходы в эти моря очень узкие и приливная волна открытого океана в них не проникает.

Приливные течения достигают особенно больших скоростей там, где по соседству располагаются районы с большой разницей в высоте приливов. Если такие районы соединялись узкими проливами, то течения в них иногда бывают исключительно сильными. Поэтому во входах в заливы и в узкостях между островами очень часто наблюдаются сильные приливные течения. Широко известными примерами мест, где такие течения настолько сильны и даже открывают возможности энергетического использования силы приливов, являются бухта Пассамакуодди в заливе Мэн и побережье Нью-Брансуика. Скорость приливных течений достигает здесь 15 узлов¹. Рекордная скорость была зарегистрирована в проливе Симор-Нарроус между островом Ванкувер и побережьем Британской Колумбии². Вода устремляется в пролив со скоростью горного потока и, естественно, сильно размывает дно.

Одной из важнейших особенностей приливных течений является то, что они, по крайней мере теоретически, охватывают всю толщу воды и скорости их от поверхности воды до дна меняются очень мало. Размыв дна приливными течениями должен быть поэтому весьма интенсивным. Так это и есть в действительности. Правда, инструментальные измерения скоростей таких придонных приливных течений пока еще крайне немногочисленны. Во время второй мировой войны я находился однажды на корабле, который стоял на якоре у входа в пролив Золотые Ворота. Глубина здесь была 100 футов. С помощью вертушки для измерения течений мы обнаружили, что у поверхности скорость движения воды была 6 узлов, а в несколь-

¹ Узел — принятая в морской практике единица скорости, равная 1 морской миле в час.

² В настоящее время скорость течений в этом проливе значительно снизилась, так как большая часть скал, перегораживавших и сужавших пролив, взорвана.

ких футах от дна — 3 узла. Такое уменьшение скорости по вертикали вызвано трением воды о дно.

Приливные течения создают глубокие желоба-промоины у входа в заливы. Так, например, в проливе Золотые Ворота образовалась впадина глубиной до 360 футов. В одном из проливов Японского моря есть желоб-промоина глубиной около 1500 футов, окруженный мелководьем. В обоих случаях столь значительная глубина объясняется размывом дна течениями, устремляющимися во время прилива в пролив, а при отливе — в открытое море. Даже когда активного размыва приливными течениями не происходит, их влияние на дно все же сказывается в том, что накопление донных осадков происходит там замедленно. Дно в таких местах часто бывает скалистым или покрыто грубыми осадками, например гравием. Илистое же дно наблюдается лишь в тех случаях, когда нет никакого другого осадочного материала, который могли бы переносить приливные течения.

Тихоходные суда часто оказываются во власти приливных течений. Но даже быстроходному судну иногда не удается войти в узкий пролив навстречу приливному течению. Кроме того, приливные течения могут порой создавать серьезную опасность тем, что выносят суда на скалы. Сравнительно не так давно, когда фарватер еще не был обозначен должным образом буями, очень трудно было проходить проливом Вудс-Хол (близ полуострова Кейп-Код). Помню одно такое плавание на парусной лодке во время сизигийного прилива. Сначала нам пришлось стать на якорь у западного входа в пролив и ждать, пока течение не станет попутным. Когда мы наконец поставили паруса и вошли в пролив, течение достигло такой силы, что буи по сторонам фарватера оказались затопленными. Распознать их можно было только по сильным водоворотам над ними, что, впрочем, ничем не отличало их от подводных скал. Фарватер в проливе был таким извилистым, а течение столь быстрым, что мы никак не могли определить свое место на карте. Нам ничего не оставалось, как обходить все наиболее крупные водовороты, постоянно рискуя удариться о скалы. Мы крутились на месте и, пережив несколько опасных моментов, вышли наконец из узкости Вудс-Хол и поспешили в пролив Вайньярд. До чего же приятно было видеть спокойные воды этого пролива!

ОКЕАНСКИЕ ТЕЧЕНИЯ

Гольфстрим и подобные ему другие океанские течения, подробно описанные во многих книгах¹, также воздействуют

¹ Rachel Carson, *The Sea Around Us*, New York, Oxford Univer-

на дно. Возникают эти течения под действием ветров устойчивых направлений — восточных пассатов в тропиках и западных ветров умеренных широт. При этом в океане образуются как бы гигантские круговороты водных масс. Движение их в общем очень устойчиво, хотя от места к месту и во времени скорости течения меняются. Отдельные течения этой планетарной системы циркуляции образуют круговороты в пределах каждого океана севернее и южнее экватора. В северном полушарии течения направлены по часовой стрелке, а в южном — против нее, в соответствии с господствующими направлениями атмосферной циркуляции.

Уже проведено множество измерений скорости Гольфстрима как на поверхности воды, так и в ее толще. К сожалению, практически еще никому не удалось измерить скорость этого течения в придонном слое. Однако некоторые новейшие исследования косвенным образом указывают, что течения на поверхности океана и у его дна направлены в противоположные стороны¹. Еще в 1885 г. Дж. Пилсбэри на судне Береговой и геодезической службы США «Блейк» измерил скорость в Гольфстриме на глубине 2500 футов и в 100 футах от дна, обнаружив при этом достаточно сильное придонное течение. Косвенные наблюдения показывают, что местами течение Гольфстрим проникает на глубину до 1 мили, сохраняя достаточную скорость, чтобы эродировать дно. Так, например, несомненно, что Гольфстрим размывает подводное плато Блейк, лежащее у берегов Флориды и Джорджии на глубине 2500—3500 футов. Взятые в этом районе пробы донных осадков состояли в основном из грубообломочного каменного материала и известковых скелетов животных, обитающих обычно на твердых скальных грунтах. Тонкозернистые осадки здесь почти не отлагаются.

Вдоль берегов Японии проходит Японское течение, называемое также течением Куроисио. Скорость этого течения несколько меньше, чем у Гольфстрима, но дно здесь также скалистое и лишено осадочного покрова на глубине по крайней мере до 4500 футов. Правда, скалистое дно представляет собой довольно крутой склон и, возможно, обнажилось в результате подводных оползней. Однако поверхность плато Блейк у берегов Флориды почти горизонтальна, так что оползни там ни при чем, а все дело в придонных течениях.

sity Press, 1951, Henry Chapin, F. G. Walton Smith, The Ocean River, New York, Charles Scribner's Sons, 1952.

¹ Время глубинной циркуляции вод сейчас определяют радиоуглеродным методом. По данным советских ученых, скорость глубинной циркуляции значительно больше. В связи с этим захоронение в глубинах океана отходов атомного производства опасно.— *Прим. ред.*

СУСПЕНЗИОННЫЕ ПОТОКИ

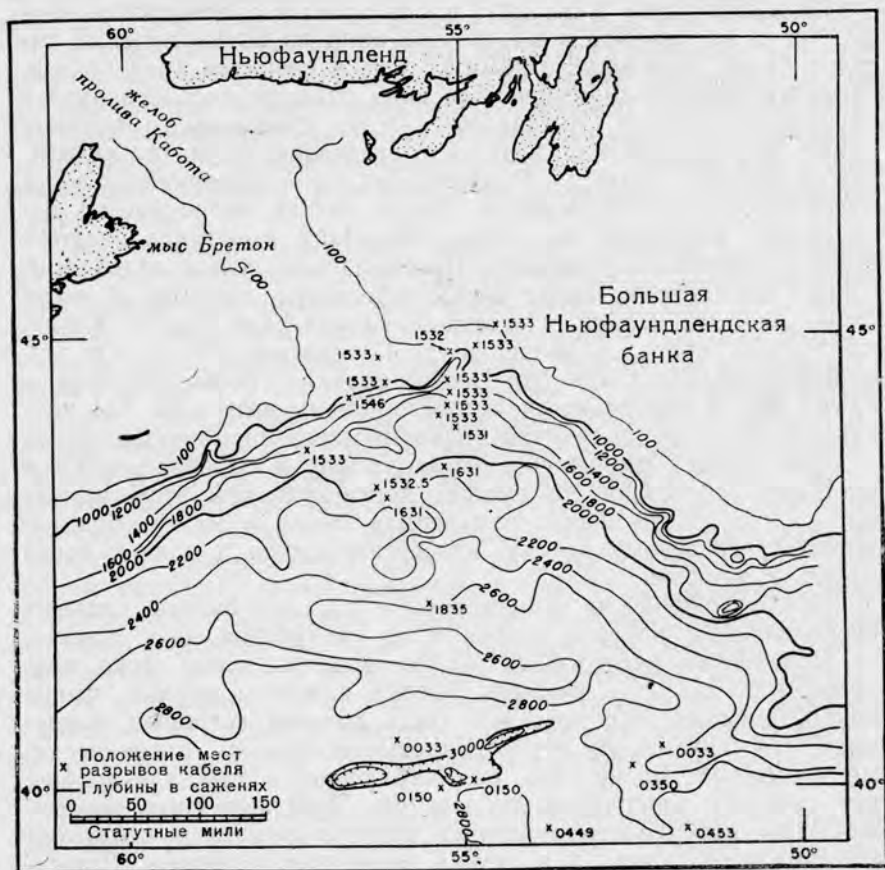
Наденьте маску и нырните вдоль илистого подводного склона, тогда вы увидите в миниатюре один из интереснейших типов течений, играющих огромную роль в развитии дна океанов. Взмутите рукой ил! Взмученная вода тяжелее чистой и начнет стекать по склону. Мутная вода — это суспензия, и поэтому такие мутьевые потоки называют суспензионными (по-английски — Turbidity current). Впервые они были обнаружены в искусственных водохранилищах. Такие потоки периодически пересекают, например, все озера Мид-Лейк и останавливаются только у плотины Хувердам. Предполагают, что в водохранилищах эти потоки имеют очень небольшую скорость и несут лишь илистые осадки. Известный голландский геолог Кюнел продемонстрировал в университете Гронингена с помощью экспериментального лотка, что грубые осадки — песок и гравий — также могут переноситься суспензионными потоками. Он подсчитал, что если достаточно большая масса насыщенных водой осадков начнет скользить вниз по склону и перейдет затем в состояние суспензии, то сможет достигнуть при этом весьма большой скорости. Такая взмученная масса воды подобна неистовому грязевому потоку, низвергающемуся в долину через брешь в плотине.

Предположение о существовании на дне океана сильных суспензионных потоков основано на следующих двух фактах.

Новейшими исследованиями установлены слои песка или, реже, ила там, где глубины океана слишком велики, чтобы грубозернистый материал мог быть занесен ветровым волнением. Не связаны эти грубозернистые осадки и с океаническими течениями. Более того, они наблюдаются там, где вообще нет сильных поверхностных течений. Песчаные слои обнаружены на поверхности огромных конусов выноса у подножия материкового склона и в устьях подводных каньонов. Естественно предположить, что накопление песчаного материала связано с подводными оползнями со склонов или вдоль русла подводных каньонов. С другой стороны, находки прослоев хорошо отсортированного и чистого песка и так называемая «градационная слоистость»¹ свидетельствуют скорее о переносе материала именно потоками, а не оползнями. Кроме того, маловероятно, чтобы оползень мог двигаться по весьма пологим склонам подводных конусов выноса. А именно там-то и обнаружены песчаные прослои.

На мощные суспензионные потоки указывают и разрывы подводных кабелей. Самый поразительный случай таких раз-

¹ Малоизвестный термин, означает уменьшение размеров зерна от подошвы к кровле.— *Прим. ред.*



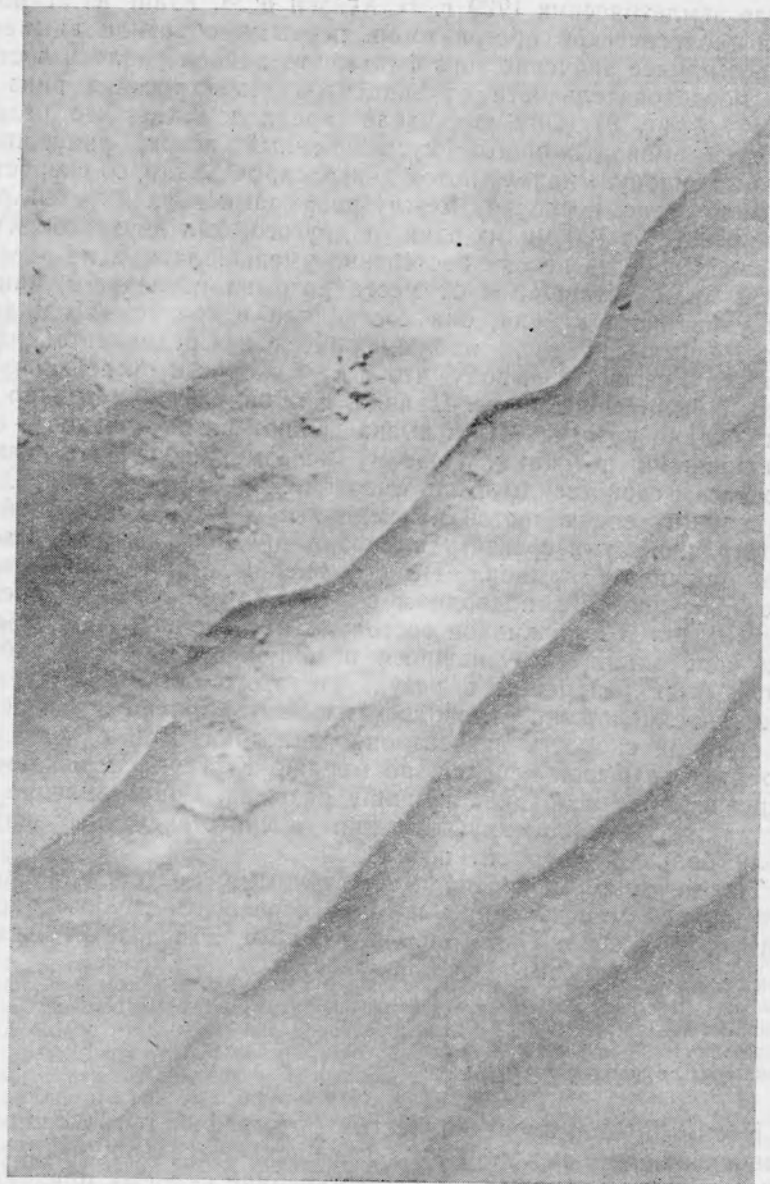
Фиг. 9. Разрывы кабеля во время землетрясения на Большой Ньюфаундлендской банке. Эти разрывы приписывались оползням, суспензионным потокам или внезапному изменению плотности донных отложений под кабелями. Сроки разрывов даны в соответствии с проведенными наблюдениями, хотя время незначительных разрывов не было определено. При определении момента разрывов принята 24-часовая система, и моменты, выходящие за пределы этого времени, относятся к следующим суткам. Землетрясение произошло в 15 час. 31 мин., и многие разрывы последовали тотчас же. Если бы разрывы внешних кабелей произошли вследствие суспензионных потоков, начавшихся в том месте, где порвано так много кабелей во время землетрясения, то скорость этого течения должна быть очень высокой, возможно до 60 миль в час вблизи центра землетрясения, но убедительных доказательств в пользу этого нет.

рывов произошел к югу от Большой Ньюфаундлендской банки после землетрясения 1929 г. Б. Хейзен и М. Юинг из Ламонтской геологической обсерватории первыми обратили внимание на возможное значение того факта, что кабели рвались в строгой последовательности от эпицентра землетрясения вниз по склону (фиг. 9). Они высказали предположение, что разрыв кабелей вызвал мощный суспензионный поток, ринувшийся вниз по склону. Вначале поток двигался, очевидно, со скоростью 60 миль в час, поскольку между разрывами двух кабелей, расположенных в 120 милях один от другого, был двухчасовой интервал. Скорость потока постепенно уменьшалась, и на отрезке в 350 миль, оставшемся от места разрыва последнего, наиболее удаленного кабеля, она составляла в среднем 25 миль в час. Разрывы кабелей, наблюдавшиеся в Средиземном море, привели Хейзена к выводу, что и там скорости суспензионного потока были аналогичны. Правда, в обоих случаях трудно судить, какие разрывы были вызваны оползнями, а какие — суспензионными потоками. Поэтому невозможно решить, каким процессам свойственны столь высокие скорости движения. Один из ведущих специалистов по механике грунтов К. Терцаги из Гарвардского университета высказал предположение о совсем иной причине разрывов. По его мнению, при землетрясении масса осадков на подводном склоне могла быть мгновенно превращена в полужидкое состояние и совершать волнообразные колебания. Погрузившиеся в полужидкую массу кабели могли быть разорваны в результате этого резкого движения. Такое предположение позволяет избежать допущения необычно высокой скорости суспензионного потока. Кроме того, сам характер разрывов кабелей, по мнению К. Терцаги, исключает суспензионный поток как причину разрыва. Спротивление воды также, по-видимому, должно препятствовать развитию столь большой скорости потока.

Тем не менее мы располагаем данными, подтверждающими способность суспензионных потоков переносить грубозернистые мелководные осадки на большие глубины. Эти потоки, очевидно, интенсивно размывают дно океана.

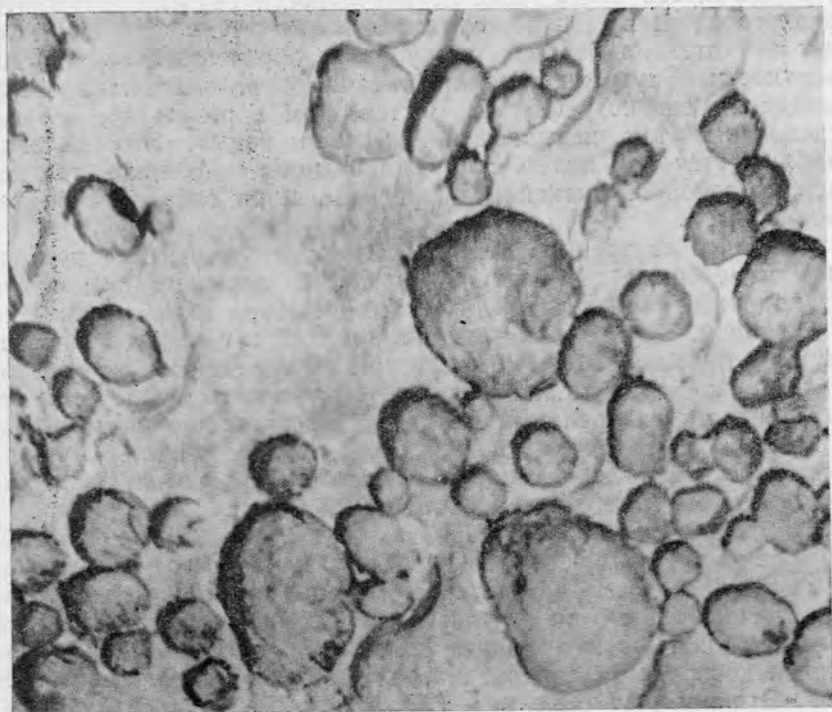
ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ

Несмотря на малое количество фотографий глубоководного океанского дна, некоторые из них исключительно интересны тем, что явно указывают на существование сильных придонных течений. Знаки яри были сфотографированы, например, на плоской вершине горы на глубине 4500 футов (фиг. 10). Предполагают, что вершина этой горы миллионы лет назад находилась в зоне прибоя. Однако образовавшиеся в то время знаки



Фиг. 10. Знаки ряби, отмеченные на глубине 4500 футов на подводной горе Сильвания, Маршалловы острова.

ряби, конечно, не могли сохраниться до наших дней. Та же самая фотография показывает нам следы ползавших животных, которые должны были очень быстро уничтожить такие эфемерные формы рельефа, как знаки ряби. Ясно, что эта рябь — образование самого недавнего времени.



Фиг. 11. Фотография, снятая на глубине 18 тысяч футов в 300 милях к восток-юго-востоку от Бермудских островов. На снимке видны признаки эрозионного воздействия придонных течений рядом с кружками, которые, вероятно, представляют собой конкреции окиси марганца. Это одна из самых глубоководных фотографий.

Еще более неожиданными оказались промоины вокруг конкреции, обнаруженные на дне Атлантического океана (фиг. 11). Промоины также не могут быть древним образованием, так как легко могли бы быть уничтожены либо деятельностью животных организмов, либо выровнены осадконакоплением. Не похоже также, что они созданы суспензионными потоками, поскольку в этом районе нет никакого склона, с которого могли бы стекать такие потоки.

Причиной подобных знаков ряби и промоин могут быть внутренние волны. Волны такого типа действуют в толще воды, никак не проявляясь на ее поверхности. Внутренние волны легко наблюдать в стеклянном сосуде, налив в него жидкости различной плотности и разного цвета, чтобы увидеть их границу через боковую стенку. А теперь слегка качните сосуд! Вы увидите сквозь стекло, как по поверхности раздела жидкостей разного цвета пробежит серия волн. Амплитуда этих волн будет значительно больше, чем у волн, образовавшихся на поверхности. Внутренние волны океана были описаны впервые шведским океанографом О. Петтерсоном в результате его исследований так называемой «мертвой воды». Это явление наблюдается под килем судов, плавающих в Арктике, где поверхность соленой океанской воды располагается слой пресной тающей воды.

Позднее внутренние волны были обнаружены при повторных измерениях температуры океанской воды на нескольких стандартных горизонтах. Обычно температура воды понижается с глубиной. Крупные внутренние волны будут вызывать поэтому заметные колебания температуры на определенных горизонтах. О скоростях придонных течений, вызываемых этими необычайными внутренними волнами, известно еще очень мало. Теоретические подсчеты показывают, однако, что они должны быть достаточно сильными, чтобы размывать дно океана и даже создавать на его поверхности знаки ряби¹.

В океане существуют еще и другие типы волн и течений, многие из которых все еще изучены слишком мало, чтобы говорить здесь о них. Очень интересны, например, волны, не имеющие ничего общего ни с лунным, ни с солнечным приливом, ни с каким-либо иным внешним фактором, а вызываемые смещениями поверхности дна океана, сопровождающимися землетрясениями. Эти волны ученые называют японским словом «цунами». По существу, это сейсмические волны гидросферы. Они обладают столь значительной длиной, что захватывают всю водную толщу океана. Поскольку с этими волнами связаны некоторые специальные проблемы и вследствие особого интереса к ним, мы рассмотрим волны цунами подробнее в следующей главе.

Итак, познакомившись с различными движениями воды в океане, мы обнаружили, что они захватывают значительно большие глубины, чем предполагалось ранее. Следовательно, эти движения играют весьма важную роль в формировании глубоководного рельефа дна океана. С другой стороны, доказа-

¹ Скорость придонных движений воды, связанных с внутренними волнами, по данным советского ученого Б. А. Тареева, может достигать 1 см в секунду.— *Прим. ред.*

тельства существования придонных течений в виде непосредственных измерений их скоростей все еще недостаточны. Можно надеяться, что в ближайшем будущем в этом направлении будут достигнуты значительные успехи благодаря применению некоторых новейших образцов измерителей течений. Вот тогда мы сможем судить о придонных течениях гораздо более уверенно. Пока же различные доступные уже сейчас косвенные доказательства, например подводные фотографии, убеждают, что такие течения могут быть одним из важнейших факторов в гипотезах о происхождении подводного рельефа.

Глава II

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ МОРСКИЕ ВОЛНЫ

*МОИ НАБЛЮДЕНИЯ ВО ВРЕМЯ КАТАСТРОФЫ
НА ГАВАЙЯХ 1 апреля 1946 г.*

Слово «цунами» звучит на Гавайях зловеще после событий 1 апреля 1946 г. Мои личные переживания этого дня могут служить как бы вступлением к серьезному рассмотрению проблемы волн цунами. В то время мы с женой снимали коттедж на берегу залива Кавела в северной части острова Оаху (фиг. 12). Еще накануне, в воскресенье, пляжи и рифы были усеяны людьми, и в домиках на побережье кипела жизнь. Вечером, к счастью, почти все покинули берег и вернулись в Гонолулу. Ранним утром следующего дня наш мирный сон был нарушен звуком, подобным реву десятков паровозов, выпускавших пары за стеной нашего дома. Казалось, что звук этот заполнил Вселенную. Мы вскочили с постели и бросились к окну. Там, где раньше был берег, мы не увидели ничего, кроме кипящей воды, перехлестнувшей через береговой песчаный вал высотой 30 футов и подступившей вплотную к дому. Я бросился за фотоаппаратом, забыв о таких мелочах, как одежда, очки, часы и записная книжка. Открыв дверь, я заметил с некоторым сожалением, что вода больше уже не прибывает, а даже, наоборот, стремительно сбегает по склону. Я начал понимать, что это, возможно, цунами, и окончательно убедился в этом, когда вода стала быстро уходить в океан и уровень ее понизился на несколько метров, обнажив коралловые рифы перед домом.

Повсюду извивались и бились рыбы, оказавшиеся на суше, как только волна отступила. Торопясь нащелкать побольше снимков, я, к своему стыду, случайно сделал два снимка на один и тот же кадр, фотографируя обнажившийся риф. Пытаясь блеснуть эрудицией, я сказал жене: «Должна быть еще вторая волна, но она будет уже не такой сильной, как первая, разбудившая нас. Жаль, что не пришлось снять первую».

Вы думаете, я ошибся? В течение нескольких минут, пока я стоял на краю берегового вала перед домом, вода поднялась и

перехлестнула через внешний край обнаженного перед этим рифа. Она поднималась все выше и выше, а затем ринулась вперед. «Вот теперь,— сказал я,— удачный момент для хорошего снимка». Снял еще кадр, но рука в этот момент дрогнула. Поскольку вода продолжала приближаться, я щелкнул еще один кадр, к счастью более удачный (фиг. 13). По мере того как волны вздымались, я уже начал сомневаться, в самом ли деле эта волна будет меньше первой.



Фиг. 12. Схематическая карта района, где автору пришлось пережить цунами.

Я крикнул жене, чтобы она бежала назад, под защиту дома, но она уже и без меня это сделала, так что мне оставалось лишь последовать за ней. А вода уже бурлила на том месте, где я только что стоял. Раздался звон разбитого стекла в окнах нашего дома с фасада. Слева от нас к полю сахарного тростника волна несла холодильник. Справа водяная стена уже перехлестнула дорогу, перерезав нам путь к бегству. С изумлением наблюдали мы, как соседний дом постепенно разваливался и превратился наконец в кучу бревен. Наконец, вода остановилась и мы остались на маленьком островке, защищенные неразрушенной частью дома. Она оказалась настолько прочной,

что выдержала удар гигантской волны. Волна разбилась на тростниковом поле и утратила свою ярость.

Моя уверенность, что волны цунами должны последовательно уменьшаться, быстро таяла. Заметив, что между двумя первыми волнами был достаточно большой промежуток времени (позднее мы установили, что он равен 15 минутам), мы решили бежать вдоль берега к проходящему выше шоссе. По пути мы встретили промокших, перепуганных гавайских женщин, ломавших руки и не знавших, что делать. С трудом нам удалось



Фиг. 13. Фотография надвигающейся волны цунами. Снимок сделан автором с берега в том месте, где он жил 1 апреля 1946 г. Спустя несколько секунд волна затопила берег, выбросив на него глыбы кораллового известняка и разрушив строения.

уговорить их бежать вместе с нами вдоль берега к прогалине в тростниковом поле. Только мы бросились бежать, как следующая огромная волна перекадилась через риф и со страшной силой разбилась у обрыва над пляжем. Поднявшись огромной стеной, она понеслась за нами и со страшным ревом разлилась по полю. Преследуемые волной, мы успели добежать до безопасного места.

Здесь собралась пестрая толпа беженцев. Одна супружеская чета готовила завтрак, когда на их дом обрушилась первая волна, подняла его с фундамента, пронесла несколько сотен футов по полю, а затем так мягко опустила, что даже завтрак остался на столе. Однако им было, конечно, уже не до него.

Некоторым жителям с трудом удалось выскочить из разваливавшихся домов.

Мы направились вдоль дороги, пока не достигли залива Кавела; отсюда мы увидели, как на берег обрушилось еще несколько больших волн. Они шли крутой стеной, подобно приливному бору, который я наблюдал однажды в заливе Фанди



Фиг. 14. Дома, смытые в озеро в заливе Кавела на озере Оаху во время цунами 1946 г.

у Монктона, в Нью-Брансуике, и в руслах рек, пересекающих заболоченное побережье бухты Мон-Сен-Мишель в Нормандии. Мы видели, как дома разлетались в щепки. Один из них волна бросила в прибрежный пруд прямо на крышу дома, который оказался там раньше (фиг. 14); еще одна хижина спокойно качалась на волнах в заливе.

Наконец, когда пришло около шести заметно ослабевших волн, я решил, что следовало бы пойти назад и посмотреть, что нам угрожало, если бы мы вовремя не удрали из дома. К тому же мы были почти раздеты и нужно было найти себе одежду. Я уже подошел к двери, когда вдруг на меня обрушилась стена воды. Казалось, весь остров исчез под захлестнувшей его волной. Я кинулся к стоявшему поблизости дереву и буквально взлетел на него, думая только о том, как бы спастись. Под напором волны дерево раскачивалось, как тростинка. Так же как и другие, эта волна вскоре стала спадать, сменившись менее высокими волнами.

Придя в себя, мы увидели, что половина дома уцелела, и начали подбирать остатки имущества. Я охотился по всему полю, пытаюсь собрать книги и записи, безжалостно разбросанные волнами. В конце концов мы отыскали даже нашу стеклянную посуду. Она оказалась совершенно невредимой, но была занесена песком¹. Мои водонепроницаемые часы хозяин нашел под домом через неделю. Хорош океанограф, подумал я, не знаешь, что цунами нарастает с каждой новой волной! Я тотчас бросился перелистывать книги и, ничего не найдя в них об увеличении высоты волн, успокоился. А ведь именно это самое важное. Можете быть уверены, что те из нас, кто пережил тогда на Гавайях цунами, на всю жизнь запомнили это правило. Недавно я очень обрадовался, увидев в местном магазине памятку для населения о том, как спастись от цунами. Теперь создана Служба предупреждения цунами; она объявляет тревогу, как только в океане регистрируют землетрясение, которое может вызвать цунами. Тревога объявляется также, если волны цунами отмечены на других островах или если на берегу наблюдается необычно сильный отлив.

Легко понять значение этих предупреждений. Ведь 159 человек, погибших во время цунами в 1946 г., могли бы спастись! Надо было убежать куда-нибудь повыше! Гавайцы любят вставать рано и всегда внимательно присматриваются к состоянию океана. Они обязательно заметят внезапное уменьшение шума прибоя, когда море вдруг отступает от берега. Однако большинство из них и не подумали спастись, а отправились подбирать выброшенную на рифы рыбу. Это и погубило их.

Цунами 1957 г. причинило на Гавайях почти такой же материальный ущерб, как и в 1946 г., однако при организованной системе предупреждения жертв уже не было. Я был потрясен, когда узнал, что и на этот раз волны цунами разрушили наш дом.

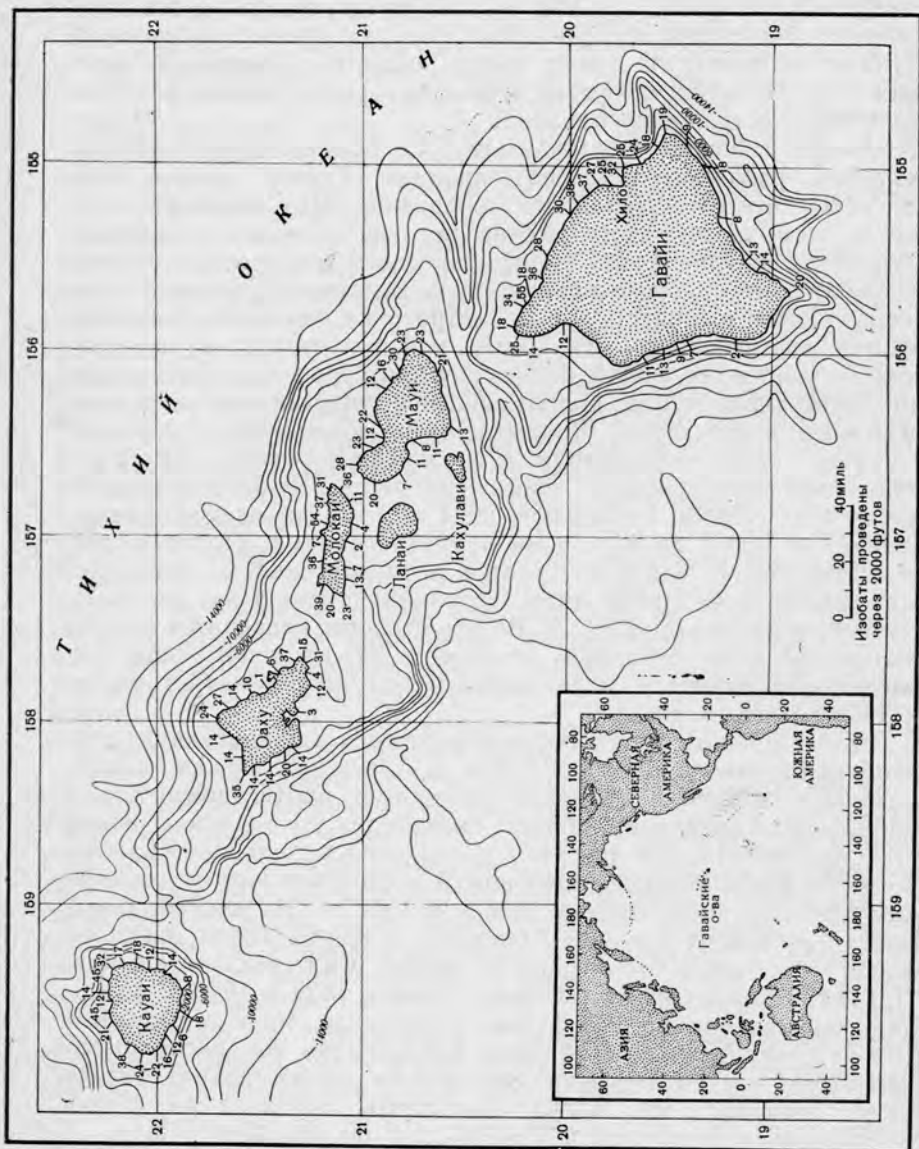
¹ Песок, если он коралловый, не оставляет царапин на стекле.

Слово «цунами» — по-японски «большие волны в бухтах». Это удачный термин, так как он дает представление о том, что цунами производят особенно большие разрушения в заливах. Цунами, конечно, не имеют ничего общего с приливом, хотя накат этих волн на открытые, лишенные рифов берега подобен быстрому наступлению прилива.

Цунами возникают, по-видимому, в огромных глубоководных желобах, расположенных по окраинам Тихого океана (см. гл. VIII). Жителям западного побережья США «повезло», так как в этой части Тихого океана нет глубоководных желобов. Очевидно, поэтому вдоль калифорнийского побережья и не наблюдалось ни одного сколько-нибудь заметного цунами. Почти всем цунами предшествуют землетрясения, которые регистрируются сейсмическими станциями, как землетрясения со сбросом. По-видимому, волны возникают при сбросах, когда внезапно опускающиеся или поднимающиеся участки дна смещают огромные массы воды. Волны цунами объясняют также как результат огромных подводных оползней. Впрочем, достаточно надежного подтверждения этой гипотезы нет. Во всяком случае, почти все цунами, за исключением вызванных извержениями, возникали вслед за крупными землетрясениями. Понятно, что если дно океана вдруг опускается, то и поверхность воды должна опуститься. Массы воды, устремляющиеся в эту впадину, сталкиваются и вздымаются. Во все стороны расходятся волны, вызванные этим огромным всплеском. И, наоборот, если дно внезапно поднимется, вода также поднимется и начнет растекаться во все стороны.

Самые мощные волны распространяются в направлении, перпендикулярном линии сброса. Так, в Алеутском желобе, расположенном южнее одноименных островов, протягивающихся в широтном направлении, сбросы происходят по разломам вдоль его склонов. Именно при этом порождаются наиболее сильные волны цунами, распространяющиеся к северу и югу от желоба, как это было, например, в 1946 и в 1957 гг. На южной, обращенной к океану стороне Алеутских островов почти никто не живет, так что в этом районе ущерб был незначительным. Правда, у мыса Скок на острове Унимак вода в 1946 г. поднялась больше чем на 100 футов: разрушила маяк и затопила 100-футовую береговую террасу. На Гавайях же, расположенных более чем на 2 тысячи миль южнее, максимальная высота волн, насколько мы могли определить, достигла 57 футов. К счастью, не везде она поднялась так высоко (фиг. 15).

Цунами движется в открытом океане с огромной скоростью, в среднем 450 миль в час. Скорость меняется в соответствии с глубиной, так как цунами, в отличие от ветровых волн, имеют



Ф и г. 15. Высота волны цунами на Гавайских берегах 1 апреля 1946 г. Высота в футах.

очень длинный период, обычно порядка 15 минут. Расстояние между гребнями волн достигает при этом 100 миль. Посмотрите еще раз на фиг. 3, и вы поймете, почему глубина влияет на скорость волн цунами. Однако высота их в открытом океане настолько мала, что они не могут оказывать какое-либо размывающее воздействие на дно. Разрушительны же они только у берега.

После Алеутского землетрясения 1946 г. волнам потребовалось около 4 часов, чтобы достичь побережья Гавайских островов. На мелководье скорость волн значительно уменьшилась, так что они подошли к берегу уже со скоростью всего лишь 15 миль в час. Но по мере того как волны деформировались на мелководье, они росли в высоту. Особенно большие волны наблюдались на открытых северных побережьях Гавайских островов, в то время как на южной стороне островов отмечалась волна лишь небольшой высоты.

Важно исследовать последствия цунами, чтобы избежать бедствий такого рода в будущем¹. Теперь-то мы знаем, что такое возрастание волн! Наибольшей высоты достигла седьмая или восьмая волна. На западном берегу острова Гавайи некоторые волны вернулись на следующую ночь, с восьмичасовым запозданием. Они были выше утренних. Этот удивительный факт подтверждали многие очевидцы, но причина осталась совершенно непонятной. Можно только предположить, что эти волны были отражены сначала каким-то подводным склоном близ Японии, а затем уступом в Океании. Таким образом, здесь волны цунами проделали путь бильярдного шара от удара триплетом. Во всяком случае, такую возможность следует учитывать и не забывать об опасности запоздалых вторжений отраженных волн.

Наверное, самое глупое, что может сделать человек во время цунами,— это расхаживать по обнаженным рифам, подбирая рыбу. В 1946 г. на Гавайях многие погибли именно из-за этого. Впрочем, эти люди никогда даже не слышали о цунами (последнее сколько-нибудь значительное цунами наблюдалось здесь в 1877 г.) и не могли поступить иначе. Теперь ясно, что вблизи городов полезно строить волноломы, как это было сделано в Хило; они уменьшают силу волны, даже если она перекачивается через них. Несомненно, что трение о волнолом значительно уменьшает силу цунами. В районах, подверженных цунами, строить здания следует только в недосыгаемых волной местах.

В тропических районах кораллы, образующие вдоль многих побережий огромные защитные рифы, оказываются полезными

¹ Подробности см. F. P. Shepard, G. A. MacDonald, D. C. Cox, The Tsunami of April 1, 1946, Bull. Scripps Inst. Oceanogr., 5, No. 6 (1950), 391—470.

человеку в борьбе даже с самыми сильными цунами. На Гавайских островах, например, особенно широкий риф находится в заливе Канеохе, у северной стороны острова Оаху, откуда подходили волны цунами. И, конечно, этот широкий риф совершенно остановил продвижение волн! Люди, жившие под его защитой, даже не знали, что прошло цунами! Тщательные исследования побережья показали, что высота волн цунами была там не больше 1—2 футов. Там, где рифы не столь широки, волны были выше. Так, например, в заливе Кавела, где мы жили, риф был сравнительно небольшой, и вода там поднялась на 10—19 футов. Однако почти всюду, где берега защищены рифами, высота волн цунами была меньше.

Важную роль играют подводные долины или каньоны. Подобно тому как обычные ветровые волны уменьшаются в верховьях подводных долин (см. фиг. 4), волны цунами значительно уменьшаются там из-за рассеяния энергии. Ведь и эти волны движутся над долиной с большей скоростью, чем над подводной грядой. Наоборот, волны над подводными грядами особенно велики. Например, на северном подводном склоне острова Кауаи расположены три гряды, и именно над ними волны достигли максимальной высоты (см. фиг. 15). Поэтому если вы поселились на Гавайях и хотите жить около берега, то стройте дом под прикрытием кораллового рифа или поищите на карте подводную долину, чтобы расположить дом у ее верховья.

Известны случаи возникновения цунами в местах, где глубоководные желоба отсутствуют. Такими были волны, обрушившиеся в 1755 г. на Лиссабон. Эти волны устремились по реке Тежу (Тахо) и унесли множество человеческих жизней. Образовались эти волны в результате сильного землетрясения, эпицентр которого находился далеко от берегов, на дне Атлантического океана.

Во все времена самые разрушительные волны связывались с вулканической деятельностью. В 1883 г. произошел взрыв вулкана Кракатау, уничтоживший его вершину. При этом возникли подводные толчки, вызвавшие совсем необычные волны. Они устремились на соседние острова Яву и Суматру и унесли десятки тысяч человеческих жизней. Говорят, что высота их значительно превышала сотню футов. Любопытные записи этих волн были сделаны мареографами на всем земном шаре, даже в Ла-Манше. Если эти записи в действительности отмечают цунами, прошедшее от извержения Кракатау, то волны, прежде чем попасть в столь отдаленные места, должны были отразиться от многочисленных подводных уступов. Эти волны были отмечены также и на Гавайских островах, хотя здесь время прибытия волн не соответствовало расчетному времени, которое потребовалось бы на прохождение волн от Кракатау до Гавайских островов. Объяснение этому еще не найдено.

Страшно даже подумать, что произошло бы, если бы вдруг цунами обрушилось на такой берег, как побережье Лонг-Айленда, где в теплый летний день на пляже отдыхают сотни тысяч людей. Катастрофические цунами нам здесь не известны. За исключением случая землетрясения 1929 г. на Большой Ньюфаундлендской банке, в результате которого была разорвана большая часть подводных кабелей, проложенных между восточным побережьем США и Европой, волны цунами вообще не отмечались в этом районе. Волны цунами, сопровождавшие землетрясение на Большой Ньюфаундлендской банке, поднявшие там на 15 футов. Такие высокие волны, конечно, совершенно опустошили бы большую часть открытого восточного побережья США. Будем надеяться, что новых таких внезапных подводных сбросов больше не будет. Размеры подобного бедствия, наверное, были бы не меньше, чем от взрыва водородной бомбы.

ПРИБОЙ ВЫСОТОЙ 1700 ФУТОВ

Вспомните, что бывает, когда дети балуются в ванне. Вода так и плещет на пол! Так бывает и в природе. Длиннопериодные всплески воды — сейши — особенно распространены во фьордах и в озерах с крутыми склонами. Они образуются там при больших обвалах со склонов окружающих гор, в результате чего вода устремляется в стороны и подъем уровня наблюдается даже в удаленном конце фьорда или озера. На озере Лоен в Норвегии туристам показывают остатки лодки, поднятой такой волной на сотню футов над уровнем озера.

В июле 1958 г. одна из самых больших волн этого типа наблюдалась в заливе Лития на южном побережье Аляски. Этот район необитаем, но у выхода из залива находились три рыбацьи лодки. Произошло землетрясение. Оно вызвало сбросы в вершине залива, в 6 милях от лодок. Рыбаки заметили, как вдруг началось волнение, а еще через несколько минут увидели огромную мчавшуюся на них волну. Одна лодка была переброшена волной даже через косу, лежащую у входа в залив. Рыбаки рассказывают, что они были подняты так высоко, что видели под собой 80-футовые ели, растущие на косе. Потом лодка нырнула кормой и затонула. Рыбакам все же удалось спастись.

Другая лодка стояла на якоре, и волна обрушилась на нее. Якорный канат хотя и оборвался, но все же удержал лодку: она не была выброшена на косу и уцелела. Третья лодка сразу же исчезла.

После этого землетрясения были исследованы склоны залива геологом Д. Дж. Миллером (Геологическая служба США) и сейсмологом Доном Точером (Калифорнийский университет). Они обнаружили, что высота волны, промчавшейся вдоль залива, была более 100 футов. Она переломала почти все деревья и ободрала с них кору. В узком заливчике с огромными скалистыми обрывами, который перегораживал горный отрог, прибойная волна взметнулась на высоту 1700 футов, начисто смыв весь лес. Осталось невредимым лишь одно-единственное дерево. Все деревья были вынесены волной в соседний уцелевший лес. Следовательно, волна, а не оползень вызвала эти разрушения.

Плывя на лодке вдоль залива через несколько часов после землетрясения, Миллер видел огромные потоки воды, все еще стекавшие по склонам. Вдали он заметил деревья, поваленные и прижатые к склону. Это также свидетельствовало о необычайно высокой волне.

ШТОРМОВЫЕ ПРИЛИВЫ (НАГОННЫЕ ВОЛНЫ)

Термин *приливная волна* иногда применялся также для описания того нагонного повышения уровня моря, которое сопровождается ураганы. По-видимому, более удачным будет термин *нагонная волна*. В 1900 г. у Галвестона (штат Техас) уровень океана поднялся на 15 футов, вода перехлестнула через береговые защитные дамбы и пронеслась по улицам городка; утонуло 6000 человек. Новый волнолом построен так, чтобы предотвратить повторение такого бедствия, но некоторые города до сих пор ничем не защищены и в любой момент могут оказаться разрушенными такими волнами. В 1938 г., вопреки прогнозам метеорологов, огромный ураган налетел на восточное побережье США и прошел над Лонг-Айлендом. Уровень моря здесь поднялся примерно на 15 футов, и море поглотило 600 человек, нанеся огромный ущерб прибрежным строениям. В результате урагана образовались многочисленные новые заливы, и весь внешний вид берега настолько изменился, что после того, как волны отступили, он стал совершенно неузнаваем. Подобные наводнения были вызваны и другими ураганами, например ураганом 1954 г., пронесшимся над восточным побережьем США, и ураганом 1957 г., прошедшим над Луизианой. Самая тяжелая катастрофа такого рода произошла в вершине Бенгальского залива в 1737 г., когда во время урагана утонули 300 тысяч человек.

Поднятия уровня, сопровождающие эти огромные нагонные штормовые волны, во многом сходны с цунами. Приходят они, однако, не в ритмичной последовательности, а беспорядочно.

Первоначальный подъем воды может быть очень быстрым, но потом высокий уровень сохраняется довольно долго и повторного поднятия почти никогда не бывает. Разрушения, вызванные этими нагонными поднятиями уровня моря, только отчасти связаны с самим наводнением. Еще больше разрушений вызывают при этом ветровые волны. Естественные барьеры для таких волн, существующие вдоль берега, а также многие искусственные волноломы и дамбы уже не защищают сушу при наводнении, и ветровые волны с неистовством обрушиваются на нее.

Глава III

БЛУЖДАЮЩИЕ БЕРЕГА

На побережье южной Калифорнии, к северу от муниципального пирса в Редондо, такое название главы никого не удивит: широкий пляж, которым жители восхищаются, глядя из окон своих домов, вдруг исчезает. Библейское изречение: «Не стройте дома своего на песке» — здесь оценили многие владельцы пляжей. Такие пляжи весьма привлекательны летом, когда океан спокоен. Создается даже впечатление, что пляж растет на глазах, и агенты по продаже земельных участков непременно постараются убедить покупателя, что стоимость участка скоро возрастет вдвое. Однако стоит наступить зимним штормам — и пляж вдруг начинает уменьшаться. Его как не бывало! Опасны также молы, которые сооружаются городскими властями на побережье неподалеку от пляжей. Владельцу пляжа, конечно, удобно иметь поблизости хороший причал для катеров. Но после сооружения мола пляж может исчезнуть.

ФОРМЫ РЕЛЬЕФА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ

Причины подвижности берегов сейчас известны. Однако прежде чем перейти к разговору об этом, будет полезно коротко ознакомиться с геологической, инженерной и юридической терминологией, применяемой при описании берегов (фиг. 16, А). Пляж — это полоса берега, простирающаяся в сторону суши вплоть до самых крайних точек возможного переноса волнами песчаного материала. Со стороны суши пляж может быть ограничен либо береговым обрывом, либо дюнами, либо искусственными сооружениями: дамбами и др. Внутреннюю часть пляжа с горизонтальной или пологой наклоненной в сторону суши поверхностью обычно называют пляжевой ступенью, или тыловой зоной берега. Часть пляжа, наклоненная в сторону моря, называется фронтальной частью пляжа. Со стороны моря ее

ограничивает уровень низкой воды при отливе. Далее следует морская зона пляжа. Тыловая зона, располагающаяся выше уровня полной воды, может иметь несколько пляжевых ступеней. Фронтальная зона — не непрерывный склон, а покатость со ступенью, соответствующей уровню малой воды. Морская зона пляжа часто расчленена барами (грядами), ложбинами, описанными в гл. 1.

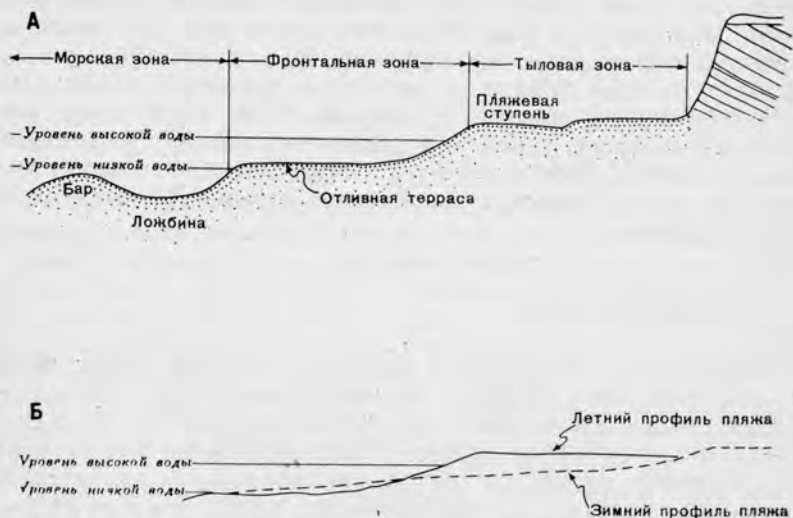
В этой книге мы будем пользоваться и некоторыми другими терминами. Так, бары — это песчаные полосы, протягивающиеся вдоль берега в виде береговых баров, если они узкие, или островных баров, если они широкие. Водное пространство, отделенное от моря барами и вытянутое примерно параллельно коренному берегу, называют лагуной. Если один конец бара приращен к берегу, такой бар называется косой. Две песчаные косы, сливаясь, иногда образуют выступающий в море мыс, подобный мысу Гаттерас; такой берег называют аккумулятивным выступом.

БЕРЕГОВЫЕ ЦИКЛЫ

Повсюду, где наблюдаются штормовые сезоны, пляжи проходят годичный цикл развития. В период, когда волнение слабое (летом), волны способны лишь перемещать песок в верхнюю часть фронтальной зоны пляжа. Откатывающаяся в море волна уже не может при этом унести сколько-нибудь значительное количество материала, перенесенного перед этим в сторону суши. В результате песок накапливается на пляже и пляжевая ступень выдвигается в море (фиг. 16, Б). Так, пляжевая ступень огромного пляжа к северу от Ла-Хольи, Калифорния, вырастает за лето на несколько сотен футов (фиг. 17). При устойчивом нарастании в течение многих лет пляжевая ступень расширяется, ее внутренняя часть покрывается многочисленными мелкими дюнами, зарастающими потом травой. Таким образом, эта часть берега становится сушей и теряет связь с океаном.

А теперь посмотрим, что происходит в период штормов (обычно зимних). Волны в этот период значительно выше средней высоты волн в остальное время года. Огромные волны набрасываются теперь на пляж и взмучивают массы песка. Мощный поток воды, откатывающийся в море, уносит с собой песок. Поскольку в период штормов вдольбереговые течения также усиливаются, смытый с пляжа песок переносится ими вдоль берега, пока разрывное течение не вынесет его в море. Вынос в море в разрывном течении гораздо сильнее, чем обратный приток воды к берегу, рассеивающийся на большом пространстве, поэтому песок движется в море. В результате пляжевая ступень быстро отступает.

В морской зоне пляжа при сильном прибое обычно образуется ложбина, глубина которой достигает 10—20 футов. Вследствие ее углубления начинает смещаться и песчаный бар, построенный ранее во фронтальной зоне пляжа. Чем больше волны, тем дальше отодвигается в море бар, тем больше возрастают глубины над его гребнем. И наоборот, когда волны уменьшаются, бары начинают двигаться в сторону берега и гребни их мелеют. Такие песчаные бары и ложбины между



Фиг. 16. А — названия основных частей береговой зоны. Б — типичные различия в форме профиля берегового пляжа летом (с широкой бермой) и зимой (со срезанной бермой).

ними имеют важное значение при десантных операциях. Именно поэтому в военные годы напряженно изучались песчаные береговые бары вблизи Скриппсовского института в связи с разработкой планов десантных операций на берегах Японии. Ведь было известно, что там существуют именно такие бары! Десантные суда могут пересечь глубокие бары во время затишья в штормовой сезон, но застрянут на обмелевших барах при такой же силе волнения летом. С другой стороны, в зимнее время глубокие ложбины между барами могут быть опасными для высадки людей с тяжелым снаряжением. Летом бары могут значительно уменьшаться в размерах или надвинуться на берег вплоть до отливной террасы, так что опасные желоба вообще исчезнут.

Таким образом, в своем развитии пляжи проходят множество циклов. Короткий цикл протекает в связи с каждым небольшим штормом, более длительный связан со штормами зим-



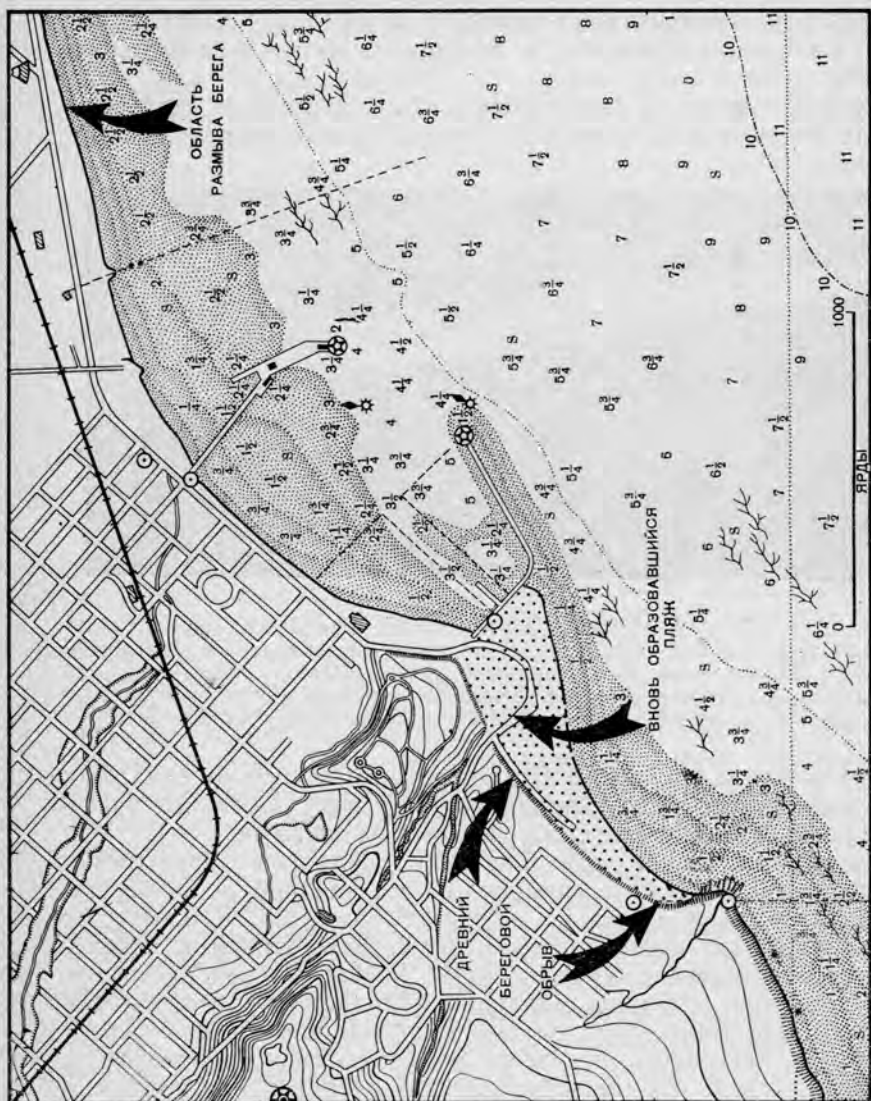
Фиг. 17. Две фотографии, позволяющие сравнить состояние одного и того же пляжа летом, когда вырастает высокая и широкая берма, и зимой, когда волны срезают пляж и оставляют только крупный гравий, образующий пляжевые фестоны.

него сезона. Самые спокойные условия бывают летом: природа как будто специально старается сделать людям приятное. В самом деле, пляжи увеличиваются летом, когда они нужны для купанья, и, наоборот, резко уменьшаются зимой, когда необходимость в них исчезает.

Изменения, претерпеваемые пляжами, в сильной степени зависят от направления подхода волн. В Ла-Холье есть небольшой пляжик — «Бумер-Бич», то есть «Ревущий». Это название дано ему из-за сильного прибоя, грохочущего на подводных скалах вблизи самого берега. Из-за скал это место опасно для купанья, но зато оно необыкновенно удобно для изучения прибойных волн. Летом вдоль берега можно увидеть высокие насыпи песка. Однако стоит только подуть северо-западному ветру и развести волнение, как песок исчезнет до последней крупинки, обнажив нагромождения валунов. Но посмотрите, что происходит при этом в южной части нашего пляжа: песок там, наоборот, накапливается. Именно зимой песок будет засыпать камни и скалы, обнажившиеся летом. Такой перенос пляжевого песка вдоль берега — результат смены направлений подхода волн. Северо-западные штормы зимой перемещают песок на юг и покрывают им южный конец пляжа. Летом же волны зыби, приходящей издалека, из области свирепых штормов, разыгрывающихся в южном полушарии, где в это время зима, подходят к пляжу с юга. И песок перемещается на север. Все это надо учитывать перед оборудованием пляжа для купания. Бумер-Бич в Ла-Холье — лишь один из пляжей, состояние которых зависит от переноса песка, связанного с изменением направления подхода волн. Кроме него, на свете бесчисленное множество таких пляжей!

МОЛЫ И ДРУГИЕ ИСКУССТВЕННЫЕ БЕРЕГОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ

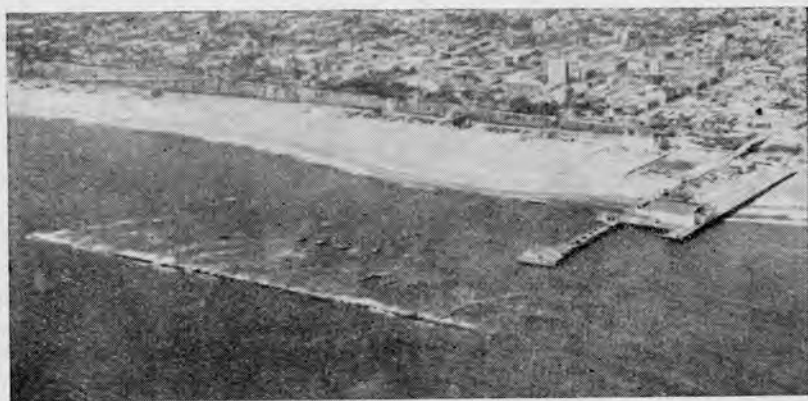
Деятельность человека уже оказала сильное влияние на развитие берегов. Примером простейших сооружений, возводимых на берегах, являются молы. Они выдвигаются в море поодиночке или парой, чтобы создать закрытую гавань. Если преобладающее направление подхода волн всех размеров или хотя бы только наиболее сильных будет с севера, песок на берегу начнет перемещаться к югу и накапливаться на северной стороне молов. Именно так и происходит на большом протяжении побережья Калифорнии, где в связи с этим возникает множество проблем. Широкий пляж будет нарастать к северу от каждого мола. Само по себе это не так уж плохо, если не считать того, что купальщикам придется дальше ходить к воде. Совершенно противоположная обстановка создается в связи с



Фиг. 18. Изменения очертаний береговой линии близ Санкта-Барбара, вызванные постройкой портовых пирсов. С тех пор как была составлена эта карта, песчаный пляж с западной стороны порта вырос еще больше и обогнул западную пирс. Песок стал заполнять внутреннюю акваторию порта, так что необходимо вести землечастительные работы для предохранения порта от заноса. Глубины в саженях от среднего уровня воды при отливе.

перемещением и уносом песка к югу от мола. Нормальное поступление песка на пляжи в летний период слабого волнения оказывается там нарушенным, потому что весь этот песок задерживается, как ловушкой, молом. В результате к югу от мола в период зимних штормов пляж будет размываться, как в обычных условиях, а восстанавливаться летом уже не будет.

Песок, смытый с пляжа зимой, будет уноситься вдольбереговым потоком и не будет участвовать в восстановлении пляжа



Фиг. 19. Результаты постройки параллельного берегу волнолома в Санта-Моника (Калифорния). Обратите внимание на широкий пляж, разрастающийся в сторону моря и заполняющий гавань. Пляж с южной стороны порта (справа) значительно уже. Белые полосы пены, протягивающиеся от волнолома к берегу, созданы прибором, разбивающимся на волноломе.

на прежнем месте летом. Возможно, что не только сам пляж при этом исчезнет, но и прилегающие к нему земельные участки с домами и дорогами тоже окажутся размывтыми.

История южной Калифорнии полна примерами разрушения берегов. Два мола были построены в Санта-Барбаре на берегу, ориентированном с востока на запад (фиг. 18). К западу от них немедленно вырос широкий пляж. Зато пляжи к востоку от молов постепенно были размывты. Чтобы исправить положение, пришлось затратить миллионы долларов. В Санта-Моника (вблизи Лос-Анжелеса) мол был выстроен параллельно берегу (фиг. 19). Надеялись, что песок не задержится этим молом, а пройдет, как в нормальных условиях, через район гавани и поступит на пляжи вдоль всего берега. Однако параллельный берегу волнолом отрезал волнам подходы к берегу, а без волн исчезла и возможность вдольберегового перемещения песка. Поскольку песок стал задерживаться в волновой тени мола, там

начинает расти совсем ненужный широкий пляж, заполнивший большую часть гавани, и размываться пляж с другой стороны мола.

Портовый мол, построенный в Редондо, вдоль южной части залива Санта-Моника, вызвал особенно сильные разрушения. Он был построен как раз в том месте, где волны усиливались благодаря конвергенции на краю подводного каньона (см. фиг. 4). Как только постройка мола была закончена, начался сильный размыв берега. А ведь мол, казалось бы, должен был защищать его! Разрушение пляжа было вызвано увеличением протяженности зоны конвергенции волн, которые стали размывать песок. И прежде чем вдольбереговое перемещение песка с севера смогло компенсировать размыв, пляж был полностью размыт. Правда, песок снова стал накапливаться перед молотом, но берег уже успел настолько разрушиться, что было уничтожено несколько кварталов города со всеми строениями.

Еще южнее, в Ошенсайде, отступление берега началось вскоре после второй мировой войны. Дело в том, что во время войны морской корпус должен был построить несколько молот к северу от Ошенсайда. Эти молы приостановили нормальное перемещение песка вдоль берега с севера на юг. Пляжи с подветренной стороны молот стали постепенно таять, не получая необходимого питания песком. Молы у Кэмп-Пендлтона вообще не оправдали своего назначения, поскольку защищенная ими гавань просуществовала совсем недолго. После того как песок заполнил карман у северного мола, он стал заполнять и саму гавань. В конце концов она настолько обмелела, что суда не смогли больше пользоваться ею. К сожалению, размер этой гавани был не настолько велик, чтобы она промывалась приливотливными течениями, защищающими от заноса другие гавани. Подобные явления происходили у входа в гавань в заливе Мишен-Бей, к северу от Сан-Диего (фиг. 20). Здесь также вырос широкий пляж на северной стороне молот, а к югу от них пляж был размыт, несмотря на то, что на него подавалось огромное количество песка (землесосным снарядом, прочищавшим проход в гавань)¹. Песок, накапливавшийся у оконечности северного мола, в конце концов стал поступать в гавань и заполнять фарватер, который настолько обмелел, что стал опасным даже для малых судов. Потонуло одиннадцать лодок, перевернувшихся в прибое, который образовался на этой отмели во время сильного волнения. Сейчас проход в гавань уже прочищен и углублен до 12 футов, и по нему снова идут суда. Однако для поддержания фарватера в судоходном состоянии

¹ Проход прочищался армейским инженерным корпусом с целью обеспечить свободный сток воды реки Сан-Диего.

пляжах вот уже пятьдесят лет устраиваются автомобильные гонки. С южной стороны молов пляжи Флориды сложены в основном мелкой ракушкой и содержат очень много одноклеточных фораминифер¹ и остатков различных морских животных. Источником поступления этого ракушечного песка являются живые организмы, в изобилии населяющие теплые прибрежные воды. После их гибели волны выносят на берег множество раковин, а пляжи получают достаточно песка, несмотря на то, что молы преградили путь на юг кварцевому песку, питавшему ранее пляжи.

Во многих уголках света пляжи защищены специально возводимыми короткими молами — бунами. Хороший пример такой защиты берега можно видеть вдоль побережья Нью-Джерси (фиг. 22). Эти буны вызывают небольшое накопление пляжа с наветренной стороны от них и незначительное сужение с подветренной. Вдольбереговой поток наносов у защищенного бунами пляжа замедляет свое движение, и в конечном счете пляж расширяется. Если буны расставлены вдоль всего берега, то эффект может быть значительным. А какова же судьба пляжей, находящихся за таким защищенным участком с подветренной стороны побережья? Эти пляжи, безусловно, потеряют некоторое количество песка, но короткие буны пропустят к ним все же песка столько, чтобы пляжи не были размывы полностью.

ПИТАНИЕ ПЛЯЖЕЙ ПЕСКОМ

Во многих местах из года в год на ракушечных пляжах ведут разработку песка, сгребая его бульдозерами. Однако от этого пляжи не уменьшаются: живущие в прибрежных водах организмы непрерывно поставляют ракушки, выбрасываемые волнами на берег. Волны при этом все время стремятся к выработке профиля равновесия пляжа, тогда как человек нарушает его, вывозя песок. Таким образом, каждый раз, когда бульдозеры сгребают часть пляжа и углубляют профиль, волны приносят новый материал и восстанавливают естественный склон. Могут спросить, конечно, куда бы девался песок, если бы его не брали с пляжа? Излишек песка, принесенного волнами после того, как будет выработан профиль равновесия, может переноситься вдоль берега, и тогда находящиеся с подветренной стороны пляжи получат дополнительное питание,

¹ Фораминиферы — крохотные одноклеточные организмы, относящиеся к простейшим, большей частью с известковой раковиной. Они обитают либо на дне (бентические фораминиферы), либо в толще воды (планктонные фораминиферы).



Фиг. 22. Буны (небольшие бетонные дамбы), построенные для защиты пляжа вдоль песчаного барьерного острова в Ошен-Сити, штат Нью-Джерси. Накопления песка с южной стороны буна указывают на вдольбереговую поток наносов к северу. Внутри залива видны мелководные песчаные бары, созданные приливными течениями. У входа в залив их нет, так как отложения осадков там не происходит. Вдоль берега со стороны моря заметен внешний бар.

если только человек не заберет эти излишки. Так что, прежде чем брать с пляжа песок, надо еще подумать!

Есть и такие места, где поставляемые морскими организмами ракушки никогда на пляжи не попадают. Вдоль берега иногда образуется сплошной барьер коралловых рифов, препятствующий волнам выносить на пляжи необходимые для их питания ракушки и обломки кораллов. Очень может быть, что если с умом прорыть в этих рифах проходы, то песчаный материал начнет поступать на пляжи. Без этого обломки раковин будут продолжать сноситься на глубину и откладываться там или постепенно размельчаться волнами и различными организмами, пока не станут достаточно мелкими, чтобы быть выброшенными на пляжи.

Человек разрушает иногда пляжи косвенным путем и совершенно неожиданно для себя. Самым активным поставщиком песка на пляжи являются реки: они переносят песок вдоль всего русла вплоть до впадения в океан. Если каким-либо образом отрезать этот источник питания, пляжи начнут разрушаться. Плотины, построенные для регулирования стока или водоснабжения на многих реках таких засушливых районов, как южная Калифорния, уничтожили источники поступления песка на пляжи. Прежде этот песок периодически выносился реками в море после сильных дождей. Теперь он оседает в водохранилищах перед плотинами и на побережье уже не выносятся. Это важное обстоятельство следует учитывать, особенно в тех курортных районах, экономика которых зависит от пляжей.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛЯЖЕЙ

Возможно, вы замечали, что фронтальный склон некоторых пляжей круче, чем у других. Например, вдоль восточного побережья Флориды склоны пляжей то крутые, как в Майами или Форт-Лодердейл, то отлогие, как в Дайтона-Бич или в Форт-Пирс. Обычно, когда вы идете вдоль пляжа с крутым склоном, ваши ноги вязнут в грубом песке. Зато на пляжах с отлогим склоном мелкий песок почти всегда лежит, как утрамбованный. Такие пляжи могут быть прекрасной автострадой, как в Дайтона-Бич. Многие пляжи Техаса, протянувшиеся на большие расстояния, также достаточно плотны для движения автомашин. Правда, 130-мильный пляж острова Падре вдоль южного побережья Техаса доступен только джипам и грузовикам, поскольку на нем есть обширные ракушняковые участки, на которых легкой автомобиль застрянет.

Разницу между двумя этими типами пляжей понять легко. Зерна мелкого песка укладываются в плотный грунт, тогда как

грубый песок и битая ракушка ложатся рыхло и легко рассыпаются под ногами. Соответственно этому вода прибойных волн в случае грубого песка и ракуши быстро спадает: осадочный материал, который она несла вверх по склону, она оставляет до тех пор, пока склон не станет слишком крутым. После этого материал начнет осыпаться и склон перестанет расти. С другой стороны, на пляжах из мелкого песка, обладающих значительно меньшей пористостью, вода будет спадать не так быстро и начнет стекать по склону. При этом создается пологий профиль равновесия. По тем же причинам грубопесчаные пляжи имеют пляжевые ступени с наклоном к берегу, тогда как мелкопесчаные пляжи имеют ступени с почти горизонтальной поверхностью.

Размер зерен песка не зависит от волновой экспозиции пляжа. Обычно она обусловлена источником его поступления. Если горные потоки выносят на побережье крупный песок, образовавшийся в результате выветривания крупнозернистых горных пород, то и на пляже песок будет крупнозернистый. Он будет крупным также, если волны разрушают коралловые рифы и выбрасывают на берег получающийся при этом песок.

Но если реки выносят на побережье тонкий взвешенный материал, то и песок на пляже оказывается мелкозернистым. Например, в заливе Ханален, на острове Кауаи, самом северном из Гавайских островов, песок вдоль пляжа меняется от крупного до тонкого в зависимости от источника его поступления. Вблизи устья реки Ханален песок мелкий, а там, где он поступает с коралловых рифов,— крупный. Соответственно меняются крутизна склонов пляжа и его плотность.

Пляжевые фестоны

Купающиеся обычно не замечают характерных особенностей пляжа, например пляжевых фестонов (фиг. 23). Они представляют собой серию маленьких мысов или коротких песчаных и гравелистых кос, выступающих в море, и маленьких заливчиков между ними. Фестоны располагаются обычно с равномерными интервалами один от другого. Интервалы эти невелики, если волны небольшие, а направление их подхода часто меняется, но увеличиваются там, где действует высокий прибой. На берегах небольших озер интервалы между фестонами могут быть порядка 1 фута и даже меньше, а на морском берегу, куда приходят 10-12-футовые волны из открытого океана, расстояние между косами достигает уже нескольких сотен футов. Кроме того, расстояние между косами может меняться с течением времени. Во время штормов размеры фестонов могут уве-

личиваться, так что расстояния от косы до косы возрастают. Часто эти фестоны сохраняются в верхней части пляжа и после того как стихнет волнение, отмечая подъем уровня воды во время шторма. В последующий период затишья развиваются новые фестоны, располагающиеся на меньших интервалах и на более низком уровне. Расстояния между фестонами зависят также и от размеров зерен песка: в общем, чем грубее песок или гравий, слагающий их, тем чаще фестоны.



Фиг. 23. Пляжевые фестоны на берегу близ Сан-Симеона, Калифорния. Они образованы на пологом склоне пляжа, сложенного мелким песком. Слева видна горизонтальная поверхность пляжевой бермы.

Фестоны создаются движением воды, набегающей на поверхность пляжевой ступени и сбегаящей назад по узким ложбинкам. Вода размывает ложбинки, оставляя между ними гребни, заостряемые волнами в виде небольших мысов. Пляжевые фестоны образуются чаще в те периоды, когда приливно-отливные колебания уровня моря незначительны, во время так называемых квадратурных приливов, то есть в первую и третью четверти Луны. Высокие сизигийные приливы в полнолуние и в новолуние разрушают фестоны. Благодаря этому поездка на автомобиле вдоль пляжа бывает более приятной именно в период полнолуния или новолуния.

Ложбины и бары

Прибрежные ложбины и бары, развивающиеся близ нижнего уровня воды во время отлива, выражены наиболее ярко также в период квадратурных приливов. Высокие сизигийные приливы обуславливают смещение баров и препятствуют их развитию. В районах, где приливо-отливные колебания незначительны, береговые бары и ложбины обычно осушаются во



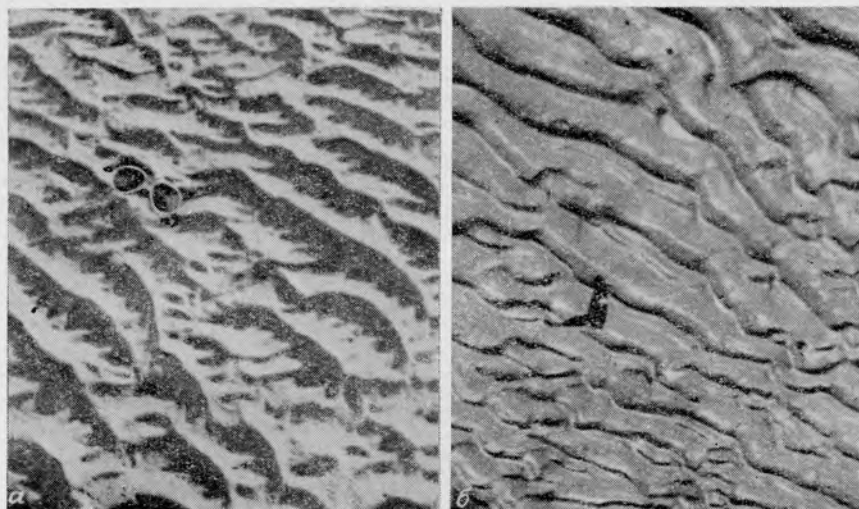
Фиг. 24. Бар и вдольбереговая ложбина, частично осушившиеся при отливе. Фотография сделана близ Сент-Питерсберга на западном побережье Флориды.

время отлива (фиг. 24). Так бывает, например, на берегах Мексиканского залива и в Средиземном море, где нормальная высота приливов не более 1—2 футов.

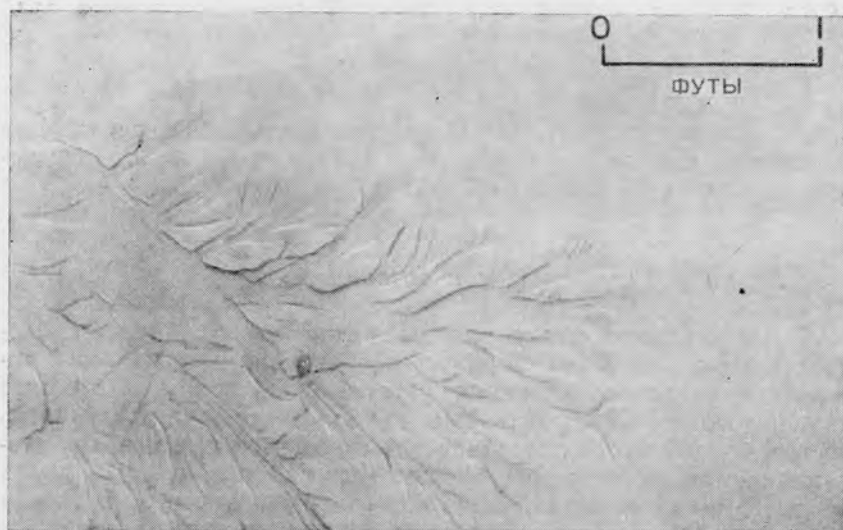
Знаки ряби, промоины и бугорки

Возле мелкопесчаных пляжей отлив часто обнажает бесчисленные знаки ряби. Образуется она главным образом в результате вихревого стекания отступающей волны. Подобные явления можно наблюдать и на грубопесчаных пляжах. Однако там вода быстрее просачивается сквозь песок, и поэтому стекающие потоки не такие бурные. Кроме того, и сами зерна крупного песка осаждаются из воды значительно скорее. Знаки ряби могут быть также связаны с действием течений в ложбинах, разделяющих бары, если эти ложбины частично обнажаются при отливе (фиг. 25).

Промоины — еще одна особенность, наблюдаемая при отливе (фиг. 26). Это маленькие желобки, образующиеся при стека-



Ф и г. 25. Созданные течениями знаки ряби, обнажившиеся при отливе в бухте Чолла в северной части Калифорнийского залива, штат Сонора, Мексика.



Ф и г. 26. Промоины, созданные стекающей с пляжа водой, обнажившиеся при отливе. Обратите внимание на сходство очертаний промоин с системой речных притоков.

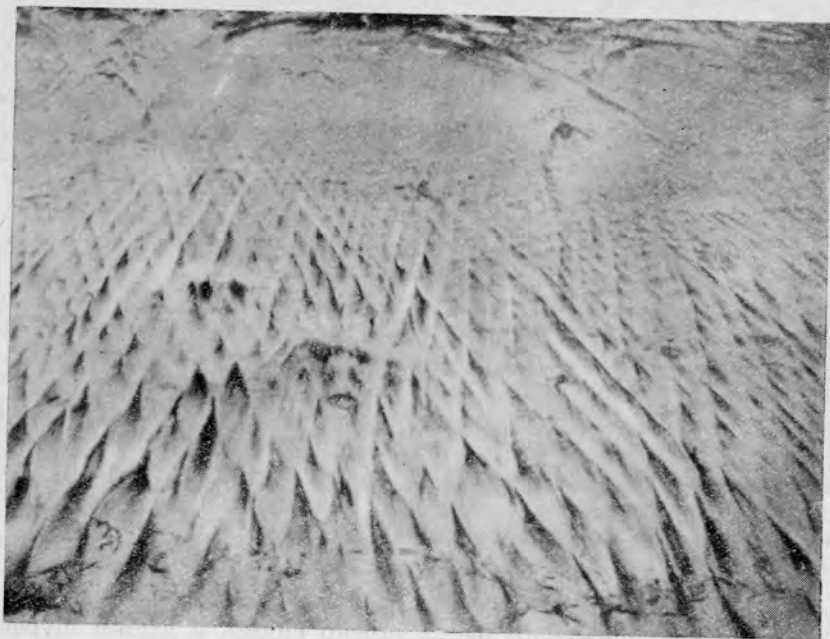
нии к морю воды, задержавшейся на пляже после прилива. При отливе она промывает на поверхности нижней части пляжа систему миниатюрных долин. Иногда вода стекает с пляжа после заплесков волн. При этом ее потоки встречают раковины, гальку, а иногда торчащие из песка усики-антенны небольших зарывшихся в грунт животных, песчаных крабов. Эти антенны — своеобразные приспособления для ловли мелких животных. Отражаемые антеннами потоки воды, стекающие с пляжа, образуют систему ряби, напоминающую огранку алмаза (фиг. 27). Подобным образом создают песчаную рябь раковины и гальки, выступающие из песка.

Волны, обрушиваясь на пляж, вносят в песок пузырьки воздуха. Этот воздух, увеличиваясь в объеме, вспучивает песок, создавая крохотные купола или бугорки, высотой около дюйма или немного больше, диаметром от нескольких дюймов до фута. Разрыв такой бугор, вы обнаружите, что внутри он полый и может обрушиться, как только из него выйдет воздух. Часто волны срезают вершины таких куполов и на пляже образуются темные и светлые кольца там, где обнажаются по срезу слои песка, поднятые при образовании купола.

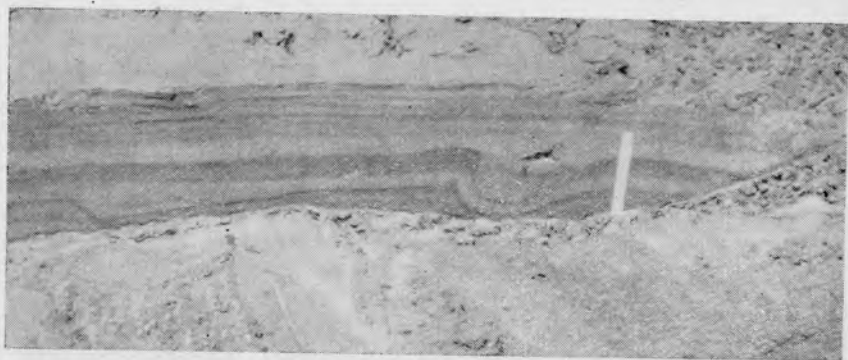
Слоистость пляжа

Слоистость пляжевого песка можно видеть в любом шурфе или яме (фиг. 28); она свидетельствует об изменении типа материала, откладываемого здесь при различных условиях. Так, при слабом волнении пляж может развиваться с накоплением на нем песка с большим содержанием слюды. Песок сверкает ярким золотистым блеском, рождая у непосвященного надежду найти здесь золото. Слюда эта очень легко уносится при сильном волнении и совершенно исчезает с пляжа после сильного прибоя. Она может быть также перекрыта другим осадочным материалом, например кварцевым песком. В период затишья на пляж волны приносят мелкие ракушки, которые образуют еще один слой осадков иного типа.

Случается, что накопившийся на пляже в течение нескольких недель или даже месяцев песок размывается штормовыми волнами. При этом первоначально рассеянные в песке тяжелые минералы, содержащие железо, как, например, магнетит, окажутся на поверхности. Эти минералы обычно темного цвета, и на пляже появляется слой черного песка. В шурфе, пройденном в толще песка до подстилающей его породы, черные слои иногда встречаются в самой подошве песчаной толщи. Особенно характерно это для верхней части пляжа, прилегающей к береговому обрыву. Эти черные слои связаны с концентрацией тяжелых минералов в штормовые периоды, когда пляж размывался почти полностью. Черные пески могут содержать цен-



Фиг. 27. Знаки ряби, созданные на пляже потоками воды, обтекающей раковины, гальку и, вероятно, усики-антенны маленьких песчаных крабов (эмерита).



Фиг. 28. Слоистость пляжевого песка, обнаруженная в шурфе на пляже близ Сан-Франциско. Нарушение правильной стратификации, видимо, связано с захоронением пузыря воздуха.

ные минералы — шеелит и вольфрамит. Слои под пляжевой ступенью почти горизонтальны, но под фронтальной зоной пляжа слои лежат наклонно, более или менее параллельно поверхности склона.

На побережьях в тропиках слои песчаников часто залегают почти с тем же углом наклона, что и на прилегающем пляже. Это «бич-рок» — «скалистый пляж» — результат просачивания сквозь толщу песка вод, цементирующих песчаные зерна в монолитную породу. Непосвященному скалистый пляж может показаться коралловым рифом, широко развитым вдоль побережий в тропиках. При внимательном рассмотрении оказывается, что в них отсутствуют как отдельные скелеты кораллов, так и та сложная структура, которая характеризует обычно коралловые рифы (см. гл. X).

Здесь мы лишь вкратце описали многочисленные особенности пляжей. Внимательное изучение их позволит увидеть много интересного. Материал пляжа все время подвержен изменению, сила и направление подхода волн сказываются на нем прежде всего.

ШЕЛЬФЫ — ПОДВОДНАЯ ОКРАИНА СУШИ

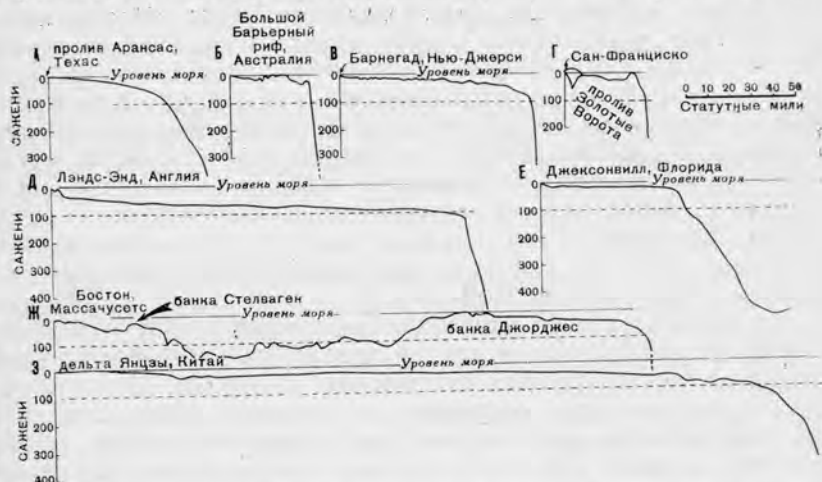
Отмели, окаймляющие материки, особенно интересны для геологов, так как это область накопления значительной части осадочных пород древних морских водоемов. Материковыми шельфами заинтересовались нефтяные компании, и не случайно. Ведь здесь скрыты богатейшие запасы нефти, столь важной для промышленности. Долгое время материковые шельфы имели особо важное значение и для моряков: здесь с помощью лота удавалось определить место судна в море. От шельфа зависит и судьба рыбака, так как именно на этих мелководьях добывается промысловая рыба.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕЛЬФА

В 1946 г. специальным декретом президента США минеральные богатства материковых шельфов, прилегающих к территории этой страны, были объявлены государственным достоянием. Другие государства, вероятно, последуют этому примеру. В связи с этим более точное определение понятия *шельф* представляется нам чрезвычайно важным. Если не сделать этого, то каждое государство будет определять границы своего суверенитета над областями дна морей и океанов по-разному. В самом деле, аннексируя шельфы, США определили их как мелководные области, простирающиеся от берега до глубины 100 морских саженей. Однако такое определение, по существу, совершенно произвольно и не учитывает того, что термин *шельф* (буквально — полка) прежде всего означает выровненную поверхность дна, резко обрывающуюся материковым склоном. Такие выровненные, почти плоские пространства дна существуют почти у любого материка, и при этом они далеко не всегда ограничены глубинами порядка 100 саженей.

В 1953 г. Международный комитет по номенклатуре форм рельефа дна океанов дал следующее определение шельфа: «Шельф — зона вокруг материков, простирающаяся от берего-

вой линии (при низком стоянии уровня воды во время отлива) до глубины, на которой отмечается резкое увеличение крутизны склона, спускающегося к области больших глубин». Этот внешний склон называется материковым. Такое определение шельфов достаточно точно. Однако в некоторых районах имеются два или даже несколько перегибов поверхности дна, так что юридически очень важно провести различие между ними, чтобы установить, какой же из них является подлинной границей материкового шельфа. На одной из последних конференций ЮНЕСКО, в которой автор принимал участие, было



Фиг. 29. Типичные профили материковой отмели. Вертикальный масштаб значительно преувеличен. Это сделано, чтобы показать различие между выровненным полого наклонным шельфом (профиль А) и сложно расчлененным шельфом вблизи районов древнего оледенения (профиль З).

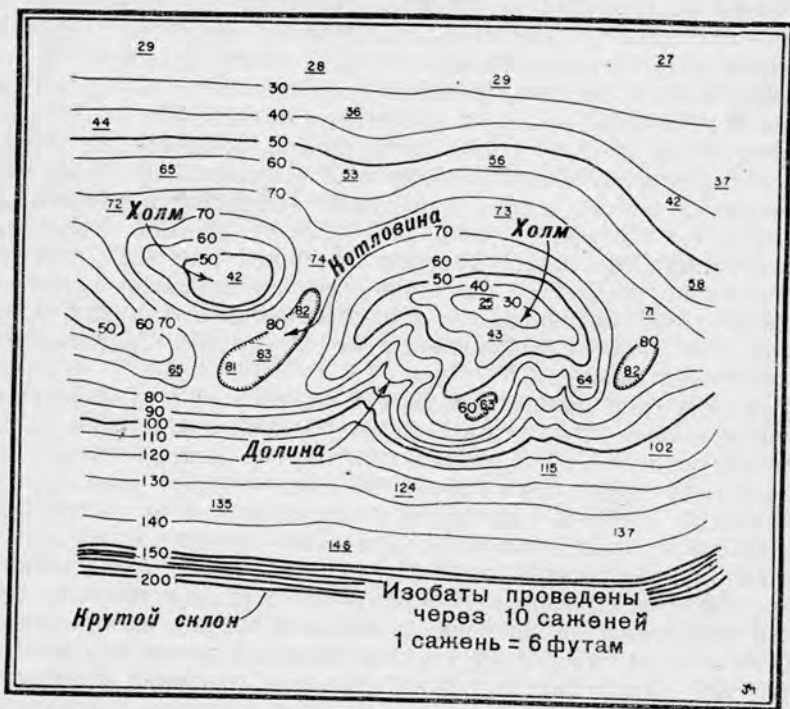
внесено предложение считать в подобном случае в качестве границы шельфа наиболее четкий перегиб. При этом он должен лежать на глубинах не более 600 м, или 300 морских саженей (в соответствии с единицами измерения, применяемыми данным государством).

Ранее предполагалось, что большинство материковых шельфов — плоские, лишь слегка наклонные равнины. Однако это не всегда так. Кое-где шельфы включают пространства холмистого рельефа, подобного известному вблизи берегов южной Новой Англии. Никто не назвал бы эти шельфы плоскими! И все же, несмотря на существование таких неровностей, материковый шельф имеет в общем вид шельфа, то есть ступени, или, буквально, полки. Это хорошо можно видеть на серии профилей (фиг. 29), показывающих примеры как плоских, так и неровных шельфов.

поверхности дна могут встретиться скопления валунов или глыб. Поскольку гидрографы не могут отличить перечисленные разновидности твердого дна от обнажений коренных пород, отметки грунта на картах обычно показывают там скалистое дно.

РЕЛЬЕФ ДНА

Хотя на морских навигационных картах до сих пор подводный рельеф характеризуется главным образом отдельными отметками глубин, в настоящее время уже появился интерес к



Фиг. 30. Так выглядит на карте подводный рельеф, изображенный изобатами. Подчеркнутые цифры обозначают отдельные измерения глубины.

батиметрическим картам, показывающим рельеф дна контурными линиями — изобатами. Если бы этот метод изображения рельефа дна не сталкивался с поразительным консерватизмом гидрографов и мореплавателей, то карты с изображением рельефа дна изобатами давно уже заменили бы прежние карты с

отдельными отметками глубин. Исключение составили бы, наверное, только районы мелководья.

Изобаты — линии равных глубин, связывающие точки с одной и той же глубиной относительно уровня моря. На картах суши их аналоги — изогипсы или горизонталы — линии равных высот. Если изобаты или изогипсы оконтуривают поднятия или замкнутые котловины, то их снабжают штрихами, указывающими падение склона¹.

На фиг. 30 замкнутыми изобатами показаны холмы, долины — кривыми линиями изобат, а контуры котловин — частыми штрихами. Об относительной крутизне склона можно судить по густоте изобат. Если склон отвесный — изобаты сливаются почти в одну линию. Чтобы оценить крутизну склона, необходимо знать величину сечения рельефа горизонталями. Эта величина выбирается составителем карты в соответствии с ее масштабом, детальностью имеющихся данных и характером изображаемого рельефа. Например, на топографической карте Большой каньон реки Колорадо изображен сравнительно редкими изолиниями — горизонталями, поскольку склоны каньона чрезвычайно круты. При более частом сечении горизонталы сливались бы.

ТИПЫ МАТЕРИКОВЫХ ШЕЛЬФОВ

Материковые шельфы изучены еще плохо. Однако сведения о рельефе шельфов, окружающих побережья США, уже достаточно подробно, чтобы можно было выделить среди них несколько различных типов. Одни из них выделяются по характеру рельефа, другие — по типу донных осадков. Впрочем, говоря о различных типах шельфов, следует, конечно, учитывать и то и другое. Кроме того, выделяемые нами типы шельфов очень тесно связаны с особенностями геологического строения или рельефа прилегающей суши. При описании различных типов шельфов мы попытаемся одновременно объяснять их происхождение, но основное внимание будет уделено этому вопросу в гл. V.

Шельфы, окаймляющие области оледенения

Этот тип шельфов наиболее интересен. Если бы все материковые шельфы были похожи на шельфы областей оледене-

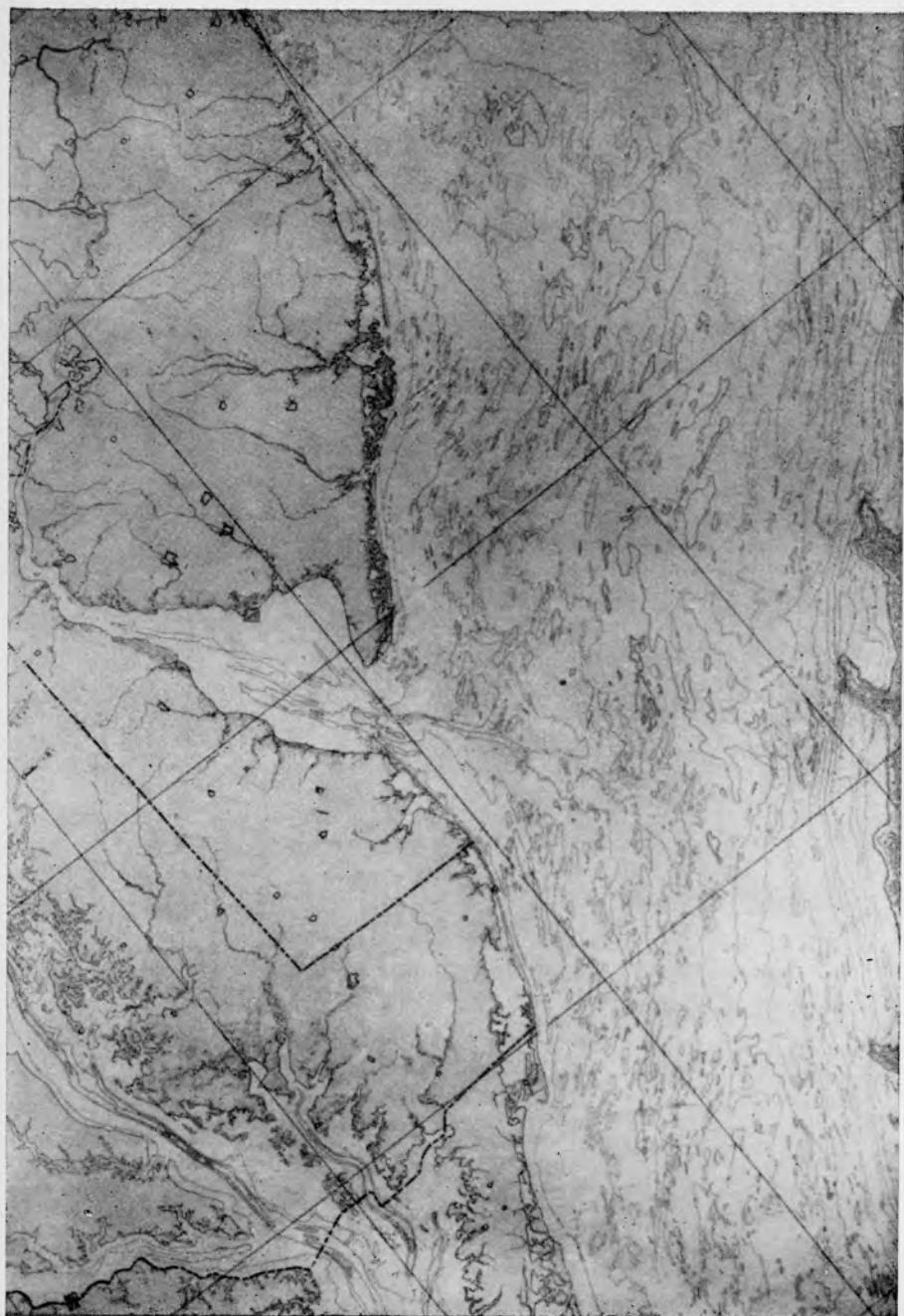
¹ В практике американской картографии приняты частые штрихи для обозначения контуров замкнутых котловин. В советской картографии применяются лишь одиночные, так называемые бергштрихи, указывающие направление падения склона. — *Прим. ред.*

ния, то, наверное, сам термин *шельф* вряд ли можно было бы использовать: настолько неровно здесь дно.

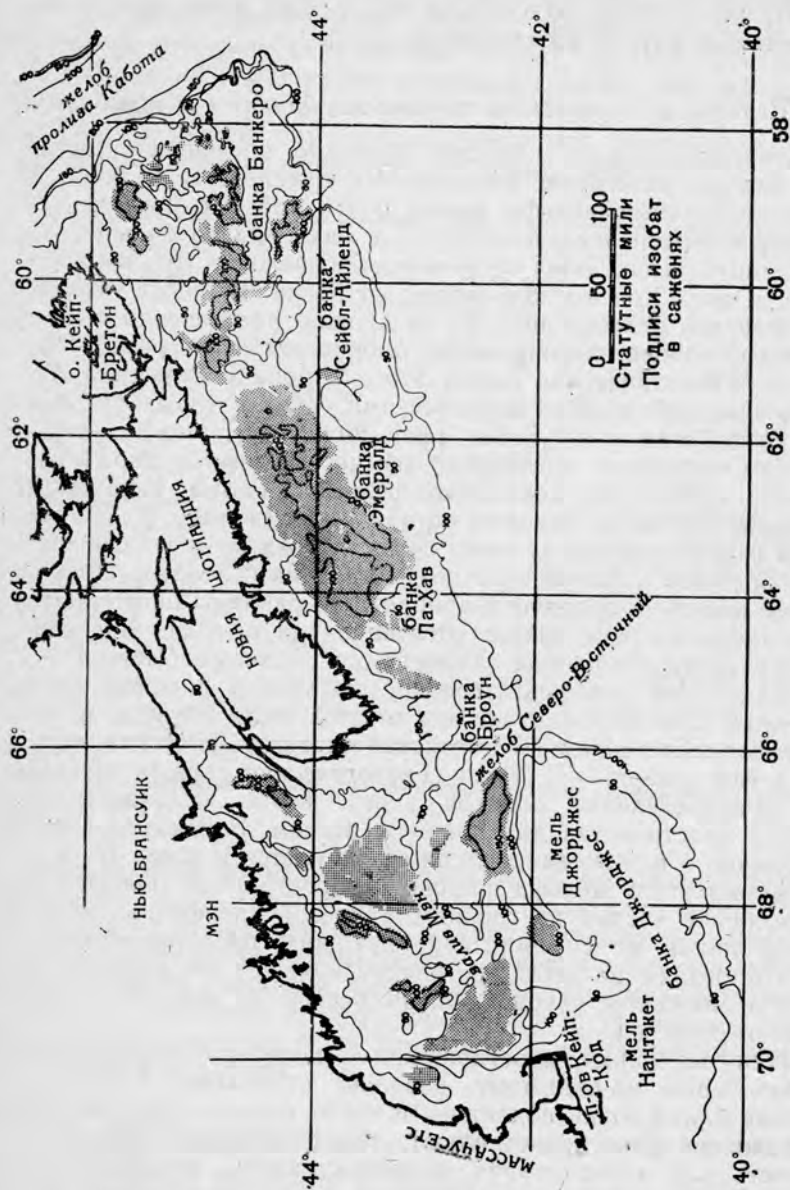
Побережья областей древнего оледенения большей частью изрезаны глубоко вдающимися в сушу заливами. Это либо фьорды, подобные фьордам Норвегии и Британской Колумбии, либо глубокие ледниковые трогги, такие, как залив Св. Лаврентия или пролив Хуан-де-Фука. За пределами заливов глубокие трогги продолжают в области шельфа, нередко полностью пересекая его. Во внешней части шельфа глубина трогов часто уменьшается. Поскольку глубины трогов более 100 саженей и расположены они обычно вблизи берега, трогги подтверждают правильность нашего определения шельфа. Как вы помните, в нашем определении шельфы не ограничиваются глубинами менее 100 саженей! В троговых желобах имеется множество замкнутых котловин, подобных котловинам прилегающей суши. На суше это озера, подводный рельеф которых на топографических картах чаще всего не показывается. Котловины шельфов покрыты обычно илистыми осадками, но со значительной примесью гравия и песка.

Шельфы областей оледенения изобилуют также холмами. На внутренней части шельфов большинство холмов скалистые или покрыты валунами и гравием. Над внешней частью шельфа поднимаются многочисленные банки, почти достигающие уровня моря. Они создают резкий контраст глубоким трогам и котловинам, столь характерным для внутренней части шельфа. Большинство банок покрыто песком, но на них обнаружен также и гравий различного размера. Некоторые из этих банок являются богатыми рыбопромысловыми районами мира. Например, банка Джорджес вблизи побережья Новой Англии (фиг. 32) обеспечивает рыбой города северо-восточного побережья США. Банки Банкеро близ Новой Шотландии и Большая Ньюфаундлендская снабжают рыбой не только Канаду и отдельные районы США, но также и Западную Европу. Поднимающиеся над поверхностью шельфа банки влияют на течения, которые приносят сюда питательные вещества. Скорость течения увеличивается, а это вызывает в свою очередь бурный рост планктона — корма для рыбы.

Если отправиться на катере, оборудованном эхолотом-самописцем, в плавание к востоку от Бостона, можно ознакомиться со всеми формами подводного рельефа, характерными для шельфов областей оледенения. Профиль, вычерчиваемый при этом на эхограмме, покажет сначала сравнительно неглубокую котловину залива Массачусетс (фиг. 29, Ж), затем вы пройдете над песчаным гребнем банки Стелваген. Далее на профиле появятся глубокие котловины и трогги, и лишь после этого вы подниметесь на банку Джорджес. Кстати сказать, там надо остерегаться бурунов и сулоев, возникающих над самыми от-



Фиг. 31. Образец батиметрической карты. На шельфе к югу от Нью-Йорка показано множество небольших гряд, похожих на песчаные острова вдоль современного берега. Неглубокие долины, пересекающие шельф, связаны с вершинами подводных каньонов, врезающихся в край шельфа.



Ф и г. 32. Серия мелководных банок вдоль внешнего края шельфа к северу от мыса Код. Штриховкой показаны котловины.

мелкими частями банки. Миновав гребень банки, вы увидите, как дно будет постепенно спускаться и выравниваться, пока не достигнет глубины 60 саженей. Там отмель резко обрывается и начинается крутой материковый склон.

Шельфы с вытянутыми песчаными банками и ложбинами

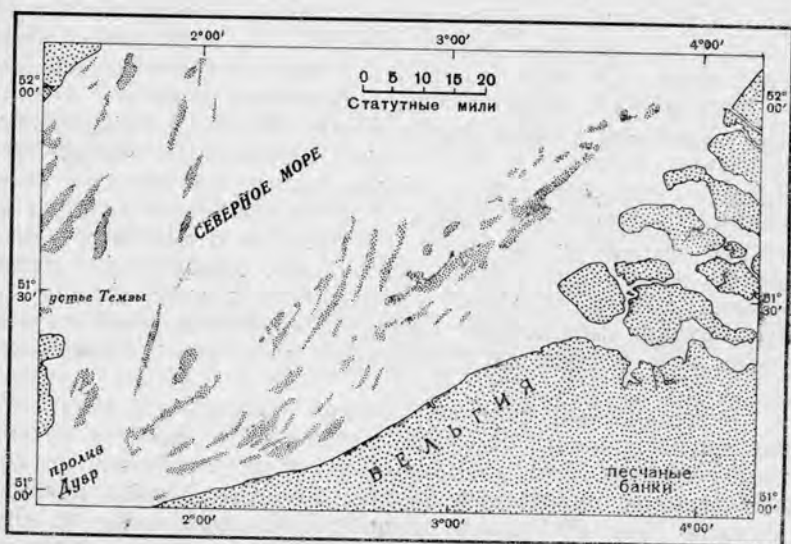
Холмистые шельфы областей древнего оледенения составляют особую категорию материковых отмелей. В отличие от них все остальные шельфы имеют почти плоскую поверхность. Поэтому и термин *шельф* подходит к ним гораздо больше, чем к описанным выше. Восточного побережья США в районе к югу от мыса Код и к юго-западу от банки Джорджес изменение характера рельефа шельфа от сложно расчлененного к относительно хорошо выровненному происходит очень резко. Подробные батиметрические карты этого района показывают нам дно с очень небольшими неровностями, среди которых преобладают слегка изогнутые гребни (фиг. 29, В; 31). Между гребнями лежат неглубокие котловинки, обычно вытянутые параллельно гребням. Этот тип подводного рельефа весьма напоминает рельеф прибрежной равнины штата Нью-Джерси. Подводные гребни и ложбины между ними очень похожи на песчаные гребни прибрежной равнины с разделяющими их болотами. Правда, на суше низины и солончаки прибрежной равнины оказываются более плоскими, чем днища котловинок на шельфе. Вероятно, на суше такие котловины заполняются осадками быстрее.

Осадки этой довольно неровной подводной равнины вдоль побережья Средне-Атлантических штатов были изучены в последние годы Стетсоном (Вудхолский океанографический институт), а еще раньше — Д. Кохи (Геологическая служба США) и мной. Распределение осадков здесь вовсе закономерно. Большие пространства дна покрыты песком. В некоторых местах, обычно в понижениях, песок смешивается с илом. На всем протяжении этого шельфа широко распространены полосы гравия, особенно частые на гребнях. Такое распределение донных осадков никак не соответствует прежним представлениям о том, что осадки на шельфах распределяются по размеру частиц — от наиболее грубых вблизи берега до тонких по мере удаления от него.

Вытянутые банки, простирающиеся поперек шельфа к югу от Нью-Йорка, по-видимому, довольно стабильны. Вытянутые песчаные банки очень подвижны и часто меняют свои размеры и положение. Они представляют, таким образом, серьезную опасность для мореплавания, поскольку карты, показывающие их, постоянно устаревают. Примером таких блуждающих песчаных банок могут служить нантакетские отмели. Во время одной из морских прогулок вблизи Нантакета я обнаружил, что

прошедший перед этим сильный шторм вызвал перемещение банок. Моя яхта села на мель в таком месте, где карта показывала достаточно большую глубину. Впрочем, сесть на блуждающую песчаную мель не так опасно, как налететь на подводную скалу. Нам удалось сняться с мели, став на якорь и перемещая груз с борта на борт.

Другой район блуждающих песчаных банок находится в Северном море к северу от Ла-Манша (фиг. 33). Эти банки



Фиг. 33. Песчаные банки — блуждающие отмели южной части Северного моря.

располагаются примерно параллельно обоим берегам пролива. Одна из групп банок протягивается вплоть до устья Темзы. Район этот важен для мореплавания и поэтому хорошо обеспечен картами. За перемещением банок здесь постоянно следят. Большие смещения происходят обычно во время сильных штормов, подобных шторму, пронесшемуся в феврале 1953 г. и во время которого были затоплены прибрежные низменности Голландии и Англии.

Шельфы, подверженные воздействию сильных течений

Существует несколько шельфов, связанных с деятельностью сильных течений. Один из них лежит вдоль восточного побережья Флориды, где Гольфстрим, двигаясь на север из Флоридского пролива, проходит очень близко от берега. Ширина

шельфа уменьшается от 60 миль у Джексонвилла, близ границы Джорджии (фиг. 29,Е) до 1 мили близ города Пальм-Бич. Далее к югу шельф отсутствует, в то время как вдоль побережья Средне-Атлантических штатов и Новой Англии глубины окраины шельфа достигают 60—70 саженей. Уже вблизи Джексонвилла глубины шельфа значительно меньше средних, а его окраины — всего 30 саженей. Сужаясь к югу, шельф одновременно мелеет, так что вблизи города Пальм-Бич его глубина уже не превышает нескольких саженей. В противоположность узкому и мелководному шельфу восточного побережья Флориды шельф ее западного побережья на всем протяжении имеет ширину около 150 миль и глубины столь же значительные, как и на шельфе близ берегов северо-восточных штатов.

Промываемый Гольфстримом шельф Флориды покрыт крупным песком, гравием и окатанными раковинами. Песок большей частью аутигенный и состоит из частиц фосфорита в смеси с зернами глауконита и оолита. Все они свидетельствуют о химическом выпадении из воды, а никак не о переносе частиц течением. Окатанные раковины, видимо, прибрежного происхождения, хотя и находятся на глубинах, превосходящих глубину обитания моллюсков. Сейчас осадконакопление на этом шельфе либо вообще не происходит, либо идет очень медленно.

С деятельностью сильных течений связаны глубокие промоины на поверхности шельфов, наблюдаемые там, где течения особенно сильны. Эти промоины выражены особенно четко в устьях заливов, например в проливе Золотые Ворота, глубиной 64 саженей (фиг. 29,Г), и в проливе Бунго при входе во внутреннее Японское море, где глубина 230 саженей. Сильные течения, идущие через этот пролив и другие проливы во внутреннее Японское море, очень затрудняли Японии защиту от вражеских подводных лодок во время второй мировой войны. Устанавливать в этих проливах и поддерживать в порядке противолодочные сети и минные заграждения было очень трудно из-за одновременного сочетания исключительно сильных течений и больших глубин.

Шельфы больших дельт

Особый тип шельфов составляют подводные окраины больших дельт. Похожая на птичью лапу дельта реки Миссисипи была образована этой рекой совсем недавно и выдвинулась далеко вперед на всю ширину шельфа (см. фиг. 43). Вблизи Южного протока дельты внешний склон шельфа обрывается к глубинам Мексиканского залива. Однако по обеим сторонам дельты располагаются поверхности шельфа с широкими террасами на глубинах 23, 36 и 50 саженей. Вокруг дельты Инда

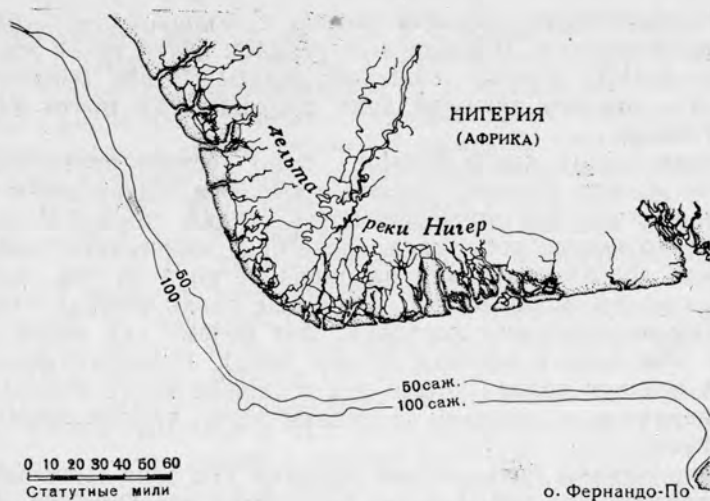
имеется еще более широкий шельф с большой террасой на глубине 50 саженей. Ширина этой террасы почти такая же, как и самой дельты. Шельф окаймляет дельты Нигера (фиг. 34) и Нила, так что его внешний край проходит там почти параллельно берегу.

Осадки вокруг краев больших дельт состоят почти исключительно из ила, большей частью с высоким содержанием глинистых частиц. Эти тонкозернистые осадки содержат также большое количество обломков древесины, вынесенных реками. Если вам доводилось плыть на пароходе вниз по реке вплоть до ее устья, вы могли видеть вытянутые вдоль течения отмели, покрытые застрявшими корягами. Вот почему так много древесных обломков в осадках вблизи дельт. Песчаная фракция донных осадков вблизи устьев рек содержит много слюды, которая переносится речными течениями легче, чем обычные зерна песка.

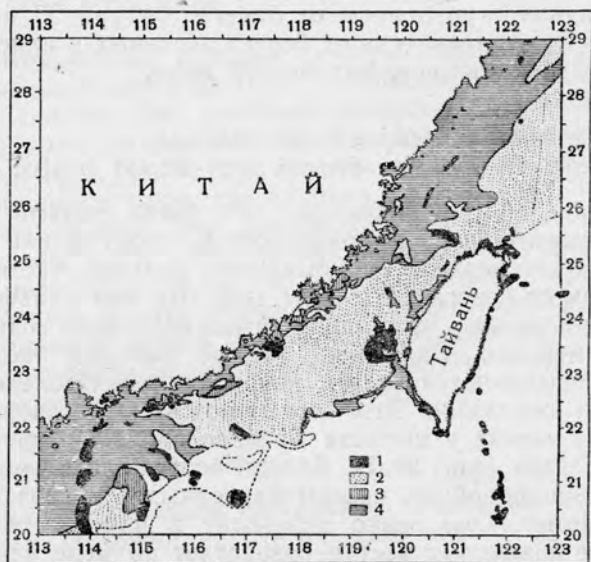
Перед устьями большинства крупных рек зона илов окаймлена песками. Это наблюдается близ устья рек Ориноко, Амазонки, Юкона и у большинства крупных рек Азии, в особенности Восточной Азии. В таком расположении осадков можно видеть яркий пример расхождения действительности с теоретическими представлениями о закономерном убывании размера частиц осадков с удалением от берега. Фигура 35 показывает относительную удаленность от берега песчаных и илистых осадков на шельфе Восточно-Китайского моря.

*Выровненные шельфы с убывающей
по мере удаления от берега крупностью осадка*

Первоначально предполагали, что такие шельфы характеризуются значительной выровненностью, пологим наклоном поверхности и закономерным убыванием размера частиц осадка с удалением от берега. На самом деле этот тип шельфа оказался настолько редким, что лишь в самые последние годы удалось найти пример его. Оказалось, что во внешней части такого шельфа располагаются холмы, покрытые сравнительно крупнозернистыми осадками. Этот предположительно «нормальный» тип шельфа лежит у пролива Аранзас вдоль побережья центрального Техаса (фиг. 29,А). Вблизи берега здесь имеются песчаные осадки, подобные пескам барьерных островов, но более мелкозернистые. Они резко переходят в илистые, в которых содержание глинистых частиц возрастает по мере удаления от берега. На внешней части шельфа почти вся небольшая по объему песчаная фракция состоит из фораминифер. Это шарообразные раковины плавающих у поверхности воды глобигерин, падающие на дно после отмирания. Вблизи берега в осадке преобладают донные фораминиферы.



Фиг. 34. Край материкового шельфа окаймляет фронтальную часть дельты реки Нигер, следуя почти параллельно берегу.



Фиг. 35. Внешняя часть шельфа вблизи Восточной Азии покрыта песком, тогда как илистые осадки лежат вблизи берега.

1 — обнажения коренных пород и камни; 2 — песок; 3 — илистый песок; 4 — ил.

Возможно, что есть и другие примеры шельфов с закономерно убывающим с удалением от берега размером частиц осадков. На морских картах иногда показан песок вблизи берега и ил — на внешней части шельфа. К сожалению, у нас нет проб донных осадков из этих мест, а промеры там очень редки.

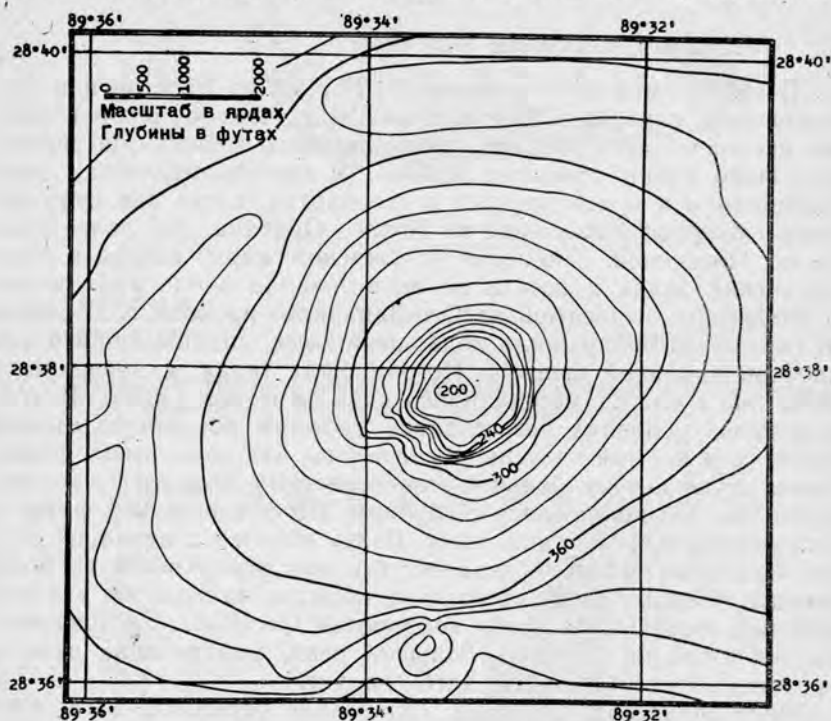
Шельфы с соляными куполами

В 1935 г. мой друг капитан Ф. Борден из Береговой и геодезической службы США сообщил мне, что он закартировал на внешней части шельфа, окаймляющего дельту Миссисипи, несколько очень странных холмов. Я был заинтригован этим сообщением и присоединился к его партии, когда она отправилась в очередное плавание из Нового Орлеана. Мы долго плыли по Миссисипи, изнемогая от ужасной жары; вышли в Мексиканский залив и пошли на юг-юго-запад вдоль края языка мутной воды, выносимой из Юго-Западного прохода. В 17 милях от берега мы обнаружили подводный холм, поднимавшийся над плоской равниной шельфа. Погода была тихая, и поверхность воды лишь слегка морщинилась едва заметной рябью. В этих идеальных условиях нам удалось провести подробную съемку холма меньше чем за день. Выяснилось, что холм имеет форму более круглую, чем большинство известных на шельфе холмов (фиг. 36). Он поднимался с глубины 370 футов до 200 футов и был окружен неглубоким рвом. Взять образец с вершины холма оказалось нелегкой задачей, так как поверхность ее была твердой. Однако после нескольких попыток нам все же удалось получить небольшую пробу водорослей *Corallina*. Следовательно, несмотря на близость большой реки, выделяющие известь организмы способны жить здесь на дне.

Посетив несколько позже Управление береговой и геодезической службы США в Вашингтоне, я получил неопубликованные детальные планшеты промера всей серии банок такого рода, располагающихся вдоль края шельфа к западу от дельты Миссисипи. Эти холмы были не совсем круглыми, но многие из них окружены рвами. Зная о существовании соляных куполов, обнаруженных на суше вдоль побережья Мексиканского залива, я предположил, вероятно несколько поспешно, что и холмы внешнего края шельфа также представляют собой соляные купола. По моим предположениям, они возвышались над общим уровнем шельфа потому, что не подвергались под водой воздействию эрозии и растворения, способствовавших разрушению большинства подобных форм рельефа на прилегающей суше¹. Примерно десять лет спустя Г. Стетсон, работая в Атлантиче-

¹ Исключение представляют холм Хай-Айленд на полуострове Боливар и холм Эйвери-Айленд в Луизиане.

ском океане в экспедиции Вудсхолского океанографического института на «Атлантисе», исследовал несколько таких холмов. Он получил при драгировании многочисленные округлые куски породы, состоящей из известковых водорослей и кораллов. Стетсон высказал тогда предположение, что холмы представляют



Фиг. 36. Овальный холм, возвышающийся над внешней частью шельфа к юго-западу от дельты Миссисипи; его происхождение связано, видимо, с крупным соляным куполом.

собой коралловые рифы, или, как их называют геологи, биогермы (то есть холмы, обязанные своим образованием росту некоторых видов накапливающих известь организмов).

Вопрос о том, являются ли шельфовые холмы соляными куполами или биогермами, вскоре вышел за рамки чисто академического спора. Дело в том, что соляные купола Техаса и Луизианы — не только экономически важные месторождения серы и соли. Еще более важно, что они связаны с поднятиями осадочных пластов, содержащих огромные запасы нефти¹.

¹ Выжимаемая вверх соль приподнимает слои осадочных пород в виде купола. Нефть, будучи легче воды, мигрирует вверх, в сводовую часть купола.

В связи с этим, как только технически стало возможным морское бурение, нефтяные компании начали исследовать шельфовые холмы геофизическими методами. Результаты их исследований все еще большей частью засекречены. Однако постепенно выясняется, что некоторые купола, судя по аномалиям силы тяжести, имеют соляные ядра. Соль тяжелее окружающих ее рыхлых осадков, так что над куполами отмечаются повышенные значения силы тяжести.

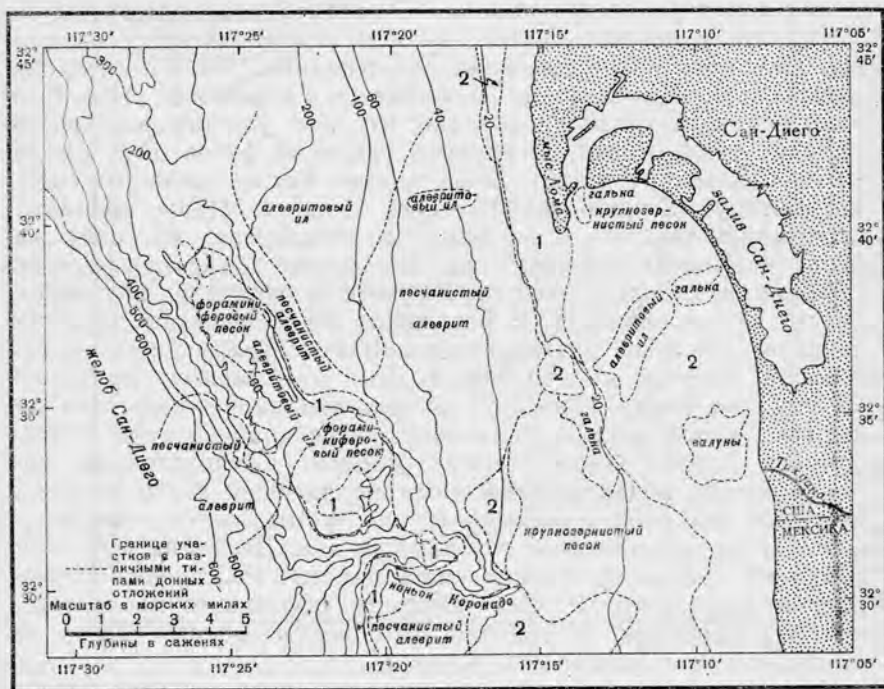
Во время работ, проводимых Скриппсовским институтом на материковом шельфе Техаса, мы еще раз убедились, что подводные холмы являются соляными куполами. Мы плыли вдоль внешнего края шельфа в 70 милях от Галвестона. День был ясный, а вода такая прозрачная, что нам удалось разглядеть одну из таких банок на глубине около 60 футов. Она имела эллипсоидные очертания. Были хорошо видны скалистые гребни, вытянутые вдоль длинной оси эллипса. Наши водолазы попытались спуститься на банку в аквалангах, но сразу же были окружены барракудами. Выглядели барракуды очень страшно и казались голодными, хотя и подошли, возможно, просто из любопытства. В результате наши исследователи решили ограничиться драгированием. Взятые драгой образцы содержали остатки миоценовой фауны, отложенные примерно 25 млн. лет назад. Известно, однако, что миоценовые слои на шельфе Техаса должны быть покрыты по крайней мере 10 000-футовой толщей более поздних осадков. Следовательно, соляной купол, обнаруженный нами на внешней части шельфа, поднялся по крайней мере на 10 тыс. футов, так что миоценовые породы оказались на поверхности дна. Дирекция нефтяной компании, финансировавшей наши работы, скептически отнеслась к этим выводам. Она поверила нам только после того, как мы передали палеонтологам образцы фораминифер, по которым и был установлен возраст.

Нет прямых доказательств того, что холмы материкового шельфа и в других районах являются соляными куполами. Однако можно предполагать, что многочисленные подводные холмы в Персидском заливе именно такого происхождения. Будет даже удивительно, если в ходе дальнейших исследований шельфов не обнаружатся другие примеры подводных соляных куполов.

Шельфы, обрамленные скалистыми банками и скалистыми островами

На многих узких материковых отмелях, особенно вдоль горных побережий, наблюдаются обширные площади скалистого дна. Скалистые выступы наиболее широко развиты вдоль внешнего края шельфа. Это можно видеть, например, на карте

шельфа в районе Сан-Диего, Калифорния (фиг. 37). Банка Коронадо образует здесь внешний край шельфа, поднимаясь над неглубокой подводной долиной, протягивающейся с материка. Скалистый характер банки стал очевидным для ученых Скриппсовского института в результате большого числа типично «скалистых» драгировок, во время которых мы без конца теряли наши драги. Это было в военные годы, когда нам



Фиг. 37. Сложное распределение донных осадков на материковой отмели вблизи Сан-Диего, Калифорния.

1 — скальные породы; 2 — мелкозернистый песок.

приходилось применять для этого легко рванувшиеся старые, изношенные тросы. К югу от банки, за пределами врезающегося в шельф подводного каньона, скалистое дно продолжается и образует, поднимаясь, скалистые острова Коронадо, принадлежащие Мексике. Установлено, что породы, слагающие банку внешней части шельфа и островов Коронадо, миоценового и плиоценового возраста (то есть образовались миллионы лет назад). На островах слои горных пород сильно дислоцированы. Можно предполагать, что они дислоцированы также и на

банке. Подводная фотография поверхности банки показана на фиг. 38.

Подводные склоны островов Коронадо во многих местах круто падают к глубинам 50—100 футов, а не окружены мелководными абразионными террасами. Спускаясь с аквалангом по



Фиг. 38. Редкий снимок коренных пород на банке вблизи Сан-Диего, на глубине 380 футов. В верхнем левом углу виден, по-видимому, нависающий скалистый уступ с небольшим кораллом. Предмет в нижнем левом углу — часть фотоустановки.

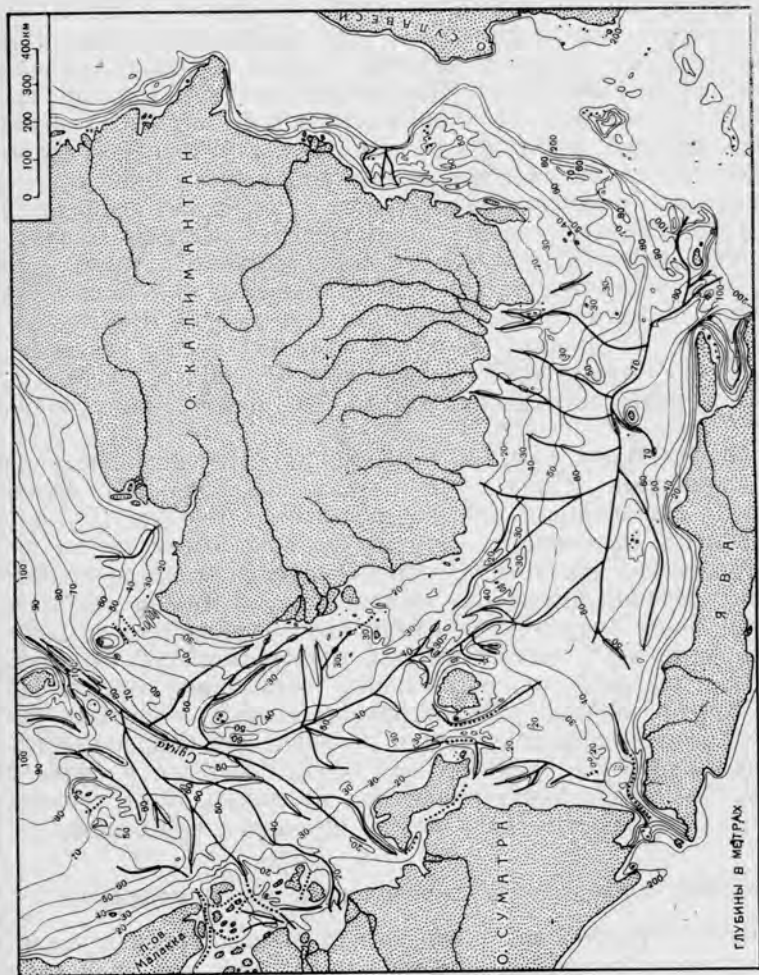
одному из таких уступов, я был поражен огромными пещерами и нависающими выступами скал. Гигантские ламинарии, растущие на склонах, образуют надежное укрытие для ярких оранжевых рыбок гарибальди и других рыбешек, снующих в зарослях, удачно дополняющих волшебную картину колышущегося подводного леса.

Внутренняя часть шельфа вблизи Сан-Диего, в пределах своего скалистого обрамления, также весьма интересна. Как и во многих других местах, по мере удаления от берега размер зерен осадка на шельфе здесь не уменьшается от грубо- к мелкозернистому. Наоборот, двигаясь в море от устья реки Тихуана (правый южный угол фиг. 37), можно встретить сначала тонкозернистый песок, похожий на пляжевый, а затем полосу грубообломочного материала, состоящего из окатанной гальки и валунов вперемешку с ракушечным песком. Полоса эта, шириной в несколько миль, несмотря на свою плоскую поверхность, по-видимому, никогда не была покрыта тонкозернистыми осадками, выносимыми рекой Тихуана во время паводков. За ней снова появляется тонкозернистый песок, а затем вновь полоса галечника, содержащего на этот раз уже значительное количество тонкозернистого песка и даже ила. Еще дальше лежит грубозернистый песок коричневого цвета, резко отличающийся от серого прибрежного песка. Коричневый цвет обусловлен окислением зерен и обычно характерен для речных отложений. Дальше осадок становится уже илистым, хотя содержит еще значительное количество песка. Со дна подводной долины, протягивающейся в открытое море от банки Коронадо, мелкая галька была поднята лишь в одном из уловов драги, тогда как обычно в пробах там встречаются тонкозернистые осадки. Скалистая поверхность банки Коронадо покрыта сплошным тонким слоем известкового песка. Основная часть его состоит из раковин фораминифер, часто заполненных глауконитом. Это свидетельствует об очень медленном отложении осадка, так как глауконит — минерал аутигенный и образуется он очень медленно.

Шельфам залива Санта-Моника вблизи Лос-Анжелеса и Сан-Франциско свойственны многие черты, описанные выше для района Сан-Диего (фиг. 29,Г). Рыбопромысловые карты западного побережья Португалии показывают еще один пример шельфа такого типа.

Шельфы с системами отдельных мелководных долин

Системы неглубоких долин на поверхности шельфов отличаются от глубоких троговых долин областей древнего оледенения. Таков Зондский шельф, лежащий между Калимантаном и Явой с одной стороны и полуостровом Малайя — с другой (фиг. 39). Мы не располагаем достаточным количеством измерений глубин, чтобы с уверенностью рисовать здесь картину подводных долин. Однако можно согласиться с интерпретацией данных геологов Г. А. Ф. Моленграфа и Ф. Кюнена. Они считают, что долины этого шельфа образуют систему притоков древовидных очертаний, напоминающих жилки листа, подобно



Ф и г. 39. Карта Зондского шельфа. Черными линиями показаны затопленные речные долины. Обратите внимание на их связь с реками островов.

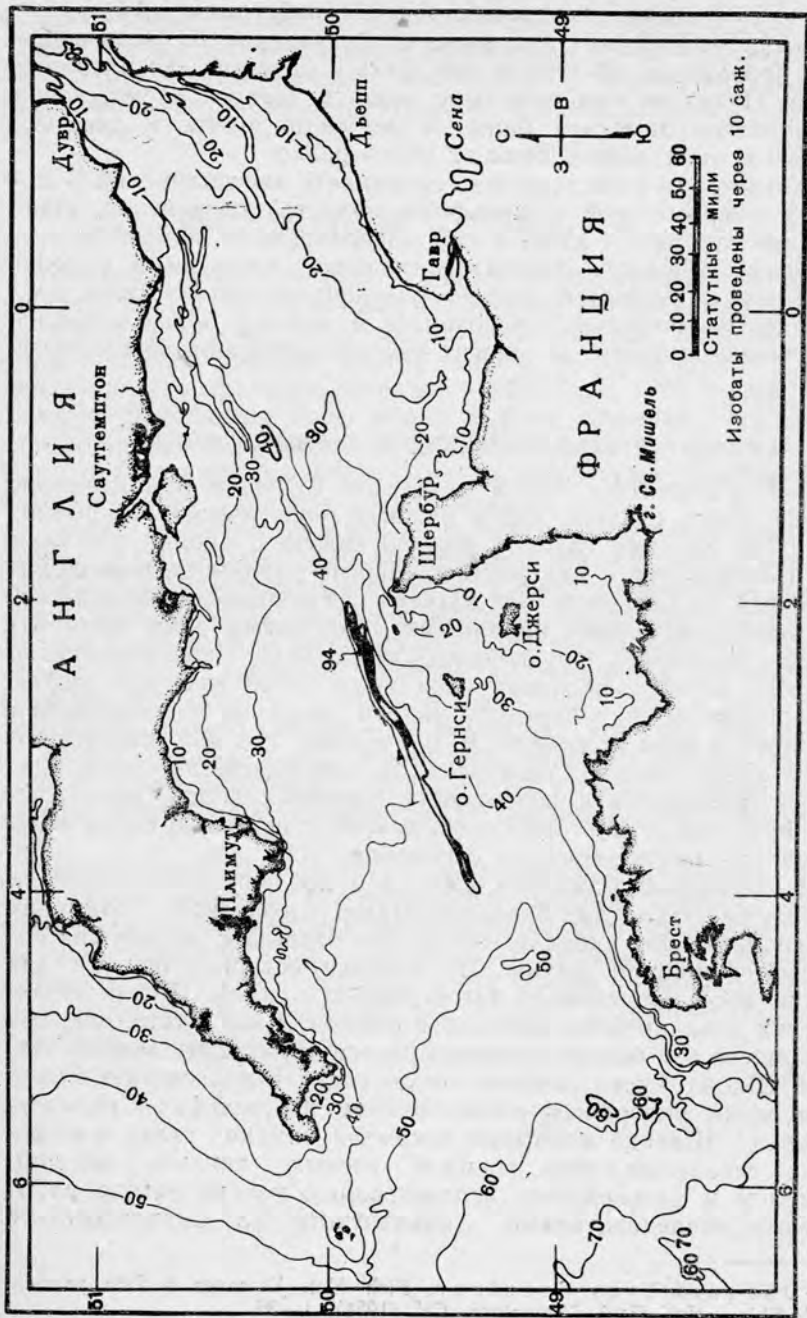
наземным речным системам. Вблизи островов протоки часто связаны с эродирующей деятельностью приливов, а также с основной древовидной системой долин. Однако объяснить происхождение всей системы долин деятельностью одних только приливов, конечно, нельзя, так как в пределах шельфа приливные течения для этого слишком слабы.

Другая, лучше изученная, но менее целостная система долин обнаружена вблизи побережья Средне-Атлантических штатов (см. фиг. 31). Хорошо развита долина, берущая начало прямо в порту Нью-Йорка. Она пересекает весь шельф, заканчиваясь у его внешнего края выступом, который можно сравнить с дельтой. Вдоль русла этой долины разбросаны вытянутые котловины, но ни одна из них по своей глубине не может сравниться с котловинами трогов у побережья областей древнего оледенения. Долины, выходящие из заливов Делавэр и Чесапик, оканчиваются в нескольких милях за пределами залива. Зато в самом Чесапикском заливе долина может быть прослежена на сотню миль, вплоть до Балтиморы. Бурение показывает, что эти долины частично уже заполнены осадками. Так, глубина Чесапикского залива всего 150 футов, тогда как коренные породы погружены там на 300 футов ниже уровня моря.

Пролив Ла-Манш (фиг. 40 и фиг. 29,Д) дает нам еще один пример подводной долины, так называемой Хёрд-Дип, лежащей между Девонширом и полуостровом Шербур. Глубина этой долины в 10 милях от острова Олдерни достигает 94 саженьей. Можно предположить, что большую роль здесь играют приливные течения, поскольку приливы в Ла-Манше наиболее высокие в мире. Течения здесь настолько сильны, что создают неприятную толчею, вызывающую у многих морскую болезнь. Автору это известно по собственному печальному опыту. На дне Ла-Манша широко распространены выходы коренных пород, исследованные французами и англичанами. Коренные породы дна Ла-Манша представляют особый интерес в связи с возможностью постройки туннеля под проливом. Этот туннель обеспечивал бы земную связь между Францией и Англией.

Шельфы, приподнятые в результате роста кораллов

Во многих тропических районах над общим уровнем шельфа возвышаются подобные холмам или вытянутые в виде гряд коралловые рифы. В некоторых местах они поднимаются с поверхности шельфов, лежащей на глубинах, слишком больших для жизни рифообразующих кораллов. Рифы эти будут рассматриваться в гл. X, но без упоминания о них здесь описание различных типов шельфа было бы неполным. Наиболее известным примером такого типа шельфа является Большой Барьер-



Фиг. 40. Участки подводной долины, протягивающейся в центральной части пролива Ла-Манш.

ный риф вдоль северо-восточного побережья Австралии (фиг. 29, Б). Риф этот покрывает сотни квадратных миль шельфа и превращает обширную его часть в опасный для плавания район. Плавание там возможно лишь в дневное время, когда можно легко заметить банки с марса на мачте. К счастью, туманы в этом районе бывают очень редко.

В некотором смысле можно сравнивать австралийский Большой Барьерный риф с шельфами областей оледенения. Наибольшие глубины и здесь и там располагаются вблизи берега, а опасные рифы лежат преимущественно уже за ними. Однако в отличие от областей древнего оледенения прибрежный проход здесь значительно мелководнее и дно его более выровнено, а внешние рифы во многих местах достигают поверхности воды.

АКВАЛАНГ И БУДУЩЕЕ ИССЛЕДОВАНИИ ШЕЛЬФА

Можно надеяться, что в недалеком будущем при изучении шельфа будет сделано много важных геологических открытий, поскольку средняя глубина его, 30 саженей, вполне доступна для исследования с аквалангом. Многие районы шельфа вблизи южной Калифорнии уже изучены экспедициями аквалангистов, организованными нефтяными компаниями. Ими были открыты, например, антиклинальные купола, представляющие большой интерес, поскольку под ними часто залегают нефтеносные пласты. Аквалангисты видели также на дне отложения асфальта в виде холмиков. В тех местах, где дно шельфа покрыто лишь тонким слоем осадков, аквалангистам часто удавалось проникнуть к поверхности коренных пород, прокладывая себе путь сквозь осадочный покров с помощью струи воды из шланга, опускаемого им с корабля.

Исследования банок на шельфе у побережья Техаса были проведены геологами-аквалангистами нефтяной компании «Магнолия». Они сделали интересные открытия, обнаружив образцы ископаемой фауны. Применение обычной техники для взятия проб потребовало бы огромных усилий. Школа французских аквалангистов связана с именем Жака Кусто, впервые создавшего эту быстро развивающуюся область подводной техники. Школа Кусто написала новую главу в археологию благодаря своим подводным исследованиям на шельфах Средиземноморья¹. Широко известные открытия римских галер с амфорами, сделанные этой группой ученых, явились могучим стимулом к дальнейшему использованию нового метода работ другими исследователями. Аквалангисты из Скриппсовского

¹ Jacques-Yves Cousteau, Fish Men Discover a 2,200-year-old Greek Ship, «Nat. Geol. Magazine», CV (1954), 1—36.

океанографического института обнаружили, работая вблизи Ла-Хольи, множество «метатес» — зернотерки. Эти «метатес» были либо оставлены на шельфе индейцами в период отступления моря, либо, что менее вероятно, были завезены сюда с суши на каное.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ШЕЛЬФЕ

Обобщим статистические данные, характеризующие материковые шельфы. Средняя ширина шельфа, по-видимому, 42 мили. Средняя глубина края шельфа — 72 сажени. Средняя глубина наиболее плоских частей шельфа — 35 саженей. Средний уклон поверхности шельфа — $0^{\circ}07'$, или 10 футов на 1 милю. Эти цифры могут иметь важное значение в вопросах международного права, в частности в связи с территориальными претензиями, выдвигаемыми государствами, у побережий которых лежат наиболее узкие шельфы.

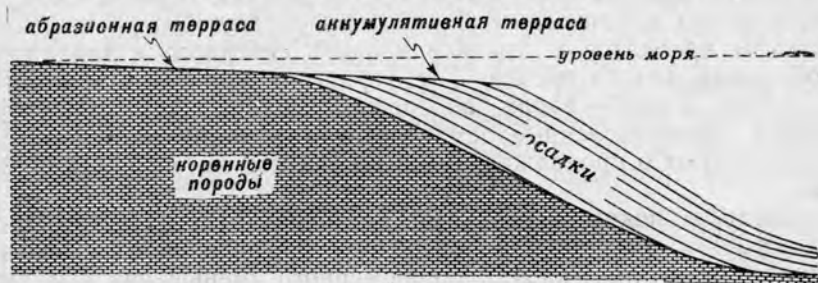
Самые глубокие шельфы расположены у берегов областей древнего оледенения, хотя встречаются они и в других местах, например у Юго-Западной Африки. Самые мелководные шельфы расположены в районах с широким распространением кораллов и вдоль не подвергавшихся оледенению берегов Сибири, обращенных к Северному Ледовитому океану. Самые широкие шельфы находятся в Арктике и вдоль северного и западного побережий Тихого океана — от Берингова моря до Австралии, а самые узкие — вдоль побережий молодых горных сооружений. Многочисленные землетрясения в таких районах свидетельствуют о продолжающихся до сих пор интенсивных сбросах.

Шельфы покрыты осадками различного типа, часто напоминающими мозаику. На поперечном профиле шельфа нельзя проследить сколько-нибудь закономерного уменьшения или увеличения размеров зерна осадочного материала. В противоположность этому крупность осадочных частиц на широких шельфах перед устьями больших рек обычно возрастает по мере удаления от берега.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАТЕРИКОВЫХ ШЕЛЬФОВ

ПРЕЖНИЕ ГИПОТЕЗЫ

Долгое время геологи считали, что материковые шельфы созданы в современных условиях. Внутренние части шельфов рассматривались как террасы, врезанные волнами в коренных породах берегов. Внешние же части шельфов описывались в качестве аккумулятивных или построенных волнами террас, созданных путем отложения материала, срезаемого на берегах волнами или выносимого реками (фиг. 41). Считали,



Фиг. 41. Схема, иллюстрирующая гипотезу происхождения материковой отмели в результате развития абразионной и аккумулятивной террас.

что глубины внешнего края шельфа соответствуют так называемой волновой базе, то есть глубине, ниже которой влияние волн уже не сказывается.

Материалы, полученные о материковых шельфах, показали несостоятельность этой гипотезы. Открытие на шельфах обширных участков дна с выходами коренных пород противоречит представлению об аккумулятивной террасе. В районах же, где не были встречены выходы коренных пород на внешней части шельфа, старая гипотеза не подтвердилась по другим причинам. Во-первых, выходы коренных пород часто обнару-

живаются на материковом склоне, сразу же за краем шельфа, или на склонах подводных каньонов, прорезающих шельф. Следовательно, в этих местах не может быть сколько-нибудь значительных аккумулятивных террас. Во-вторых, глубины внешнего края шельфа не связаны с размерами волны, чего можно было бы ожидать, если бы эти глубины определялись волновой базой. Так, например, края шельфов у открытых побережий не располагаются на больших глубинах, а лежат в среднем несколько выше, чем края шельфов на побережьях, надежнее защищенных от волнения. В-третьих, распределение осадков по размеру зерна на внешнем крае шельфа столь изменчиво, что вряд ли они будут соответствовать краю растущей аккумулятивной террасы. В самом деле, ведь этот край должен был бы располагаться на глубине, где волны уже утрачивают способность перемещать частицы осадка! В-четвертых, рельеф внешних частей шельфа слишком неровный, чтобы допустить существование там аккумулятивной террасы.

ПОНИЖЕНИЕ

УРОВНЯ ОКЕАНА В ЛЕДНИКОВОЕ ВРЕМЯ

Чтобы понять современный характер материковых шельфов, необходимо познакомиться с данными о понижении уровня океана в различные стадии ледниковой эпохи (плейстоцен), когда огромные материковые ледники покрывали обширные области Северной Америки и несколько меньшие площади в Европе и Южной Америке (фиг. 42). Этот лед возник, вероятно, за счет испарения воды океанов и последующего выпадения ее в виде снега. В результате уровень океана понизился. Ученые подсчитали объем древних ледников. Если перевести этот объем в объем морской воды, можно предположить, что уровень океана понижался тогда на 250—500 футов¹.

К сожалению, все расчеты до сих пор страдали неточностью из-за отсутствия сведений о максимальной толщине ледниковых щитов и из-за ненадежности данных о времени развития максимального оледенения. Многие цифры были занижены, поскольку ученые не знали, что огромные ледники простирались на обширные области материковых шельфов.

Кроме того, прежнее предположение о том, что горные страны, лежащие в пределах покровных ледников, никогда не покрывались льдом, сейчас полностью отвергается. Раньше считали, например, что такие области, как полуостров Гаспе в Квебеке, северный Лабрадор и самая высокая часть Скандинав-

¹ Новейший обзор этих подсчетов можно найти в книге Р. Ф. Линт, *Ледники и палеогеография плейстоцена*, М., ИЛ, 1963.— *Прим. ред.*

ского полуострова не были покрыты ледником, так как там отсутствовали ледниковые отложения, а их флора считалась эндемичной и реликтовой флорой, сохранившейся с доледникового времени. Однако детальные геологические исследования



Фиг. 42. Развитие материковых ледников северного полушария в ледниковую эпоху.

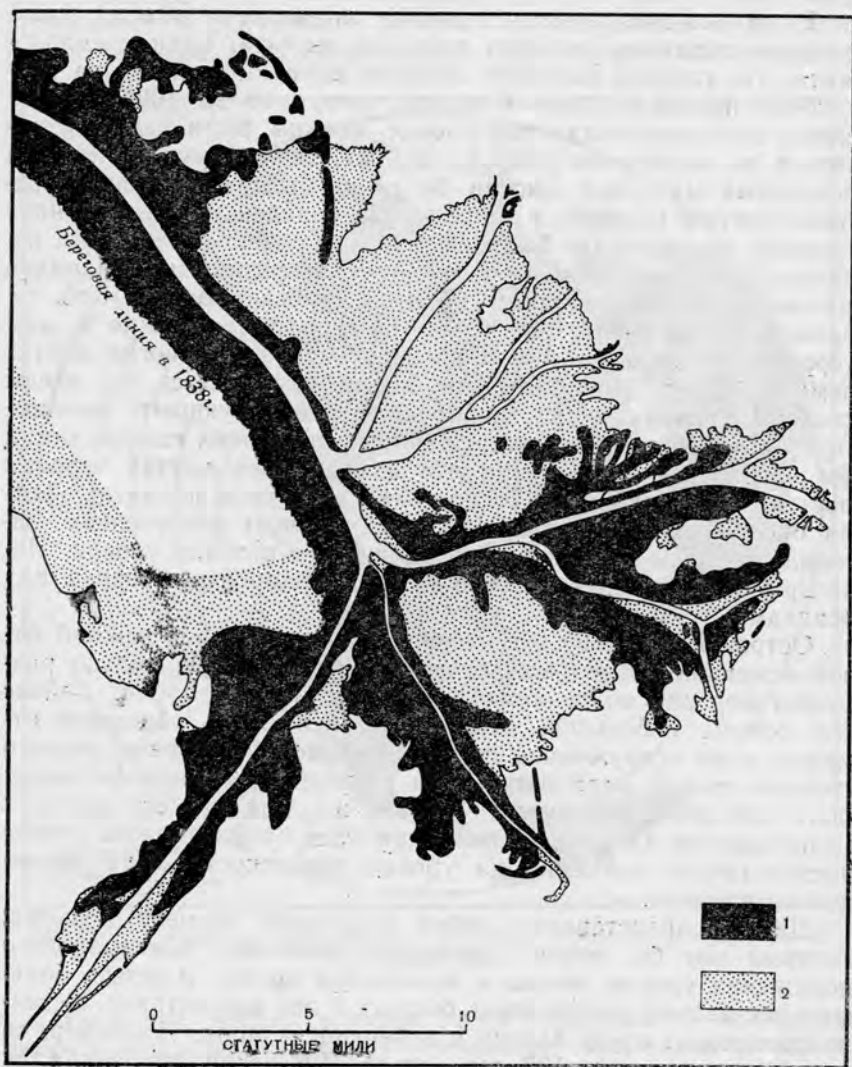
показали, что районы, которые ранее считались не подвергавшимися оледенению, имеют ледниковые отложения и ледниковую штриховку. Ученые полагают, что почти полное отсутствие ледниковых отложений в этих районах можно объяснить очень интенсивным морозным выветриванием. Возможно также, что эти районы не были заняты ледником во время последней, наиболее сильной стадии оледенения. Однако ледник здесь был раньше, признаки оледенения уже исчезли, и прошло достаточно много времени, прежде чем флора получила эндемичный облик.

*МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
УРОВНЯ ОКЕАНА ЛЕДНИКОВОГО ВРЕМЕНИ*

Возможно, что лучшим методом определения объема материковых ледников является изучение шельфа. Если предположить, что главное развитие ледника прошло за какой-то достаточно продолжительный период, например за 1000 лет, то следы пребывания на этом уровне должны были как-то отразиться на подводном рельефе. Волны, воздействуя на мягкий осадочный материал, смогли бы очень быстро вырезать береговые уступы (клифы) и террасы. По крайней мере внутренние границы таких террас были бы близки уровню океана того периода. Если бы современные ледники Антарктики и Гренландии растаяли (повысив, таким образом, уровень океана), то современные береговые уступы (клифы) и прилегающие к ним террасы опустились бы под уровень океана во многих местах земного шара. При этом под водой сохранились бы следы стояния уровня океана периода, предшествующего таянию. Правда, вслед за таким погружением у подножия клифов могли бы накопиться осадки, так что в отдельных местах террасы постепенно исчезли бы. Точно таким же путем поднятие уровня океана, последовавшее за максимальным оледенением, затопило террасы и клифы периода низкого стояния уровня. Некоторые из этих террас, несомненно, захоронены сейчас под осадками.

Остров Гельголанд, служивший во время войны важной базой немецких подводных лодок в Северном море, сильно разрушен морским волнением уже за историческое время. Сейчас это совсем небольшой островок, окруженный обширной отмелью, едва погруженной под уровень моря. Во время низкого стояния уровня моря острова на внешнем крае шельфа могли быть срезаны волнением точно так же, как это случилось с Гельголандом. Образовавшиеся при этом банки должны сейчас располагаться примерно на уровне поверхности моря ледникового времени.

Дельты представляют собой еще один элемент рельефа, который мог бы помочь определить величину максимального понижения уровня океана в ледниковое время. У устьев больших рек дельты растут очень быстро, и это разрастание частично происходит очень близко к поверхности моря. Например, за последние примерно 100 лет дельта Миссисипи прибавила к территории Луизианы полосу суши площадью по крайней мере 100 квадратных миль (фиг. 43). Вся эта вновь созданная суша лежит всего лишь на 1—2 фута выше уровня океана. Если бы Миссисипи изменила свое течение и направила воды к востоку через более короткий проток Атчафалая, то уровень современной дельты, наверное, опустился бы на несколько футов вслед-



Фиг. 43. Рост дельты Миссисипи за последнее столетие.
1 — дельта в 1838 г.; 2 — рост дельты с 1838 г.

ствие постепенного уплотнения илистых осадков. Песчаные же дельты обычно опускания не испытывают. Дельты, построенные во время ледникового понижения уровня океана, сохраняются примерно на уровне океана в период максимального оледенения.

Вследствие ударов прибоем абрадирующая способность волн в зоне их разрушения, конечно, оказывается намного больше, чем в удаленных от берега более глубоких местах. Поэтому повсюду, где внешний край шельфа был создан в результате волнового срезания, уровень внешнего края может быть лишь на несколько футов ниже самого низкого стояния уровня ледникового времени. Следовательно, глубины внешнего края шельфа также могут быть полезны для определения самых низких стояний уровня океана в течение ледникового времени.

Если учесть все сказанное, может показаться, что определение уровня океана эпохи максимального оледенения — задача сравнительно легкая. К сожалению, некоторые обстоятельства осложняют ее решение. Большинство древних абразионных поверхностей уже покрыто осадками. Пример такого захоронения обнаружен при бурении скважин в осадочной толще на шельфе вблизи Санта-Барбара, Калифорния (фиг. 44). Древняя абразионная терраса была здесь в значительной мере перекрыта молодыми осадками¹.

Подвижки земной коры также затрудняют изучение. В областях, испытавших недавнее опускание, террасы, врезанные во время низкого стояния уровня моря, или дельты, возникающие в это же время, будут погружены на глубину, превышающую стояние уровня, при котором они были образованы. Подобно этому в поднятых областях террасы будут расположены на более высоком уровне, а иногда даже выше уровня океана.

В связи с современными тектоническими движениями наилучшие результаты при изучении ледниковых террас или дельт могут быть получены в относительно стабильных районах, где эти нарушения незначительны. В действительности, видимо, не существует побережий, не испытавших хотя бы в малой степени тектонических деформаций. Так, восточное и южное побережья США в общем стабильны, а западное — весьма подвижно. А ведь и восточное побережье, и берега Мексиканского залива на протяжении последних миллионов лет испытывали погружение. Об этом свидетельствует тот факт, что скважины, пробуренные вдоль этих побережий, прошли толщу осадков мощностью в несколько тысяч футов. Судя по ископаемой фауне, все эти осадки были отложены на мелководьях или

¹ Разработанный недавно метод непрерывного сейсмоакустического профилирования открывает большие возможности для выявления погребенных террас с помощью отражающихся звуковых сигналов.

суше. Осадки прослеживаются в глубь геологической истории по крайней мере вплоть до мелового периода (70—140 млн. лет назад). Чтобы погрузить эти мелководные осадки на огромную глубину, где они теперь залегают, необходима была скорость опускания порядка всего лишь 1 фута в 10 тысяч лет. Таким образом, это погружение не могло заметно повлиять на развитие террас во время последнего максимального оледенения (около 20—25 тыс. лет назад). Не могло повлиять сколько-нибудь заметным образом это погружение и на террасы более



Фиг. 44. Затопленная и частично захороненная современными осадками абразионная терраса. Ее существование было установлено с помощью гидравлического бурения, выполненного водолазом. Соотношение вертикального и горизонтального масштабов примерно 1:10.

ранних стадий оледенения, поскольку весь ледниковый период продолжался менее одного миллиона лет.

В поисках надежных доказательств величины опускания уровня океана, казалось бы, нужно быть особенно осторожным в отношении тех побережий, где часты землетрясения и где происходит активное современное горообразование, например, в Калифорнии, на южной Аляске, в Японии, на Филиппинах и в западной части Южной Америки. Однако положение подводных террас в этих подвижных районах мало отличается от наблюдаемого вдоль стабильных побережий. Следовательно, со времени опусканий уровня океана в ледниковый период сколько-нибудь значительных подвижек коры там не было.

Средняя глубина края шельфа в районах, где перелом поверхности дна от отмели к материковому склону особенно резкий, равна 72 саженям (432 футам). Поскольку мы предпо-

лагаем, что край шельфа лежит немного ниже наиболее низкого стояния уровня океана в ледниковое время, то понижение уровня, очевидно, достигало 400 футов. С другой стороны, на шельфах существует много террас, расположенных на глубинах до 50 саженей (300 футов). Ниже этой глубины террасы, по видимому, встречаются очень редко. Более вероятным поэтому было бы предположить опускание уровня не на 400, а на 300 футов. Возможно, конечно, что уровень 300-футовых террас соответствует стоянию уровня океана во время последнего оледенения, а террасы более низкого уровня, образованные во время более ранних оледенений, в значительной мере погребены под осадками. При этом сохранился только самый нижний перелом склона у края шельфа, отмечающий максимальное понижение уровня океана. Этот край шельфа сохраняется во многих местах неизменным благодаря сильным течениям, возникающим у столь резкого перегиба поверхности дна.

В ближайшем будущем можно будет проследить поднятие уровня океана начиная с конца последней стадии оледенения. Это станет возможным благодаря применению радиоуглеродного метода определения абсолютного возраста мелководных осадков, отлагавшихся наступающим морем¹. Предварительные данные показывают, что уровень океана поднимался особенно быстро от глубины 260 футов до 20 футов в период между 17 и 6 тысячами лет назад. После этого уровень либо поднимался очень медленно вплоть до современного, либо прекратил подниматься совсем около 5 тыс. лет назад. Возможно также, что уровень океана был выше современного примерно на 10 футов в течение всего периода, когда климат был теплее современного (5—4 тысячи лет назад) и понизился уже в течение исторического времени. По мнению автора, имеющиеся данные свидетельствуют скорее в пользу представления об очень медленном поднятии уровня, продолжающемся до наших дней.

ПРИЧИНЫ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДКОВ

Если бы современный уровень океана установился давно, то тонкие осадки покрывали бы внешнюю часть шельфа по крайней мере в тех районах, где нет сильных придонных течений. Ясно также, что в основном осадки сортировались бы по убывающей крупности частиц от берега в сторону моря. Отсутствие такой закономерности распределения осадков на шель-

¹ Радиоуглеродный метод используется радиохимиками для определения абсолютного возраста остатков раковин и растений для отрезка времени до 40 тысяч лет назад.

фах может быть объяснено теми же самыми изменениями уровня океана, которые обусловили формирование их рельефа.

Когда уровень океана был ниже, крупнозернистые мелководные или даже наземные осадки отлагались в тех местах, где современные глубины исключают возможность их накопления. Прямым подтверждением этой гипотезы могут служить некоторые, пока еще немногочисленные определения возраста ракушняковых песков радиоуглеродным методом; они показали, что такие пески были отложены на внешней части шельфа около Галвестона, штат Техас, либо непосредственно перед повышением уровня океана, либо во время его поднятия. Во многих районах осадки, вынесенные реками ледникового периода, более полноводными благодаря таянию льдов, были крупнее осадков, выносимых современными реками. Эти грубозернистые осадки были отложены на осушившихся в ту пору шельфах.

Таяние ледников, начавшееся примерно 17—20 тысяч лет назад, вызвало затопление или превращение в заливы речных долин вдоль большинства побережий мира. В результате этого затопления реки начали откладывать большую часть выносимых ими осадков в своих эстуариях (подобных заливу Чесапик) и, следовательно, выносили на открытую часть шельфа очень мало осадочного материала. По этой причине поверх прежних грубозернистых шельфовых осадков, образовавшихся в последний ледниковый период, был отложен лишь очень тонкий покров современных осадков.

Даже вблизи крупных рек, способных создавать дельты, эти грубозернистые осадки остаются на внешней части шельфа неприкрытыми. Правда, осадки здесь поступают в достаточном количестве, но во многих местах при этом течения настолько сильны, что препятствуют осаджению. Подобные условия наблюдаются на шельфах вблизи устьев таких больших рек, как Амазонка и Ориноко, где Северное экваториальное течение, несомненно, охватывает всю толщу воды и оказывает сильное влияние на поверхность шельфа. Вблизи устьев крупных рек Восточной Азии (см. фиг. 35) проходит течение Курисио (Японское), обладающее высокой скоростью вдоль всего внешнего края шельфа и препятствующее отложению илов в пределах широкой полосы дна. В отличие от этого в районе устья реки Миссисипи и особенно к западу от ее дельты осадки сейчас накапливаются и на внешней части шельфа. Вследствие этого мы обнаруживаем здесь покров послеледниковых осадков поверх более грубозернистого материала, отложенного в ледниковое время.

На шельфе имеются древние аналоги современных барьерных островов, Атлантик-Сити, Нью-Джерси (см. фиг. 31). Джонс-Бич и Кони-Айленд вблизи Нью-Йорка и остров Гал-

вестон у побережья Техаса. Они образовались во время низкого стояния уровня и при повышении его были затоплены. В районах медленного осадконакопления такие затопленные острова распознаются легко. Например, на шельфе вдоль восточного побережья США (см. фиг. 31) они имеют сейчас форму вытянутых холмов. В процессе поднятия уровня океана до его современного положения были многочисленные останки. Во время каждой из них образовывались новые острова, которые затем также погружались, так что в конце концов вся полоса шельфа покрылась песчаными грядами, разделенными ложбинами.

У побережья Луизианы и Техаса к западу от дельты Миссисипи были обнаружены затопленные острова несколько иного типа. Они не такие вытянутые и некоторые из них связаны, как предполагают, с соляными куполами. Бурение, проведенное нефтяной компанией «Магнолия», показало, однако, что предполагаемые купола — песчаные аккумулятивные формы, образовавшиеся непосредственно на поверхности илов, покрывающих шельф. Подобным образом песчаные пляжи вдоль многих современных побережий покрывают более древние илистые осадки. Не исключена возможность, что исследования с помощью акваланга позволят обнаружить следы древних индейских племен, заселявших эти острова в прошлом, когда положение уровня океана было иным.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ШЕЛЬФА В РЕЗУЛЬТАТЕ ЛЕДНИКОВОЙ ЭРОЗИИ И АККУМУЛЯЦИИ

Вряд ли случайно совпадение, что почти все глубокие желоба и котловины материковых шельфов обнаруживаются вблизи областей древнего оледенения. Современная береговая линия не была барьером для движения льда в ледниковые эпохи. Отчасти этому способствовало более низкое стояние уровня океана; но и независимо от этого ледники вполне могли выдвигаться в океан, подобно тому как они выдвигаются сейчас по периферии Антарктики. Сначала лед выступал в море в виде плавающих языков, но толщина его все время увеличивалась, и он начал стекать прямо по дну. Ледник оставил на дне следы своего движения, подобные ледниковым бороздам на суше. Геоморфологические исследования районов, испытавших древнее оледенение, показывают исключительно сложный рельеф суши. Для таких районов, как Канада и Северная Европа, характерны многочисленные озера с глубинами в сотни футов. Великие озера США — самые большие и глубокие на земле — расположены именно в области древнего оледенения. Испытавшие оледенение горные хребты также покры-

ты мириадами глубоких озер. Геологи предполагают, что эти озера — результат деятельности ледника.

Вызывает удивление, почему геологи, не колеблясь принимающие гипотезу ледниковой эрозии суши при столкновении с подобными же формами рельефа на морском дне, для объяснения их происхождения обращаются к тектоническим движениям и связывают их главным образом с разломами. Например, шотландский геолог Дж. У. Грегори, получивший известность своими работами по африканским рифтовым долинам, объясненным им сбросами, предполагает, что фьорды Норвегии также обусловлены сбросами.

Его уверенность, наверное, была бы поколеблена, если бы он исследовал другие побережья областей оледенения. Он увидел бы, как похожи фьорды во всех этих областях на фьорды Норвегии. Особенно поколебало бы его позицию то, что он не смог бы обнаружить типичные фьорды в областях, не испытавших оледенения.

Д. Джонсон из Колумбийского университета, ставший известным благодаря своей книге о процессах развития берегов, изучал карты берегов Новой Англии. Залив Фанди он считает древней сбросовой долиной. Подобно Грегори, он не учел того, что аналогичные формы рельефа дна встречаются на шельфах всех областей древнего оледенения. Если бы Джонсон ознакомился с формами рельефа, связанными с ледниковой эрозией, у него не осталось бы сомнений, что деятельность ледников не ограничивалась пределами суши. Совсем недавно У. Хельтедаль, норвежский профессор геологии университета в Осло, и его сын Г. Хольтедаль из Бергенского университета объяснили образование рельефа шельфа у берегов Норвегии сбросами и разломами. Возможно, отчасти это действительно так. Об этом свидетельствуют тектонические уступы, параллельные берегу. Однако странно, что подобные формы рельефа обнаружены только вблизи побережий областей древнего оледенения, но их нет на шельфах других типов и даже в таких областях, где в отличие от Норвегии на прилегающей суше существуют доказательства новейших разломов и сбросовых долин.

Обрывы кабелей, сопровождавшие землетрясение 1929 г. на Большой Ньюфаундлендской банке, произошли примерно в конце большого трога, выходящего из залива Кабота (см. фиг. 9). Вскоре после этого землетрясения геолог А. Кейс и сейсмолог Е. А. Ходжсон, работавшие в государственной обсерватории в Оттаве, независимо друг от друга высказали предположение, что разрывы кабелей произошли вдоль линий сбросов. Они предполагали, что именно этими сбросами было обусловлено раннее образование трога пролива Кабота. Однако сейчас ученые склонны объяснять эти разрывы кабелей внезап-

ным разжижением осадков, подводными оползнями или мутьевыми потоками.

Примерно в те годы, когда произошло землетрясение на Большой Ньюфаундлендской банке, я обнаружил необыкновенное сходство трога пролива Кабота с другими ледниковыми трогами и надеялся найти доказательства оледенения в проливе Кабота. Направившись к северу от Бостона на яхте, мы подошли через несколько дней к посту Береговой службы у южной оконечности острова Сент-Поль, находящегося в середине пролива Кабота. Было уже темно, и мы попытались найти кого-нибудь, кто бы помог нам войти в бухту. Какой-то подвыпивший канадец вышел на шлюпке и провел нас мимо ревущих бурунов. На следующее утро мы увидели, что окружены почти сплошным кольцом зазубренных скал. Нам удалось, однако, высадиться и пройти 4 мили вдоль острова к северо-востоку. Вблизи северного конца острова мы обнаружили ледниковые борозды, протягивающиеся, как я и ожидал, в желоб пролива Кабота. На другой день мы направились в Порт-о-Баск на Ньюфаундленде. Здесь также были найдены борозды, свидетельствовавшие о движении льда через пролив. Я окончательно убедился, что желоб пролива Кабота — прекрасный пример формы, созданной ледниковой эрозией.

В образовании рельефа шельфов областей древнего оледенения большую роль сыграли ледниковые отложения. Богатые рыбой банки у берегов Новой Англии (см. фиг. 32) сложены в основном ледниковыми отложениями. Эти банки большей частью вытянуты параллельно берегу и являются, по-видимому, ледниковыми моренами. Такие морены образуются на краю материковых ледников либо за счет длительного накопления ледниково-обломочного материала, либо материала, выносимого подледными потоками. Эти формы несколько отличаются от округлых холмов ледниковых морен на суше. Однако это не удивительно. В самом деле, приливные течения должны были преобразовывать морены на поверхности шельфа. При этом получались гряды, вытянутые в направлении основного потока воды. Например, мощные течения на банке Джорджес вблизи Новой Англии обусловили простирания гряд с северо-запада на юго-восток.

В 1931 г. я участвовал в экспедиции Береговой и геодезической службы США, занимавшейся промером банки Джорджес. Однажды ночью мы стояли на якорю на песчаной отмели, и я взял там пробы донного грунта — это был песок. Ночью разразился сильный, но длившийся всего несколько часов ураган. На следующий день, когда был поднят якорь, я собрал с якорных лап комки илистого грунта. Оказалось, что грунт этот довольно сильно насыщен песком и зернами гравия. Вместе с тем он был исключительно похож на типичную ледниковую

глину, наблюдаемую на суше. Вероятное объяснение этого может быть таким. Слой сплошного песка образовался вследствие его концентрации на дне при размыве глины сильными придонными течениями. Однако под слоем этого песка сохранилась настоящая ледниковая глина. Бурение, проведенное недавно перед сооружением двух радарных башен, расположенных сейчас на банке Джорджес, дало новые сведения еще для одного района этой банки. Песок, пройденный при бурении скважины, имел лишь небольшие прослой глины. Таким образом, в этом районе ледниковая глина, по-видимому, отсутствует. По мнению ученых Вудсхолского океанографического института, материал, обнаруженный при этом бурении, подобен осадкам, слагающим остров Лонг-Айленд. Они были отложены потоками, стекающими с фронтальной части материковых ледников. Если такие потоки существовали и на банке Джорджес, то это служит еще одним доказательством понижения уровня моря в тот период, когда огромные покровные ледники простирались на значительную часть материкового шельфа.

ШЕЛЬФЫ ДОЛЕДНИКОВОГО ВРЕМЕНИ

Выше было показано, какое важное значение для развития шельфов и создания их характерных особенностей имел ледниковый период. Образовались ли бы материковые шельфы, не будь ледникового периода? Вопрос, на который нелегко ответить! Можно утверждать, что ни одна из погруженных террас или затопленных дельт на шельфе не могла образоваться без понижения уровня океана в ледниковое время. В доледниковое время, возможно, должны были пройти миллионы лет, пока материковый шельф вырабатывался на поверхности материка под влиянием волн при одном и том же положении уровня океана¹. Расширению шельфов способствовало и погружение дельт. Аллювиальные равнины, возможно, также были опущены под уровень океана, и шельф занял обширные площади. Если такое погружение относительно плоских выровненных участков суши шло быстрее, чем нарастание вверх дельты, происходило образование новых шельфов.

¹ Уровень океана в то время располагался значительно выше современного, поскольку влага, скованная ныне в ледниках Антарктики и Гренландии, могла дать слой морской воды мощностью 200 футов. Мощность современного ледяного покрова хорошо определяется сейсмическим методом, путем взрыва зарядов взрывчатки и измерением времени прохождения волны до подошвы льда и обратно. Работы, проведенные в Антарктике за время, пока писалась эта книга, были осуществлены по программе Международного геофизического года. Они подтвердили возможность поднятия уровня океана на 200 футов, если бы льды Антарктики растаяли.

Шельфы, сформированные, таким образом, при одинаковом положении уровня океана, конечно, отличались бы от современных. Здесь преобладали бы обширные абразионные террасы, лежащие очень близко к уровню моря того времени. Они не были бы такими глубокими, как внешние части современных шельфов. Затопленные равнины и дельты покрывались бы тонкозернистыми осадками на всем пространстве, за исключением береговой зоны. Неоднородность осадков шельфа, наблюдаемая ныне почти повсеместно, была бы при этом редким исключением.

Кроме того, в этих условиях шельфы, безусловно, могли не формироваться во многих районах, тогда как сейчас они распространены повсюду. Большие реки мира, несомненно, создали бы такие огромные дельты, что они полностью перекрыли бы прилегающие к ним шельфы. Между тем только одна Миссисипи построила такую дельту со времени последнего поднятия уровня океана. С другой стороны, менее крупные реки и в особенности реки, впадающие в моря с сильными прибрежными течениями, не могли бы создать сколько-нибудь заметные дельты, выдвинутые в пределы шельфа.

Если бы в четвертичное время не было ледникового периода, то мировая торговля сегодня была бы затруднена из-за отсутствия закрытых портов, расположенных в затопленных заливах, между тем сейчас они развиты почти на двух третях побережий земного шара. Материковые шельфы составляли бы лишь небольшую часть современных отмелей. Мелководные абразионные террасы мешали бы мореплаванию. Обширные пространства шельфов, глубины которых предупреждают мореплавателя о приближении к опасности задолго до подхода к берегу, были бы очень редкими. Нам явно повезло, что в прошлом был ледниковый период!

БУДУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы говорили здесь главным образом о современном рельефе и донных осадках материковых шельфов. Природа структур, подстилающих шельфы, составляет другую проблему, так же как и вопрос о происхождении резко выраженного края шельфа на границе с материковым склоном. Неясно также, почему, например, шельф вблизи северной Флориды такой узкий, а вблизи Майами вообще исчезает? Ответы на эти вопросы потребуют от нас знакомства с материковыми склонами. С ними-то нам и предстоит встретиться в следующей главе.

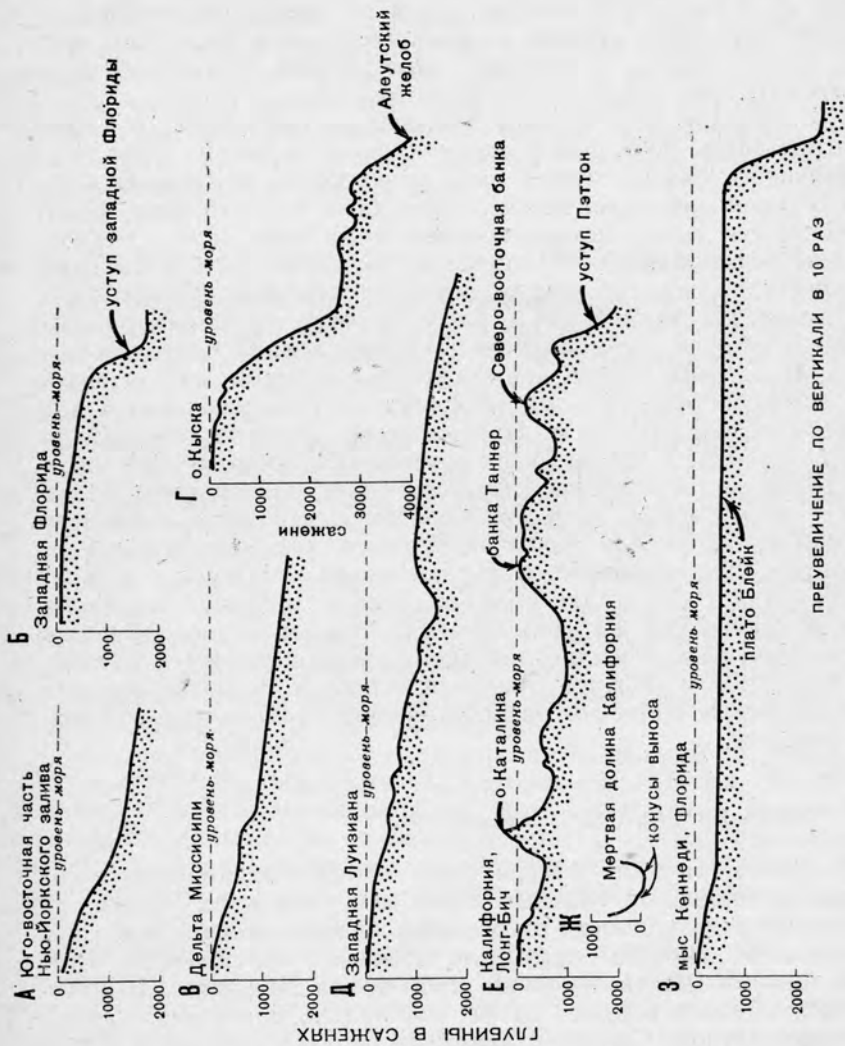
ВЕЛИЧАЙШИЕ СКЛОНЫ ЗЕМЛИ

Представьте себе, что воды океанов исчезли. Что открылось бы нашему взору при взгляде на Землю с Луны? Нас обязательно поразили бы материковые склоны, спускающиеся к ложу океанов. Если когда-нибудь вам довелось любоваться видом неприступных Гималаев, открывающимся из Дарджилинга, вы можете представить нечто подобное в океане. И тем не менее склоны в Тихом океане еще более грандиозны. Уступ материкового склона вдоль западного побережья Южной Америки вместе с примыкающим к нему на суше склоном Анд достигает высоты 42 тысяч футов. Это вдвое превышает высоту южного склона Гималаев! А ведь эти высочайшие подводные склоны окружают материк со всех сторон, тогда как на суше протяженность склонов горных плато и хребтов значительно меньше.

Может быть, вы думаете, что материковые склоны, несмотря на их огромную высоту, не такие крутые, как горные? Совсем нет! Они и в этом не уступают им! Тогда, может быть, они не так сложно расчленены? Как бы не так! Вы бы посмотрели, сколько там каньонов!

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИКОВОГО СКЛОНА

Со стороны суши границу материкового склона определить нетрудно. Резкий перелом поверхности дна, ограничивающий материковый шельф, одновременно является и границей крутого материкового склона. Гораздо труднее определить его внешнюю границу, отделяющую материковый склон от океанского ложа. По окраинам Тихого океана крутизна материковых склонов почти не меняется сверху донизу, пока склоны не достигнут огромных глубин. В других местах крутая верхняя часть склона сменяется внизу пологим шельфом, простирающимся



ПРЕУВЕЛИЧЕНИЕ ПО ВЕРТИКАЛИ В 10 РАЗ

Ф и г. 45. Профили материковых склонов различного типа.

на десятки или даже сотни миль в глубоководные котловины океана (см. фиг. 1). Эта внешняя часть склона называется обычно материковым подножием, или материковым шлейфом, или конусом выноса. Она не только значительно положе, но и больше выровнена. Судя по всему, целесообразно, видимо, применять термин *материковый склон* лишь для крутых частей склона, а шлейфы (материковое подножие) рассматривать уже как часть океанского ложа.

Хотя материковые склоны большей частью обладают сложным рельефом, но в целом они наклонены к океану (фиг. 45). Поверхность склона может быть раздроблена на промежуточные ступени, представляющие собой либо террасы (фиг. 45,З), либо систему гряд и котловин между ними (фиг. 45,Е). Эти котловины расположены на меньших глубинах, чем котловины океанского ложа, но глубже котловин шельфов. Отделяющие их горные хребты или горы располагаются на самых различных глубинах и даже поднимаются над водной поверхностью, образуя острова. Такие промежуточные ступени, нарушающие непрерывную покатость материкового склона, называются материковым бордерлендом. Против этого термина, который я предложил еще в 1941 г., были возражения, но до сих пор никто не предложил какого-либо другого более подходящего названия, поэтому оно и было принято Международным комитетом по номенклатуре для форм подводного рельефа. Нельзя не признать, что сочетание слов континент (материк) и ленд (суша) для столь удаленного от берега объекта не вполне удачно. Точно так же граждане США, называющие себя американцами, явно обижают тем своих южных соседей — жителей Центральной и Южной Америки. Однако оба эти термина уже получили широкое распространение и в какой-то мере оправданны.

ТИПЫ МАТЕРИКОВЫХ СКЛОНОВ

Подобно тому как материковые отмели бывают нескольких типов, материковые склоны также могут быть разделены на категории в зависимости от рельефа. Однако все примеры, как вы увидите, выбраны нами для склонов, окружающих либо Соединенные Штаты Америки, либо принадлежащие США территории. Дело в том, что до сих пор только Береговая и геодезическая служба США составила достаточно подробные карты материковых склонов¹. Именно эти карты дают трехмерное

¹ В настоящее время многими странами проведены детальные исследования рельефа материковых склонов. В частности, можно указать на детальные батиметрические карты материкового склона вдоль западного побережья Европы, составленные французскими гидрографами.— *Прим. ред.*

представление о рельефе склонов, основывающееся на профилях, которые пересекают склоны вкрест и по простираанию. В других же местах, за исключением нескольких очень небольших участков, мы располагаем лишь отдельными профилями, обычно проложенными поперек склона. Вдоль всех побережий США материковые склоны изучены уже достаточно хорошо, по крайней мере до глубины 1000 саженей, а во многих местах съемки охватили значительно большие глубины. В связи с потребностями военно-морского флота глубоководный промер продолжили на север до Аляски; особенно подробным он был в районе Алеутской островной дуги.

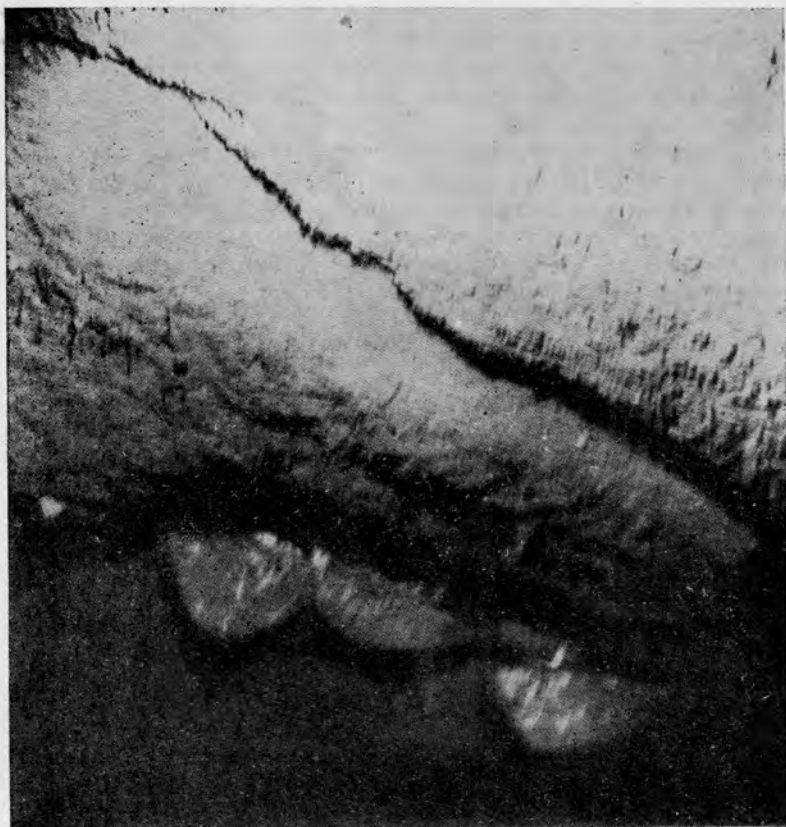
Прорезанные каньонами склоны Северо-Запада США

Представьте себе, что уровень океана понизился на милю. Жители одного из наиболее населенных районов страны, протягивающегося от Нью-Йорка до Вашингтона, обнаружили бы тогда, что самые живописные места для их летних путешествий находятся совсем не в Аппалачах и не в горах Адирондак, а на материковом склоне. В самом деле, эти живописнейшие места, доступные обозрению из иллюминаторов батискафа лишь немногим избранным, находятся совсем недалеко, всего в 80 милях к востоку от Атлантик-Сити и в 100 милях к востоку от Нью-Йорка.

Вдоль северо-восточного побережья США материковый склон имеет сравнительно небольшую крутизну, в среднем 4—7°. Но в него врезаны живописные каньоны (см. фиг. 31). Самые глубокие из них достигают 2—4 тысяч футов. Для сравнения напомним, что глубина крупнейших каньонов в Аппалачах не превышает 2 тысяч футов.

Весь этот материковый склон изрезан каньонами по крайней мере до глубины 1000 саженей. Глубже мы пока еще не располагаем подробными промерами. Около пятидесяти каньонов начинаются прямо на материковой отмели. Среди них выделяется каньон Гудзон, очевидно непосредственное продолжение неглубокой долины шельфа, протягивающегося вблизи Нью-Йорка.

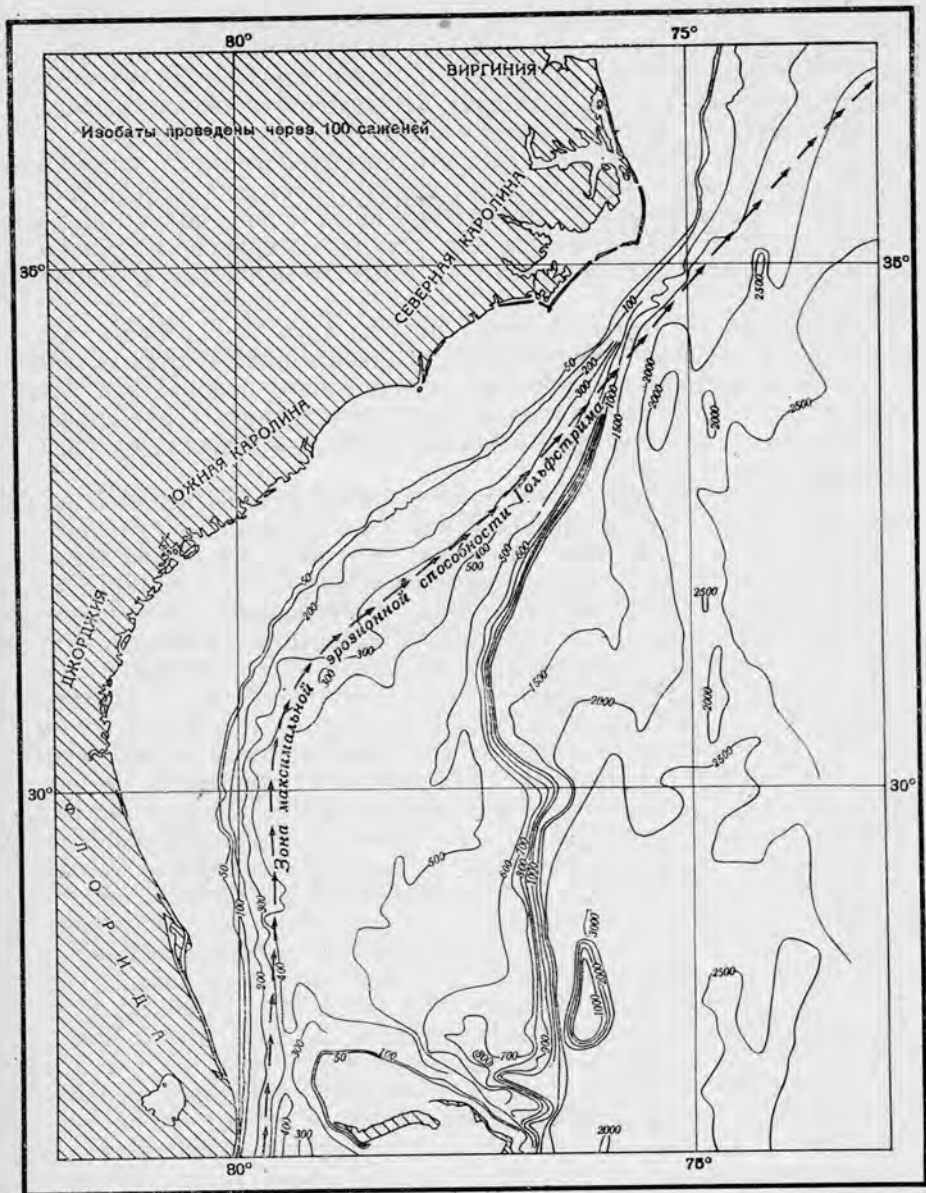
Материковые склоны вдоль северо-восточного побережья Соединенных Штатов покрыты в основном илом. Однако во многих местах он образует лишь очень тонкий слой, и на склонах каньонов обнажаются коренные породы. Это характерно для берегов Новой Англии. В одном месте фотография коренных пород была получена на склоне, где каньона вообще не было (фиг. 46). Образцы коренных пород из стенок каньонов и с поверхности материкового склона содержат ископаемую фауну, позволяющую судить о их возрасте. Все они очень древние: от миоцена до мела.



Фиг. 46. Обнажение эоценовых формаций на материковом склоне к югу от берегов Новой Англии.

*Террасированный склон к югу от мыса Гаттерас
и роль Гольфстрима*

На материковом склоне к югу от мыса Гаттерас можно наблюдать любопытные явления (фиг. 47). Если провести линию вдоль внешнего края шельфа, к северу от этого мыса, то южное продолжение ее пройдет рядом с крутым уступом материкового склона к югу от мыса Гаттерас. В то же время внешний край шельфа к югу от мыса уходит к западу. Благодаря этому между краем шельфа и внешним уступом материкового склона к югу от мыса Гаттерас расположена широкая подводная терраса, известная под названием плато Блейк (фиг. 45,3). Название дано в честь американского гидрографического судна «Блейк», впервые исследовавшего это плато в 1878 г. Глубины



Фиг. 47. Подводное плато Блейк, лежащее между материковой отмелью и внешним уступом материкового склона. Обратите внимание, что ось течения Гольфстрим проходит по материковой отмели.

его 400—600 саженей. Плато достаточно плоское, но к шельфу его все же отнести нельзя, так как оно расположено на слишком большой глубине. Поверхность плато изучена еще недостаточно. Однако работы Стетсона (Вудсхолский океанографический институт) на судне «Атлантис» и работы ламонтской группы на судне «Вима» показали, что поверхность плато сложена коренными породами. Все попытки взять колонки грунта оказались безуспешными. Образцы коренных пород, полученные с края плато и окаймляющего его уступа материкового склона, ученые Ламонтской обсерватории считают меловыми и миоценовыми.

К северу от мыса Гаттерас породы того же возраста погребены под толщей современных осадков и обнажаются только в стенках каньонов и обрывах материкового склона. Все это выглядит так, будто огромный нож срезал пласт современных осадков от края шельфа до изобаты 500 м, обнажив коренные породы плато Блейк.

Можно предложить несколько вариантов объяснения образования плато Блейк. Внешняя часть шельфа могла быть опущена в виде огромной глыбы ниже обычного уровня в результате сброса. Однако это маловероятно, поскольку с внутренней стороны плато нет крутого уступа, характерного для сброса; кроме того, на плато не обнаружено опущенных вместе с глыбой мелководных шельфовых отложений. Далее можно предположить, что Гольфстрим срезал внешнюю часть шельфа южнее мыса Гаттерас. Скорость Гольфстрима над плато Блейк равна на поверхности 6 узлам; это самая высокая в мире скорость, зарегистрированная для течения открытого океана. Основная ось течения постоянно меняет свое положение, но она всегда располагается близко к внутреннему краю плато и, следовательно, краю шельфа. Если бы плато было срезано Гольфстримом, то поверхность его должна была бы быть более неровной. В самом деле, ведь размыв осадочного покрова происходил бы в основном вдоль оси течения, а при этом возникали бы глубокие котловины, подобные промоинам приливных течений. Кроме того, существование в прошлом шельфа между Флоридой и Багамскими островами нашло бы свое отражение в общности их фауны, чего на самом деле нет.

Вероятнее всего, что где-то в начале третичного периода Гольфстрим впервые начал свое движение через Флоридский пролив, и тем самым сразу же было приостановлено активное осадконакопление на шельфе в районе южнее мыса Гаттерас. Исключение представляла лишь прибрежная часть. В результате медленного погружения, охватившего восточную окраину материка и происходившего как к югу, так и к северу от мыса Гаттерас, древний шельф опускался все ниже и ниже. Однако южнее мыса Гаттерас осадконакопление не могло уже компен-

сировать опускание и создать новый аккумулятивный шельф. Следовательно, здесь можно наблюдать не что иное, как опущенный древний шельф. Возможно, что в какой-то мере он был эродирован Гольфстримом, но сохранился он, конечно, потому, что прекратилось осадконакопление. Точно так же можно объяснить отсутствие шельфа к югу от Флориды.

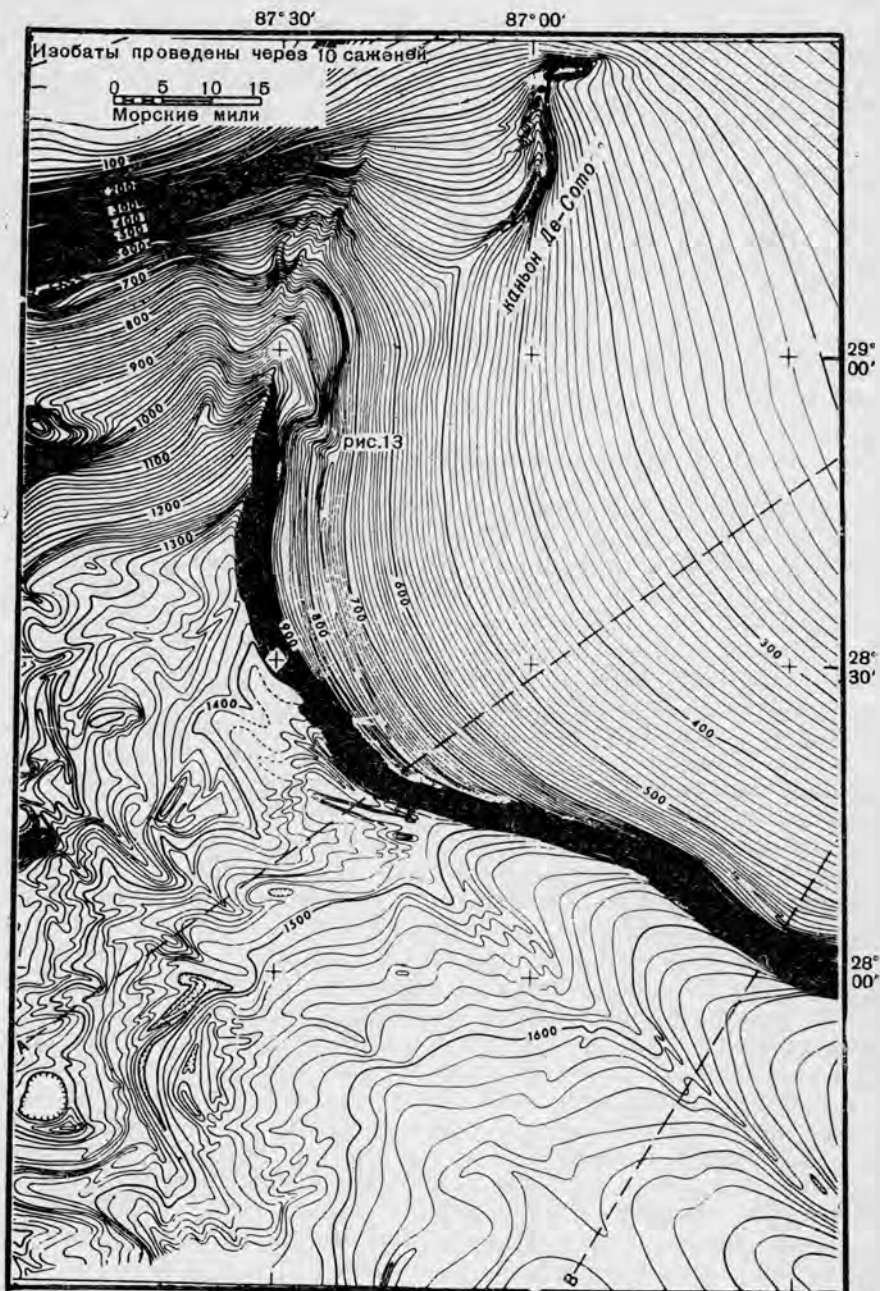
Уступ с внешней стороны плато Блейк значительно круче, чем верхний уступ материкового склона к северу от него. Результаты промера позволяют говорить о крутизне этого склона порядка 15° , но здесь могут быть и обрывы. Дело в том, что на таких больших глубинах довольно трудно определить точные углы наклона. Исследователи говорят, что уступ плато Блейк изрезан подводными каньонами, но это еще не показано на картах.

Великий сброс западной Флориды

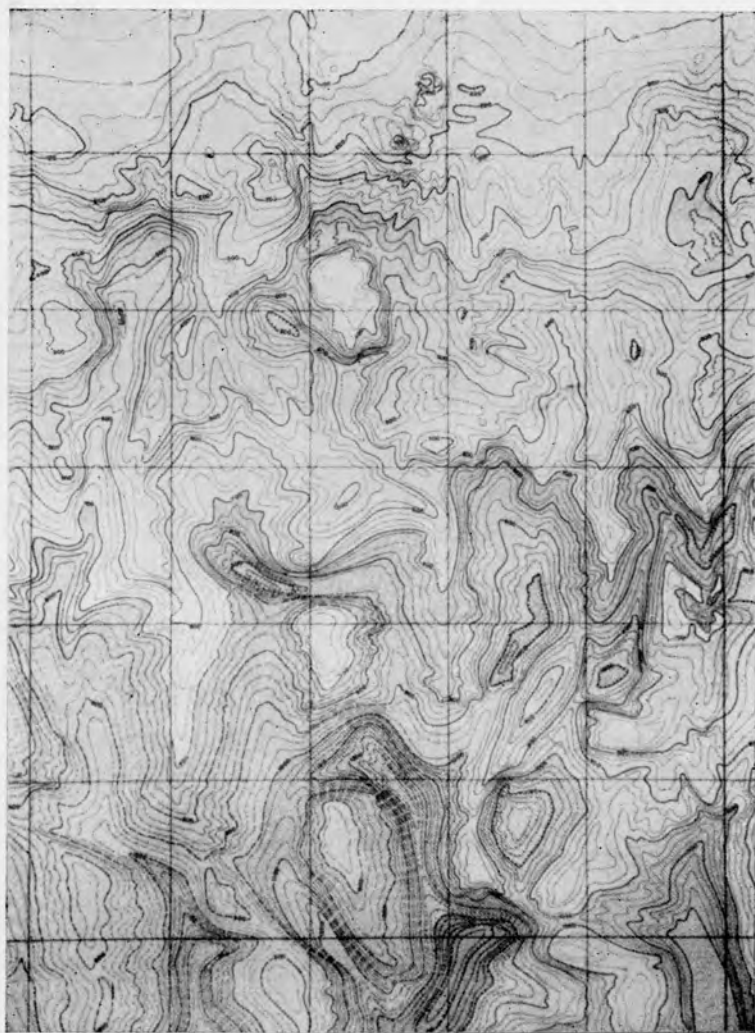
Попробуйте спросить у наземных геологов, в каких районах материкового склона вероятнее всего сбросовые уступы, подобные сбросу восточного склона Сьерры-Невады. Они, вероятно, никогда не предположили бы, что один из таких сбросов находится у берегов западной Флориды. В самом деле, ведь здесь не было зарегистрировано ни одного землетрясения, да и соседние районы суши совершенно стабильны. Однако Береговая и геодезическая служба США обнаружила здесь один из самых крутых и прямолинейных уступов дна Мирового океана. Протяженность его около 500 миль (фиг. 48; фиг. 45,Б). Уклон дна достигает 1 мили на протяжении менее 2 миль. На земле найдется очень немного мест, где бы плато, подобное подводному плато западного склона Флориды, было окаймлено таким крутым уступом. Насколько мне известно, в Мировом океане только один сбросовый уступ превосходит западнофлоридский по крутизне — это огромный уступ желоба Бартлетт в Сант-Яго (Куба), падающий до глубины 20 тысяч футов. Крутизна его 45° , или 1 миля на 1 милю расстояния. Уступ у западной Флориды имеет довольно ровную поверхность. Большая часть его на всем протяжении 500 миль не нарушается ни одной сколько-нибудь заметной долиной, и только на юге самая нижняя часть уступа прорезана долинами. Дно этих долин глубже дна Мексиканского залива, примыкающего к подножию уступа.

Огромный подводный уступ западной Флориды нигде не граничит с краем шельфа; чаще всего он начинается с глубин 500—800 саженей. Расположенная выше часть материкового склона весьма полого. В некоторых местах ее уклон менее 1° , то есть почти такой же, как примыкающего к ней шельфа.

Почти не предпринимались попытки получить образцы с уступа. Драгой было поднято с него сотрудниками Вудсхолско-



Фиг. 48. Необычайно крутой уступ обнаруженный в нижней части очень пологого материкового склона близ западного побережья Флориды.



Фиг. 49. Котловины и холмы на пологом склоне вблизи западной Луизианы.

го океанографического института лишь несколько обломков коренных пород. Кроме того, Стетсону удалось сфотографировать поверхность уступа на глубине 1100 саженей. На снимке видны детали сложно расчлененного рельефа, который исследователи когда-нибудь смогут рассмотреть подробнее через иллюминаторы батискафа.

Расчлененные котловинами и холмами склоны Техаса и Луизианы

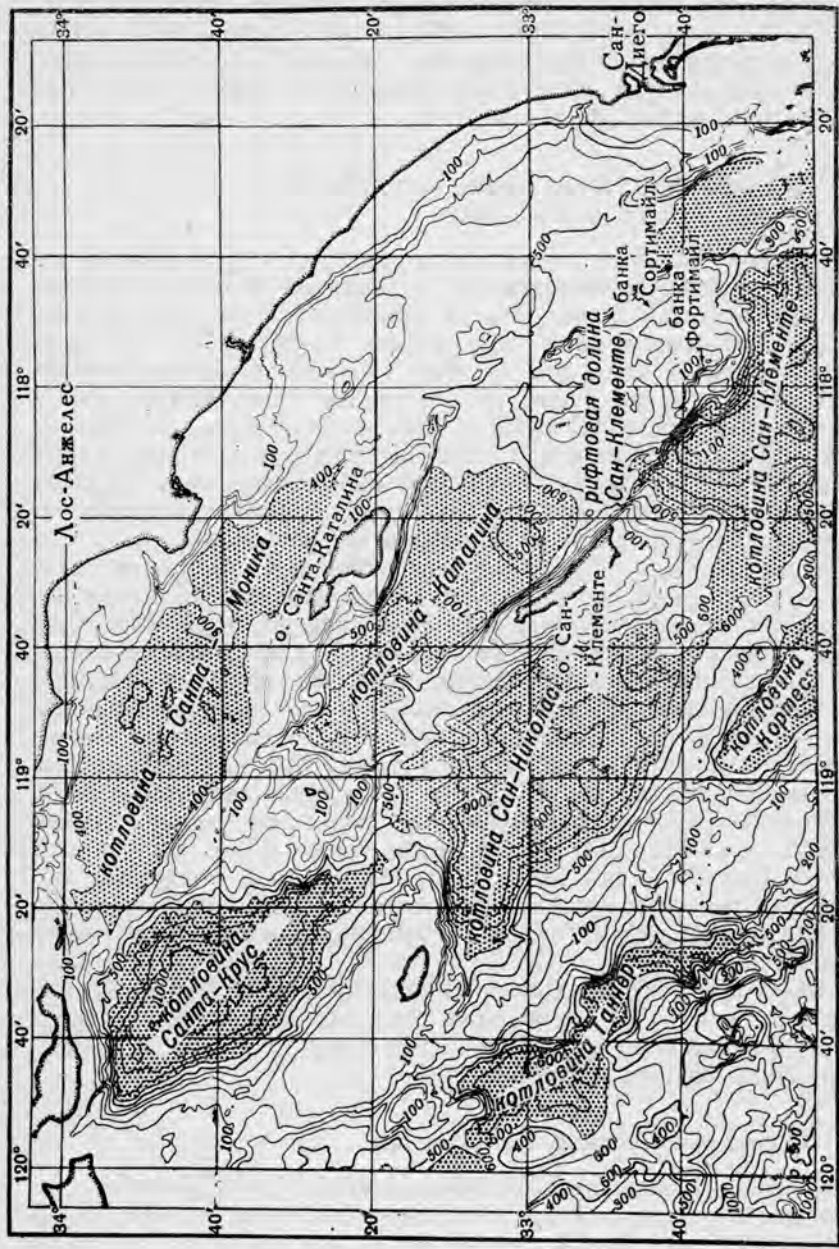
К северо-западу от флоридского сброса склон становится пологим и ровным, подобно склону у западной Флориды. Однако к западу от устья Миссисипи он приобретает уже другой вид. Здесь наблюдается множество холмов и вытянутых котловин неправильной формы (фиг. 49; фиг. 45, Д). Если бы эта поверхность оказалась на суше, то котловины превратились бы в озера глубиной до 1500 футов и длиной до 30 миль. Котловины вытянуты в основном в направлении склона и на продолжении прорезающих его долин. Создается впечатление, что когда-то весь склон, по-видимому, был рассечен долинами, которые затем были перегорожены и разделены на котловины.

Геолог Б. Гили, изучавшая этот район и составившая батиметрическую карту его, считает, что котловины образовались благодаря подводным оползням. Это, конечно, возможно, хотя склоны здесь слишком пологи (около 1°) для развития оползней и обширных котловин. Кроме того, мы не знаем еще случая, чтобы подводные каньоны, столь широко распространенные вдоль материковых склонов, были бы перегорожены таким образом. Мы не наблюдаем этого даже там, где материковые склоны значительно круче. Другое объяснение сводится к тому, что соляные купола, обнаруженные ранее на внешней части шельфа (см. фиг. 36), развиваются также и на материковом склоне. При этом они могут перегораживать и подводные долины. Во всяком случае, холмы, обнаруженные на значительной глубине на склоне, очень похожи на холмы внешней части шельфа.

Поверхность материкового склона Техаса и Луизианы выравнивается близ его основания, хотя области котловин могут быть ограничены небольшими сбросовыми уступами, и только ниже склон выравнивается.

Бордерленд южной Калифорнии

За узким и неровным шельфом южной Калифорнии со стороны океана расположена обширная (шириной до 150 миль) область, рельеф которой похож на рельеф прилегающей суши. Многочисленные хребты разделяют здесь котловины (фиг. 50;



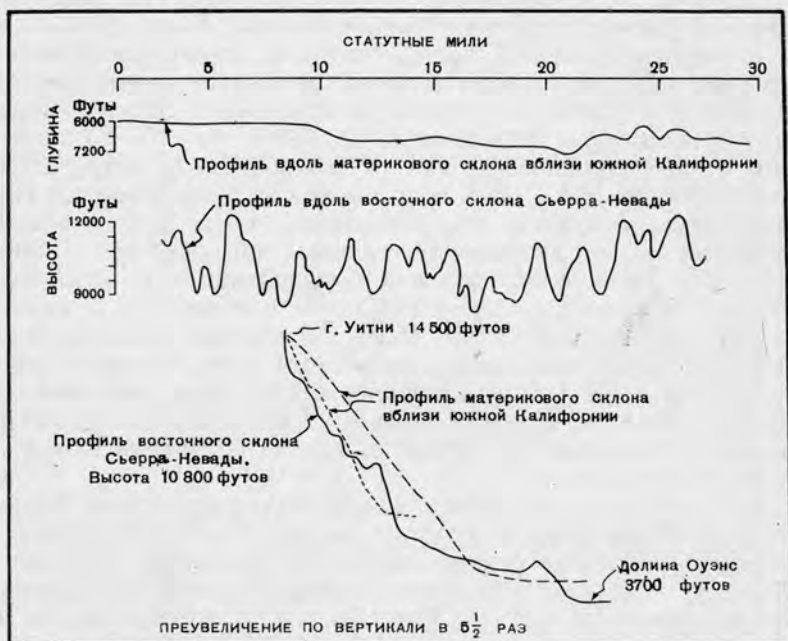
Ф и г. 50. Континентальный бордерленд у берегов южной Калифорнии. Изобаты приведены через 100 саженей. Котловины показаны точками.

фиг. 45,Е). Эта область получила название материкового бордерленда. Горы бордерленда поднимаются над дном окружающих котловин на высоту до 8 тысяч футов, а на островах Санта-Каталина, Сан-Клементе и Санта-Крус — еще выше, почти на 2 тысячи футов над уровнем моря. Глубина отдельных котловин — 9 тысяч футов над уровнем океана. Если эти котловины заполнить дождевой водой, глубина таких пресноводных озер достигала бы 4 тысяч саженей. Это вдвое превышает глубины самого глубокого озера Соединенных Штатов (озеро Крейтер, штат Орегон). Ширина их была бы 10—20 миль, а длина самого большого из них (к юго-востоку от острова Сан-Клементе) — 80 миль. Ну а если бы дожди были слишком скудными, чтобы заполнить эти котловины, тогда они стали бы похожи на такие пустынные впадины, как Мертвая Долина. Впрочем, у подводных котловин бордерленда есть одна отличительная особенность: дно у них более плоское, чем у межгорных котловин на суше (фиг. 45,Ж). В чем же причина такого различия? На суше аллювий, смываемый с гор, образует огромные конусы выноса, поднимающиеся над дном котловин. На морском дне такие конусы почти сливаются с равниной дна котловин. По-видимому, морские осадки распределяются по дну более равномерно.

Есть еще одно различие между калифорнийским бордерлендом и котловинами и хребтами суши. Количество каньонов, прорезающих крутые склоны подводных котловин, значительно меньше, чем на суше. Сюда нельзя отнести район Сан-Диего и район к северу от острова Сан-Николас. Несмотря на то что крутизна уступа внешнего края бордерленда и восточного склона Сьерры-Невады одинаковая, поперечное расчленение его, конечно, намного проще (фиг. 51).

Не вызывает сомнений сбросовое происхождение уступа бордерленда вблизи южной Калифорнии, подобное сбросам хребтов на прилегающей суше. Это сбросовые уступы, хотя и преобразованные затем эрозией. У основания уступов можно видеть вытянутые депрессии, точно такие же, как и на суше. Однако на суше они вскоре заполняются материалом, сносимым водой со склонов гор. В подводных же условиях у депрессий больше возможностей сохраниться незаполненными. Предполагают, что рифтовые долины вдоль разлома Сан-Андреас в южной Калифорнии произошли в результате горизонтального сдвига, сопровождавшегося также разрывами. Рифтовая долина подобного типа обнаружена к юго-востоку от острова Сан-Клементе (см. фиг. 50). Создается впечатление, что банка Фортимайл была оторвана от этого острова в результате горизонтального сдвига большой амплитуды, происшедшего вдоль линии сброса. В самом деле, вполне возможно, что обе банки — Фортимайл и Сортимайл — были сдвинуты к юго-востоку

в виде блока, вырванного между островами Санта-Каталина и Сан-Клементе. Это, конечно, только гипотеза, основанная на морфологии банок и уступов. Геологическими данными она пока еще не подтверждена.



Фиг. 51. Сопоставление профилей восточного склона Сьерры-Невады и уступа Паттон у внешнего края материкового бордерленда южной Калифорнии.

Сдвинутый к западу материковый склон

После сильного землетрясения в Сан-Франциско геологи были чрезвычайно удивлены тем, что вызвавший катастрофу сдвиг вдоль разлома Сан-Андреас произошел в горизонтальном направлении. Дороги и заборы были сдвинуты вдоль этого разлома на расстояние до 20 футов без всякого вертикального смещения. Этот сдвиг был прослежен почти по всей Калифорнии. Время от времени вдоль этого разлома вновь происходили землетрясения, и каждое, насколько можно определить, вызывало горизонтальный сдвиг такого же типа. При этом западное крыло зоны разлома смещалось к северу. Еще самые ранние исследования разлома Сан-Андреас привели к убеждению, что в течение длительного периода вдоль него имело место горизонтальное смещение большой амплитуды такого же

характера, как наблюдавшееся в Сан-Франциско. Долгие годы представление о грандиозном горизонтальном сдвиге вдоль этого разлома отвергалось многими видными калифорнийскими геологами. Лишь совсем недавно многочисленные тщательные исследования, по-видимому, рассеяли наконец эти сомнения. Теперь стало ясно, что горизонтальные сдвиги действительно имели огромную амплитуду, так что все горные хребты оказались смещенными¹.

За исключением таких объектов, как русла рек и дороги, признаки значительного горизонтального смещения на ровной поверхности суши почти не видны. В то же время смещение в пределах склонов отмечается довольно четко. Мне кажется по этому, что в северной Калифорнии, где разлом Сан-Андреас уходит в море, основные смещения происходили именно на материковом склоне. Такое предположение подтверждается особенностями подводного рельефа, обнаруженными вблизи мысов Мендосино и Горда — самых западных мысов побережья США (фиг. 52). Батиметрическая карта ориентированного в широтном направлении уступа Горда указывает на возможное смещение всей области склона с южной стороны этого уступа. Амплитуда смещения внешней части склона составляет около 40 миль².

Когда впервые было высказано предположение, что этот уступ, возможно, является продолжением разлома Сан-Андреас, сейсмологи возражали против него. Они ссылались на то, что землетрясения в северной Калифорнии происходят совсем в других местах. Однако позднее более тщательный анализ данных о землетрясениях этого района, выполненный калифорнийскими сейсмологами, в корне изменил прежние представления (см. фиг. 52). Кроме того, на шельфе были обнаружены трещины или небольшие рифтовые долины, располагающиеся по диагонали к уступу Горда и напоминающие рифтовые долины вдоль разлома Сан-Андреас на суше. Интересно, что находящийся к югу от уступа подводный каньон, по-видимому, отмечается разломом, и если бы его можно было продолжить к суше, то он попал бы не к какой-нибудь наземной долине, а к ровному склону гор. Следовательно, разлом Сан-Андреас здесь изгибается к западу. Впрочем, далее к северу, он, по-видимому, вновь поворачивает к северу и идет вдоль оси главного линеймента. Расположение эпицентров подводных землетрясений подтверждает такое предположение.

¹ Многие американские геологи продолжают отрицать сколько-нибудь значительные горизонтальные перемещения по сбросу Сан-Андреас.—Прим. ред.

² В. Вакье (Скриппсовский институт) сообщил недавно, что магнитные аномалии также указывают на горизонтальные смещения на дне океана вблизи берегов Калифорнии. Амплитуда таких сдвигов, по его данным, достигает 150 миль.

Расчлененные склоны Алеутской гряды

Многочисленные съемки вокруг Алеутских островов позволили установить интересные формы рельефа подводных склонов. К югу от островов склоны спускаются к Алеутскому желобу, глубина которого более 4 тысяч саженей. Вблизи берега склоны расчленены многочисленными долинами. Однако эти долины не относятся к типу затопленных речных каньонов, которые были обнаружены как у северо-восточного, так и частично у западного побережья Соединенных Штатов. В отличие от затопленных речных каньонов эти долины имеют троогообразную форму. Поперечный профиль их больше похож на профиль котловин калифорнийского бордерленда (фиг. 53). Крутые склоны их свидетельствуют о сбросовом происхождении. Расположены они по диагонали к основному падению склона, чего не наблюдается у речных долин. Кроме того, нижние части этих долин имеют очень небольшой наклон и заканчиваются террасами, располагающимися на глубине 1800—2600 саженей.

К югу от этих террас расположен крутой уступ, спускающийся к дну Алеутского желоба (см. фиг. 45, Г). Судя по данным промера, наклон этого внешнего уступа не превышает 15° , так что он не столь крутой, как уступ у берегов западной Флориды. Кроме того, он высоко сейсмичен. Сильные землетрясения, происходящие здесь, свидетельствуют об активных современных движениях по сбросам. Этот район — один из самых мощных очагов цунами во всем мире.

С северной стороны островов уступ (северный островной склон) гораздо круче, чем со стороны Алеутского желоба. Отдельные участки его к северу от острова Атту наклонены под углом 25° . Их можно сравнить с уступом западной Флориды. Северный Алеутский уступ простирается от островного шельфа до дна котловины Берингова моря непрерывно, без террас или каких-либо других нарушений.

Увеличение углов наклона в нижней части склона, наблюдающееся к югу от Алеутских островов, отмечается также и у других материковых склонов. Это можно видеть к востоку от Японии в Японском желобе, а также вблизи юго-восточной Австралии. Материковый склон Японии своими троогообразными долинами напоминает южный склон Алеутских островов.

За пределами территории Соединенных Штатов хорошо изученные материковые склоны расположены вблизи очень узких шельфов. В Средиземном море такие склоны, исследованные французами, характеризуются подводными каньонами, напоминающими хорошо разветвленную речную сеть, подобно каньонам вблизи восточного побережья США. Профессор Ж. Буркар (Сорбонна) и его сотрудники составили батимет-

рические карты для материкового склона в районе Французской Ривьеры. Карты эти показывают удивительно сложный рельеф. Материковые склоны Средиземного моря эродированы не меньше склонов типичных горных хребтов суши. Например, западный подводный склон острова Корсика исключительно похож на горные склоны самого острова (см. фиг. 65). Не менее расчленены восточные подводные склоны острова Тайвань и Кореи и западные и северные подводные склоны острова Лусон в Филиппинской островной дуге.

Необходимо отметить, что лишь на немногих профилях, проложенных вдоль материковых склонов, были обнаружены относительно ровные поверхности. Однако выровненные склоны встречаются очень редко, хотя, как нам казалось, за длительную геологическую историю океанов осадконакопление должно было бы их выровнять.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О МАТЕРИКОВЫХ СКЛОНАХ

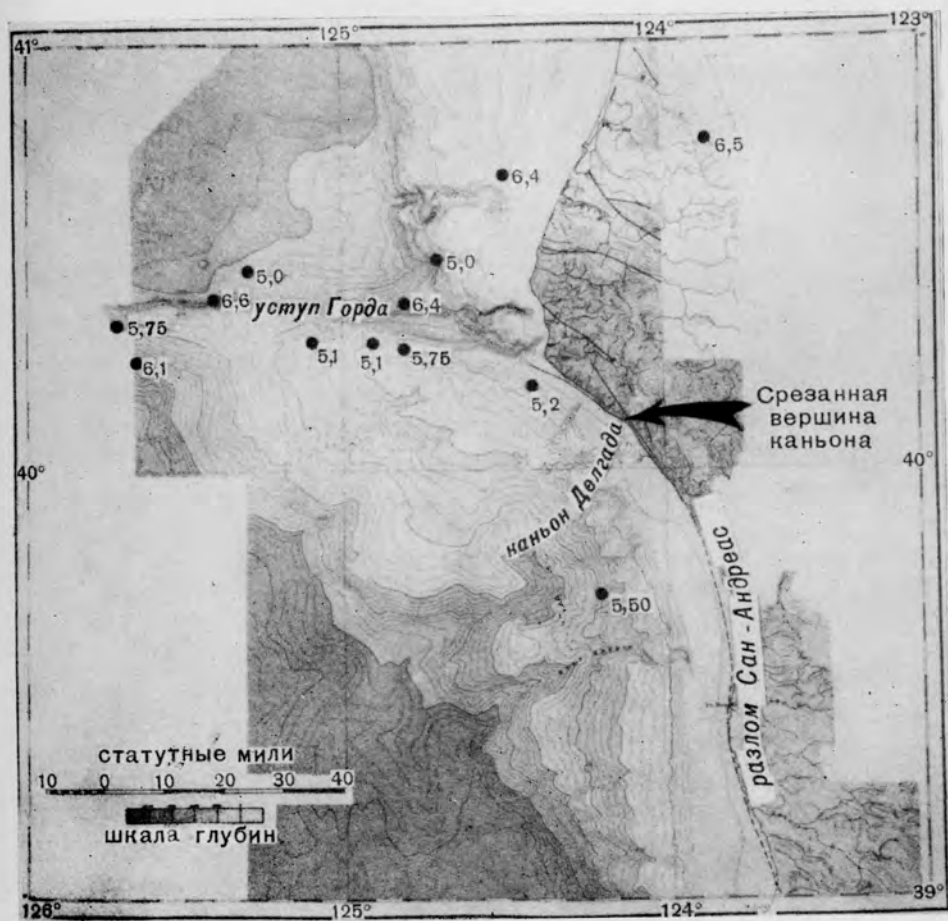
Средний угол наклона материкового склона от края шельфа до глубины 1 тысячи саженей составляет $4^{\circ}07'$. Большинство профилей, полученных при промере, показывает неровные склоны с какими-то депрессиями. Судя по результатам подробного промера вблизи берегов США, эти депрессии представляют собой либо долины, либо котловины. Наиболее пологие склоны расположены вблизи устьев больших рек, особенно с развитыми дельтами. Здесь средний наклон всего $1^{\circ}20'$, в то время как вблизи сбросовых побережий средний угол наклона достигает $5^{\circ}40'$. Впрочем, некоторые наиболее крутые материковые склоны обнаружены вблизи тех районов суши, где нет никаких признаков современной сбросов или иных тектонических движений. Таковы, например, огромный уступ у западных берегов Флориды, крутой склон вблизи горного побережья Бразилии, склоны Багамских островов, материковый склон юго-западной Австралии, склоны Цейлона. По окраинам Тихого океана материковые склоны в среднем круче склонов Атлантического и Индийского океанов; их углы наклона соответственно $5^{\circ}20'$, $3^{\circ}05'$ и $2^{\circ}55'$. У средиземноморских склонов угол наклона равен $3^{\circ}34'$.

Осадки материковых склонов, известные главным образом по навигационным картам, представлены примерно на 60% илами и на 25% песком. Обнажения коренных пород и гравий составляют около 10%. Остальное приходится на ракушечник и карбонатный ил. Такое распределение осадков резко отличается от знакомого нам по шельфам, где песка значительно больше, чем ила, хотя процентные соотношения коренных пород и гравия примерно такие же.

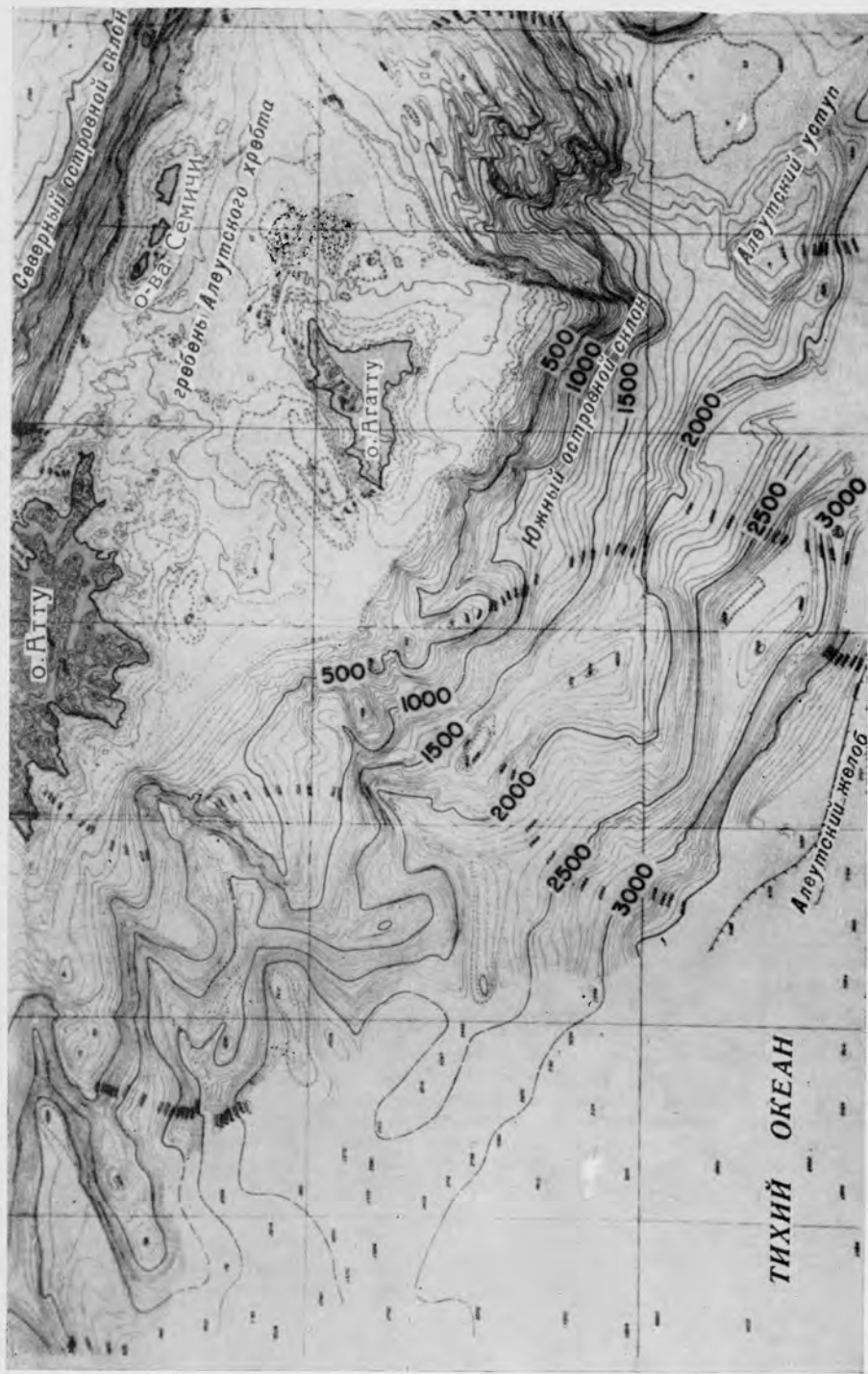
Во Франции для материкового склона применяется термин талю континенталь (материковая осыпь). Этот термин отражает представление о материковых склонах, как об огромных осыпях осадочного материала, сваливаемого за пределы шельфа. Это представление кажется нам столь же ошибочным, как и идея об образном и аккумулятивном происхождении шельфа (см. гл. 5). Конечно, около таких крупных дельт, как дельта Нигера (см. фиг. 34), материковый склон, по-видимому, действительно был сформирован осадками, выносимыми реками. Мы знаем также из сравнения старинных и новейших карт, что пологий материковый склон около южного устья дельты Миссисипи выдвигается со скоростью 200 футов в год. Уклон аккумулятивных склонов невелик, всего около $1/2^\circ$ (см. фиг. 45, В). Он значительно меньше наклона других более типичных склонов. Кроме того, материковые склоны расчленены многочисленными уступами и местами крутизна их с глубиной возрастает. Этого никак нельзя было бы ожидать, если бы они были образованы осыпями или представляли собой конусы выноса осадочного материала. Сведения о том, что 10% поверхности материковых склонов составляют выходы коренных пород и гравий, также противоречат предположениям об их аккумулятивном происхождении.

В образовании материковых склонов первоначально, скорее всего, были повинны сбросы. Многие из них, возможно, не были обновлены позднейшими тектоническими движениями. Тектоническое происхождение материковых склонов подтверждается наличием многочисленных уступов, очень напоминающих сбросовые уступы на суше. Открытие желобов вдоль основания материковых склонов (что особенно часто наблюдается в Тихом океане) еще раз подтверждает сбросовое происхождение склонов. В самом деле, подобные депрессии не могли бы длительно существовать у подножия аккумулятивного склона, так как вскоре были бы заполнены осадками. Землетрясения, происходящие на материковых склонах или вблизи них, также говорят в пользу этой гипотезы. В Атлантическом океане одно из сильнейших за всю историю землетрясений произошло именно на материковом склоне к югу от Ньюфаундленда. Мы уже упоминали, что оно вызвало многочисленные разрывы телеграфных кабелей. И наконец, простирающиеся материковые склоны и структур на суше не одинаково. Это очень четко выражено в Калифорнии, к югу от мыса Кармел, где горные хребты суши подходят к берегу под углом и обрезаются подводным уступом.

К счастью для жителей береговых районов, большая часть подводных сбросовых уступов сейчас неактивна. Представьте себе, например, что сейчас ожил бы сброс вдоль грандиозного



Фиг. 52. Горизонтальные смещения, выраженные в подводном рельефе у берегов северной Калифорнии. Разлом Сан-Андреас изгибается здесь в сторону океана. Предполагается, что уступ Горда образовался в результате горизонтального сдвига в сторону океана блока, расположенного к югу от этого уступа. Точками обозначены эпицентры землетрясений, а цифры возле них указывают интенсивность землетрясений в баллах по шкале Рихтера. Интенсивность землетрясений по этой шкале соответствует степени разрушительного воздействия на структуры. Следует отметить, что наиболее сильные землетрясения (6 баллов и выше) сконцентрированы вдоль разлома.



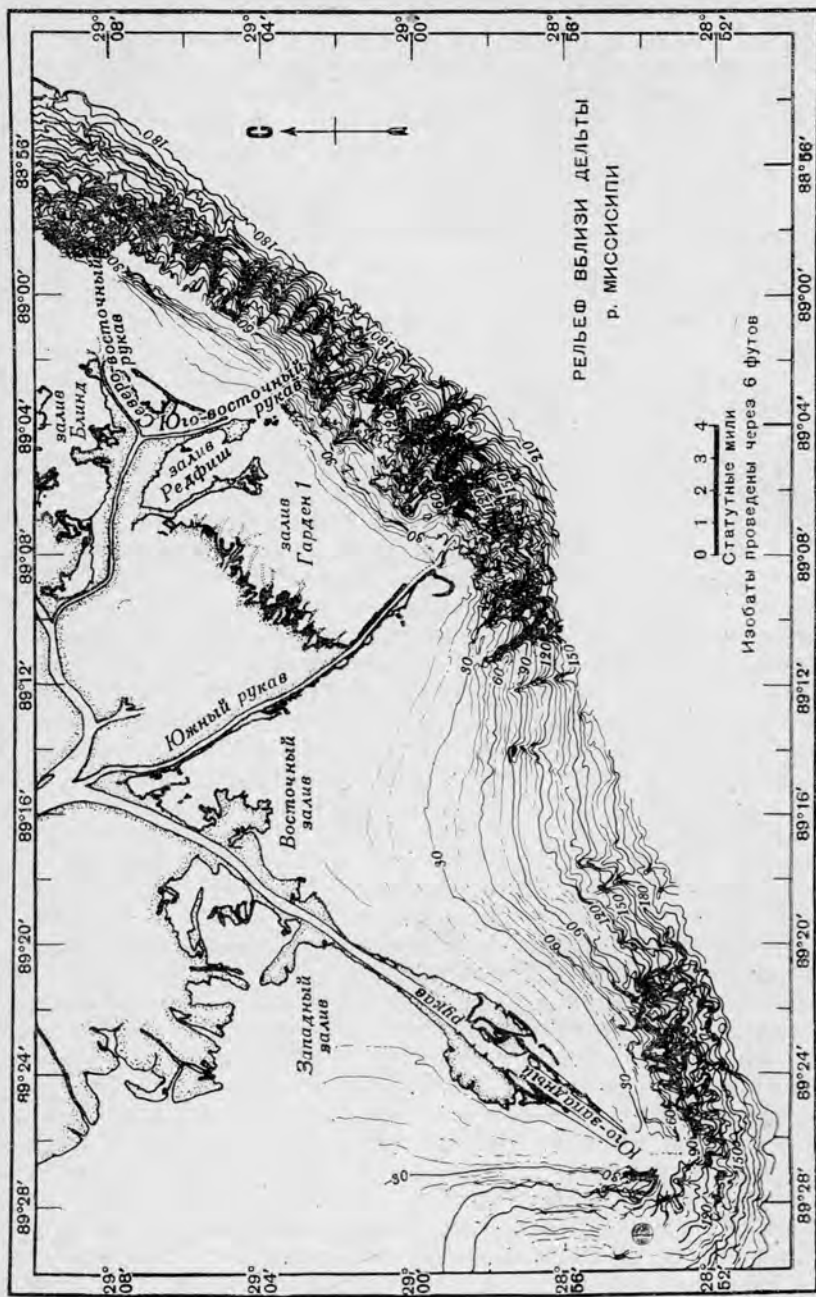
Ф и г. 53. Рельеф склона к югу от Алеутских островов. Большинство подводных долин имеет широкое дно и прямолинейные склоны. Происхождение их, очевидно, связано со сбросами. Изобаты в саженях.

уступа у берегов западной Флориды. Волны цунами, которые могли бы при этом возникнуть, принесли бы огромные разрушения низменным прибрежным районам. А ведь там расположены такие большие города, как Сент-Питерсберг. Жителям побережья Калифорнии еще повезло, что подводные разломы, которые здесь столь многочисленны, либо давно уже не активны, либо проявляются преимущественно в виде горизонтальных, а не вертикальных смещений. На этом побережье не зарегистрировано ни одного сколько-нибудь значительного цунами, хотя сюда и дошли небольшие волны от далекого алеутского землетрясения. Они принесли, впрочем, небольшой ущерб, вызвав совсем незначительное поднятие уровня воды.

РОЛЬ ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ

Повторяющиеся время от времени сбросовые движения на подводных уступах многих материковых склонов препятствуют образованию на них значительных аккумулятивных толщ. Таковую же роль играют подводные оползни и суспензионные потоки, образованию которых в свою очередь, по-видимому, способствуют оползни. В тех районах, где сбросы менее распространены, оползни, вероятно, имеют важное значение, способствуя сохранению на склонах первоначальной крутизны и неровности. Разрывы первых океанских кабелей начались уже вскоре после их прокладки. Большая часть разрывов произошла при этом на материковом склоне. Еще в 1897 г. английский инженер Д. Мили описал многие из этих разрывов и связал их с подводными оползнями. Мы уже отмечали, что в последние годы ученые, в том числе М. Юинг и Ф. Кюнел, пришли к заключению о связи разрывов кабелей с суспензионными потоками. Правда, кажется более правильным авторитетное высказывание К. Терцаги, объясняющего разрывы кабелей результатом особого вида оползней или движения разжиженных осадков вслед за толчком землетрясения.

По мере роста дельты реки Миссисипи на поверхности ее аккумулятивного склона развиваются весьма своеобразные желобки. Они имеют характерные следы оползней в виде небольших котловин и холмиков. Если бы они произошли в результате воздействия течений, то на их дне накапливались бы самые крупнозернистые осадки. Однако колонки, полученные нами со дна этих желобов и с поверхности расположенных между ними гребней, показывают один и тот же тип осадков, без каких-либо следов деятельности течения в желобках. К. Терцаги думает, что оползни на таких пологих склонах возможны только там, где наиболее мелкозернистые и влажные осадки еще не успели уплотниться. Но тонкозернистые осадки, отла-



Ф и г. 54. Небольшие оползневые долины, развивающиеся на материковом склоне одновременно с выдвиганием дельты Миссисипи. Они не спускаются по склону ниже 200-саженей.

гающиеся на более крутых склонах и более медленными темпами, также сползают. Подобные оползни могут вызвать суспензионные потоки, которые уносят осадки со склона и откладывают их на дне океана или в котловинах нижней части склонов.

На крутых материковых склонах, например на уступе у берегов западной Флориды, постепенное сползание осадков под действием силы тяжести, несомненно, приводит к образованию больших борозд на поверхности склона. Эти склоны, наверное, подобны береговым обрывам, врезанным волнами, или крутым стенкам каньонов. Вполне возможно, что многие неровности материковых склонов, обнаруженные на эхограммах, имеют именно такое происхождение.

ПОДВОДНЫЕ КАНЬОНЫ

Огромные подводные каньоны прорезают поверхность материковых склонов во всех уголках Мирового океана. Происхождение подводных каньонов — одна из проблем морской геологии, вызывающих ожесточенные споры. Судя по примерам, они напоминают эрозионные речные долины суши. Но почему они спускаются по материковым склонам так глубоко, далеко за пределы областей, где когда-либо была возможна речная эрозия? Вот в чем загадка!¹

Лет сто назад, когда подводные каньоны были обнаружены впервые, их сочли древними речными долинами, опущенными под уровень океана. Такое опускание казалось вполне естественным, поскольку оно должно было бы компенсировать поднятия горных хребтов, воздымавшихся из глубин древних морей. Казалось бы, это очень простое и логичное объяснение. Но вот уже 65 лет геологи оспаривают его! Многие известные геологи участвовали в этой дискуссии и предложили уже около двух десятков различных гипотез. Чтобы не запутаться в противоречиях гипотез, давайте познакомимся с некоторыми фактами. К сожалению, фактические сведения о подводных каньонах все еще довольно скудны.

ЧТО ТАКОЕ ПОДВОДНЫЕ КАНЬОНЫ?

Так уж случилось, что подводными каньонами стали называть подводные долины самого различного типа. Среди них можно различать: 1) корытообразные, крутосклонные ложби-

¹ Вообще говоря, большие реки вблизи впадения в море способны промывать в своем русле довольно глубокие котловины. Эти котловины оказываются при этом углубленными относительно среднего уровня дна русла реки и уровня прилегающей части шельфа. Так, в русле реки Конго, вблизи устья, известна котловина глубиной 400 футов. Но и эта и другие подобные котловины имеют весьма ограниченные размеры и распространение.

ны, подобные долинам подводных склонов Алеутских островов (см. фиг. 53), 2) вытянутые депрессии ложа океана, лишь слегка углубленные относительно его поверхности и протягивающиеся на большие расстояния, 3) небольшие желобки, прорезающие выдвинутые фронтальные склоны больших речных дельт (см. фиг. 54), и, наконец, 4) извилистые долины V-образного профиля с многочисленными притоками, прорезающие материковые склоны. Характерен именно этот последний тип каньонов, и именно к нему мы будем применять в этой книге термин *подводный каньон*. Очевидно, лишь этот тип подводных долин и может быть сопоставлен с огромными каньонами суши.

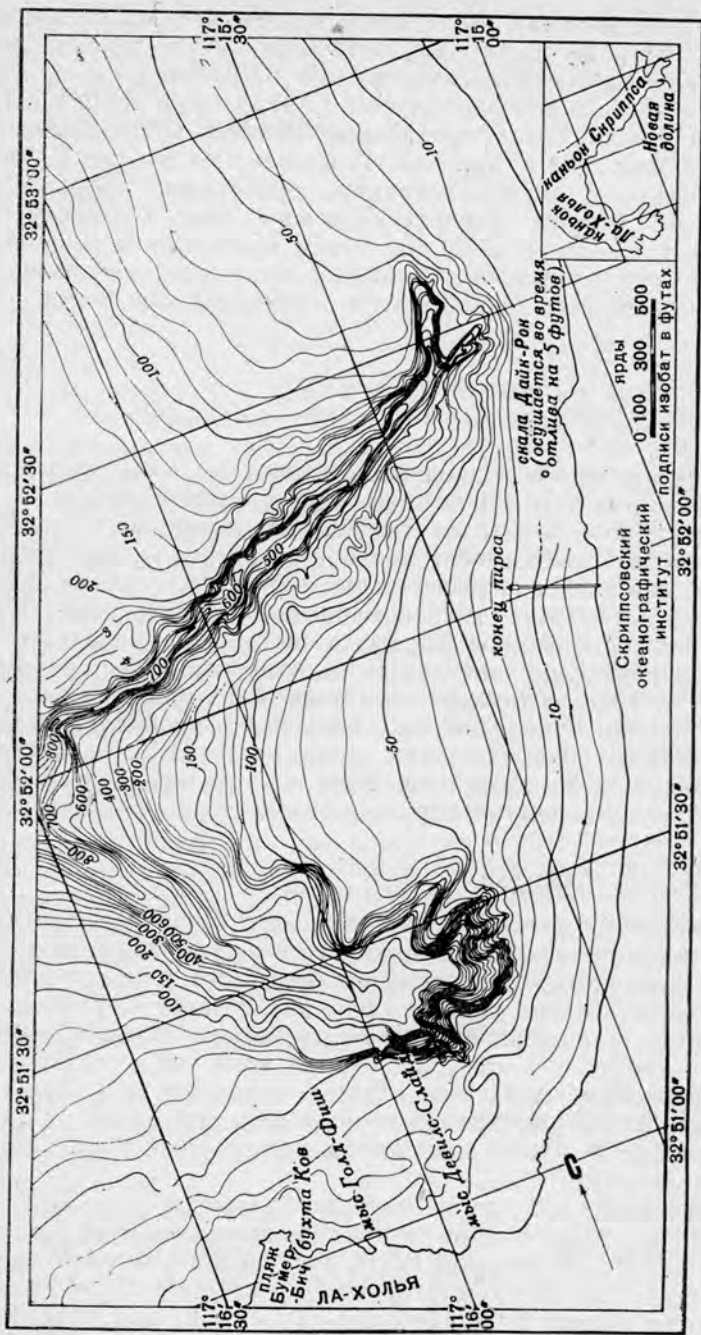
ОПИСАНИЕ НАИБОЛЕЕ ИЗУЧЕННЫХ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ

Не так уж много подводных каньонов было изучено достаточно полно или хотя бы даже хорошо промерено, чтобы можно было подробно описать их. Безусловно, лучше всего изучены каньоны у берегов южной Калифорнии, расположенные вблизи Скриппсовского океанографического института, а также каньон близ мыса Сан-Лукас, южной оконечности полуострова Калифорния, каньоны заливов Кармел и Монтерей у западного побережья Калифорнии, некоторые из каньонов у берегов Французской Ривьеры и Корсики, а также близ устья Конго и у берегов Японии. Описание этих каньонов основывается как на многочисленных промерах, так и на результатах водолазных исследований; использованы данные о характере донных осадков и образцов коренных пород, добытых со стенок каньонов.

Каньоны Ла-Холья

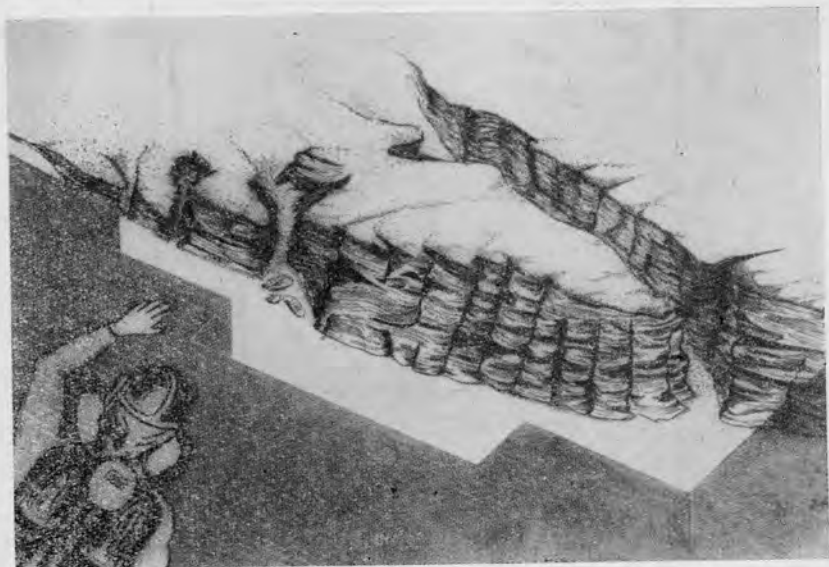
Конечно, это чистая случайность, что Скриппсовскому институту посчастливилось расположиться так близко к двум подводным каньонам, что с конца институтского пирса буквально можно бросить в них камнем (фиг. 55). Каньон Скриппса, как мы назвали его, начинается прямо у берега, немного севернее зданий института. В пределах первой мили он протягивается под острым углом к берегу, а затем соединяется с каньоном Ла-Холья. Тот начинается примерно в 1 тысяче футах от пляжа Ла-Холья-Бич и Теннисного клуба несколькими круто падающими желобками.

Представьте себе, что вы надели акваланг и стали спускаться по каньону Скриппса от самой его вершины. Спуск вы начинаете на отмелом песчаном скате, где глубины всего 15 футов. Вы находите там небольшую долинку и плывете вдоль нее. Постепенно ее склоны становятся все выше, а на дне появляются



Ф и г. 55. Батиметрическая карта подводных каньонов Скрипса и Ла-Холья.

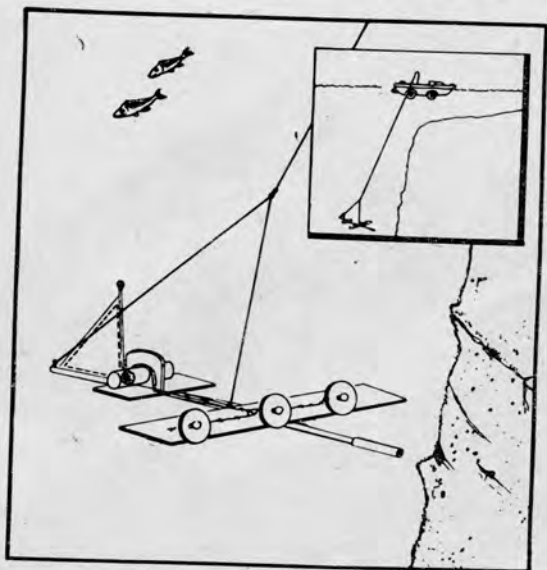
огромные заросли водорослей ламинарий и морской травы — зостеры. Уже на глубине 50 футов склоны долины оказываются очень крутыми, а дальше долина превращается в скалистое ущелье. Взглянешь навёрх, а над тобой нависают отвесные каменные стены. Движешься дальше, и мимо тебя проплывают стаи рыб.



Фиг. 56. Общий вид двух ветвей подводного каньона Скриппса по впечатлениям исследователей-аквалангистов. Согласовано с результатами эхолотного промера. Свет падает на находящуюся на переднем плане северную стенку каньона.

Спустившись до глубины 100 футов, минуешь первый боковой приток каньона, круто падающий откуда-то сверху. Сразу же за ним можно заметить еще несколько боковых висячих долин, прорезающих только верхнюю часть стенки каньона. Если вы хорошо переносите давление воды, которое становится уже очень сильным, можно было бы продолжать спуск дальше. На глубине 175 футов каньон соединяется со своим главным боковым рукавом. Отсюда можно начать подниматься по каньону. При этом попадаешь в такое узкое подводное ущелье, что можно легко коснуться руками обеих его стенок одновременно. Выше каньон несколько расширяется. Однако стенки его остаются обрывистыми вплоть до самой вершины, а там — снова крутой песчаный скат.

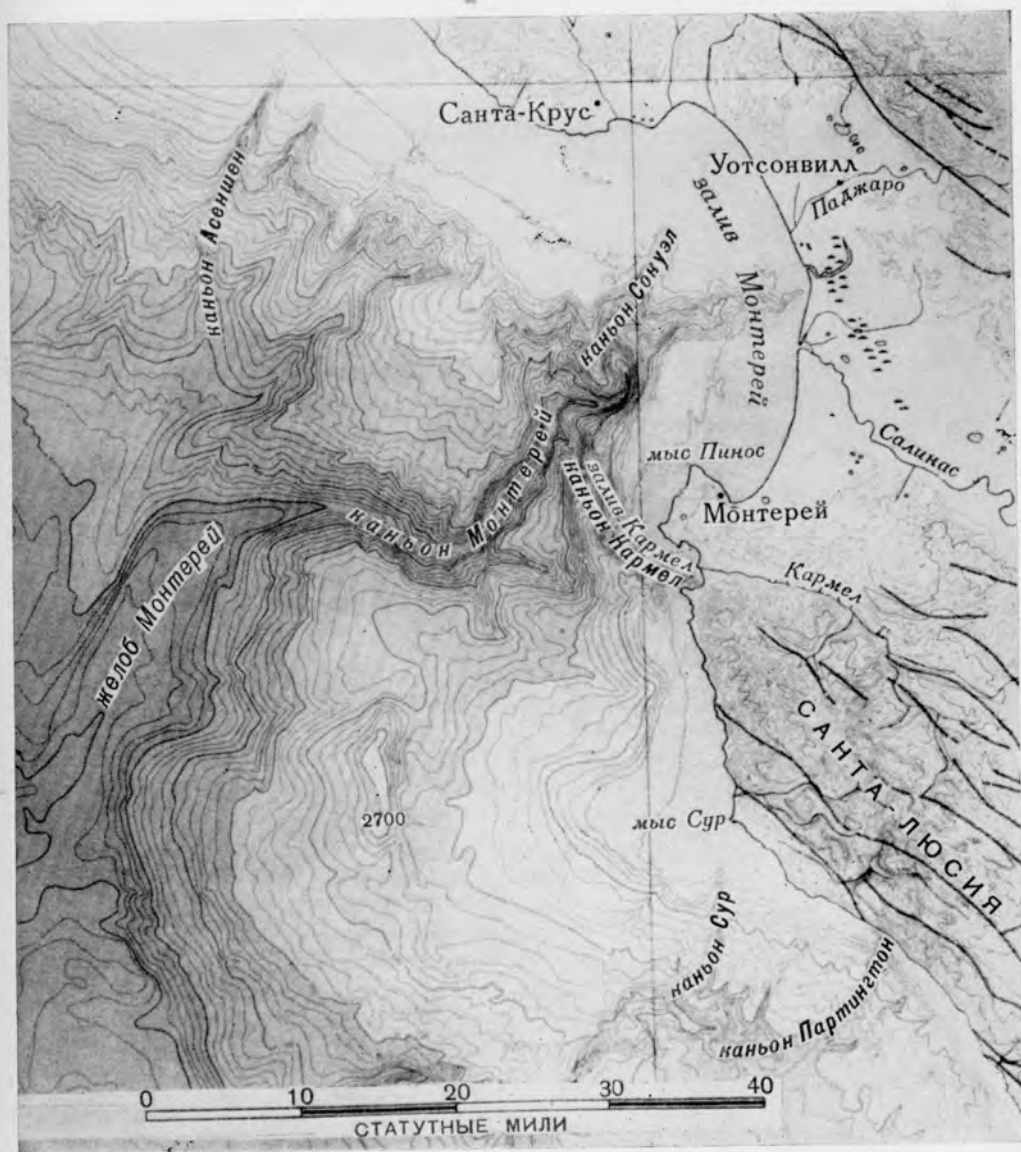
Ниже слияния двух этих рукавов каньона Скриппса глубины становятся слишком большими, чтобы спускаться туда в акваланге. Однако рельеф каньона можно представить себе по результатам измерения глубин. Каньон и дальше имеет обрывистые скалистые стенки. Крутизна их больше, чем у многих каньонов в горах южной Калифорнии. С помощью специальной



Фиг. 57. Подводная фотоустановка, разработанная Р. А. Мак-Алистером (Ламонтская геологическая обсерватория) и Г. Б. Стюартом (Береговая и геодезическая служба США) и применявшаяся для фотографирования отвесных стенок подводного каньона Скриппса. Камера наведена на фокус в тот момент, когда шуп включателя касается стенки каньона.

автоматической подводной фотоустановки удалось сфотографировать их. Такую установку можно буксировать на тросе за шлюпкой или катером, а автоматическое приспособление будет включать фотокамеру и соединенную с ней вспышку-осветитель в тот момент, когда установка окажется вблизи стенки каньона (фиг. 57).

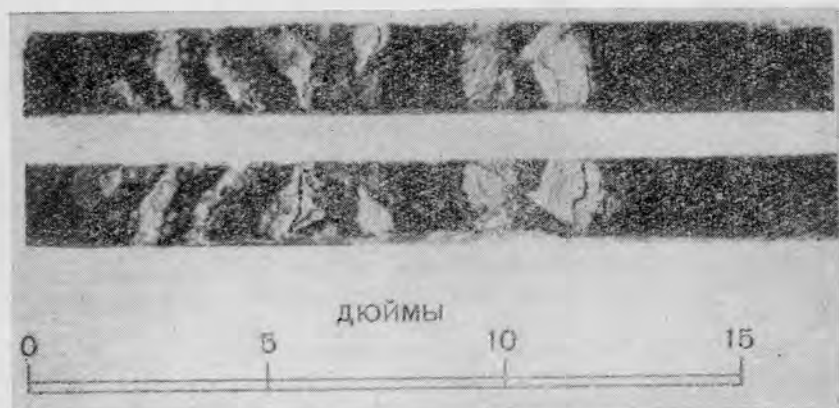
Ниже слияния каньона Скриппса с каньоном Ла-Холья крутизна стенок заметно уменьшается. Однако каньон все же продолжается и спускается по склону, пока не достигнет пологой наклонной поверхности конуса выноса. Этот конус выдвигается на глубине около 3 тысяч футов в пределы большого



Фиг. 58. Батиметрическая карта, показывающая положение подводных каньонов, спускающихся вниз по материковому склону из заливов Монтерей и Кармел и к югу от мыса Сул, у побережья Калифорнии. Можно видеть, что по своим очертаниям они похожи на каньоны прилегающей суши.

желоба Сан-Диего. Выйдя на поверхность конуса выноса, долина становится очень мелкой: она врезается в него всего на несколько саженей, и при этом долина начинает разветвляться на рукава, подобно дельте Миссисипи. Рукава эти окаймлены невысокими прирусловыми валами.

Колонки донных осадков, взятые со дна каньона Ла-Холья, показали наличие в них песчаных прослоев (фиг. 59). Иногда



Фиг. 59. Разрезанная на две половинки колонка осадков со дна подводного каньона Ла-Холья, взятая с глубины 2100 футов и содержащая разной толщины прослой песка. Видно чередование прослоев песка (светлые полосы на снимке) с слоями глубоководных глинистых илов (темные полосы).

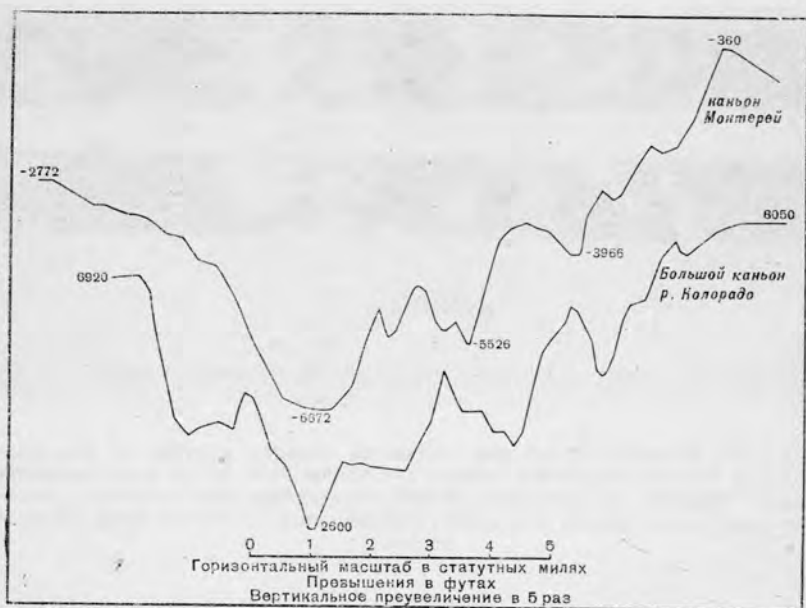
вся колонка состояла из песка, но большей частью песок чередовался со слоями ила. При этом песок вовсе не был смешан с илом. Это был чистый песок, совсем как на пляже возле Скрипсовского института. Одна из колонок содержала комок грубозернистого песка, подобного песку берегового пляжа бухты Ла-Холья. Эта бухта находится к югу от каньона. Интересно, что такой песок был обнаружен не только в самом каньоне, но даже и за его устьем, на дне желоба Сан-Диего.

Подводные каньоны близ города Монтерей

На побережье центральной Калифорнии, близ города Монтерей, есть два залива — Монтерей и Кармел. Из этих заливов спускаются такие гигантские каньоны, что по сравнению с ними меркнут каньоны Ла-Холья. Здесь мы видим такую сложно разветвленную подводную долину, что ее можно сравнить даже с Большим каньоном реки Колорадо. Древовидная форма раз-

ветвлений притоков делает ее похожей на каньоны горных склонов прилегающей суши (фиг. 58).

У каньона Кармел несколько ветвей. Одна из них расположена непосредственно перед устьем реки Кармел. Однако наиболее глубоко врезающаяся в сторону суши ветвь каньона связана не с этой большой рекой, а с каньоном небольшого ручья Сан-Хосе, который спускается к морю севернее мыса Лобос¹ в



Фиг. 60. Сопоставление подводного каньона Монтерей с Большим каньоном реки Колорадо. Профили вычерчены в одном и том же масштабе и построены по одинаковому количеству измерений высот и глубин.

Национальном парке (см. фиг. 58). Вершина этой ветви каньона начинается так близко к берегу, что, стоя у воды, можно бросить в каньон камень. Подводный каньон Кармел врезан в поверхность гранитов так же, как и прилегающий к нему наземный каньон. И по форме они очень похожи друг на друга. Если бы уровень океана опустился, то осушившийся при этом каньон никого не удивил бы, настолько он был бы похож на самый обычный для этого района каньон суши!

¹ Лобос по-испански в данном случае — морской лев, а не волк, как было бы, если бы речь шла о наземном животном.

Совсем иное дело в каньоне Монтерей! Вот если бы здесь вдруг опустился уровень воды, то мы увидали бы, как резко сменяется пологая прибрежная долина реки Салинас крутым падением подводного каньона. Начинается он сразу же за береговой линией. Несколько песчаных желобов соединяются на глубине 400 футов, в 1 миле от берега. Отсюда и начинается глубокий каньон. Он долго петляет по дну залива Монтерей, принимает в себя боковые рукава, а затем на глубине 6600 футов сливается с каньоном Кармел. При драгировании со стенок каньона Монтерей были получены образцы коренных пород осадочного происхождения плиоценового возраста. Они подстилаются, видимо, породами миоценового возраста, а еще ниже — гранитами. Таким образом, можно думать, что нижняя часть каньона представляет собой гранитное ущелье, подобное нижнему ущелью Большого каньона реки Колорадо. Правда, у нас еще нет уверенности, что граниты обнажаются в обеих стенках этого ущелья.

Колонки, взятые со дна каньона, показали присутствие большого количества песка. Для таких глубин это совсем необычно. В одной из колонок, с глубины 4800 футов, сверху был слой ила, ниже — слой песка, в самом низу — галька. Такую последовательность слоев обычно называют градационной слоистостью. Ф. Хеймакер, в прошлом водолаз военно-морского флота США, опускался на песчаное дно в верховье каньона. Он взял там несколько колонок донных осадков, вбивая трубку в песок ударами кувалды. Колонки эти состояли из чередующихся слоев крупного песка, подобного песку прибрежных пляжей, и слоев ила. Совсем так же, как и на дне каньона Ла-Холья!

Форма внешней оконечности каньона Монтерей по данным промера определяется с трудом. Создается впечатление, что каньон теряет свой характерный V-образный профиль на глубине около 9 тысяч футов. Далее он продолжается в виде желоба, спускающегося до глубины 12 тысяч футов. Желоб этот заканчивается конусом выноса, подобно каньону Ла-Холья, только у того конус находится на значительно меньших глубинах. Поверхность конуса выноса здесь также прорезают неглубокие желобки с прирусловыми валами.

Каньоны Нижней Калифорнии

Скриппсовский океанографический институт расположен близ Нижней Калифорнии и Калифорнийского залива, так что каньонам этого района повезло. Они оказались буквально искоженными вдоль и поперек во время многочисленных рейсов исследовательских кораблей этого института. В двух из этих рейсов мы специально исследовали подводные каньоны вблизи южной оконечности полуострова. Один из них протягивается в

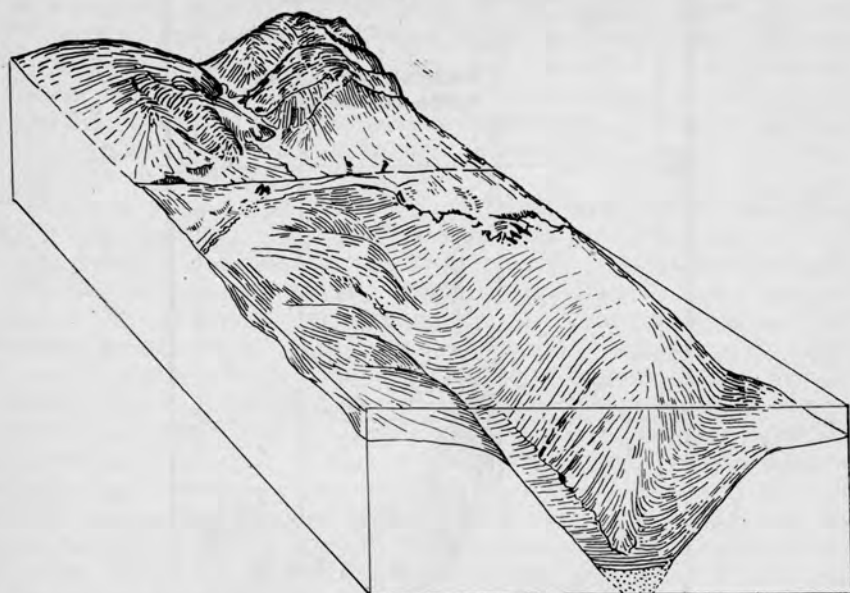
направлении входа в залив у мыса Сан-Лукас, где он заканчивается гранитным выступом. Опускаясь в верховье этого каньона, аквалангисты обнаружили круто падающую гранитную стену, на которой кое-где были видны песчаные участки. Время от времени песок сползал и ссыпался с обрыва в глубину каньона. С помощью эхолотного промера каньон Сан-Лукас (фиг. 61, 62) прослежен до больших глубин. Там он становится извилистым и продолжается по крайней мере до глубины 1200 саженей. Глубже исследования не проводились. Подобно другим типичным подводным каньонам, каньон Сан-Лукас с обеих сторон имеет несколько притоков.

Интересно, что почти все подводные каньоны Нижней Калифорнии группируются вокруг южной оконечности полуострова. Промерные профили, проходившие вдоль крутого подводного уступа, окаймляющего полуостров со стороны Калифорнийского залива, обнаружили сколько-нибудь значительных долин. С тихоокеанской стороны полуострова есть одна небольшая долина. Она находится примерно в средней части побережья, к югу от острова Седрос. Другая долина, вблизи Энсенеды в заливе Тодос-Сантос, представляет собой скорее вытянутую котловину, и называть ее каньоном не совсем правильно. Средоточение подводных каньонов вблизи южной части полуострова Калифорния, может быть, связано с климатическими особенностями. В этом районе количество осадков довольно велико по сравнению с другими, засушливыми частями полуострова.

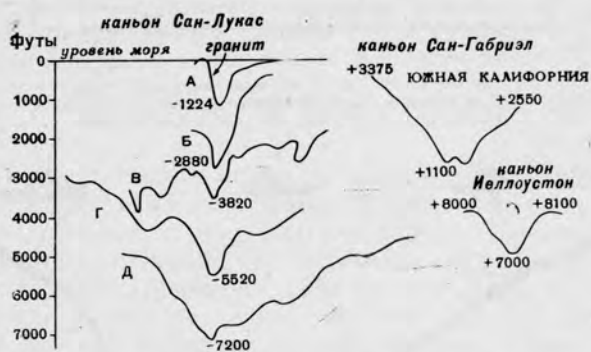
Каньоны восточного побережья США

В общих чертах подводные каньоны восточного побережья США (фиг. 63, 31) мало отличаются от каньонов Калифорнии. Удаленность от берега и значительная глубина верховьев этих каньонов затрудняют их детальное изучение. В самом деле, современными эхолотами невозможно обнаружить вертикальные обрывы по склонам каньонов. Ведь и вблизи Скриппсовского института они были обнаружены не эхолотами, а водолазами! (фиг. 64).

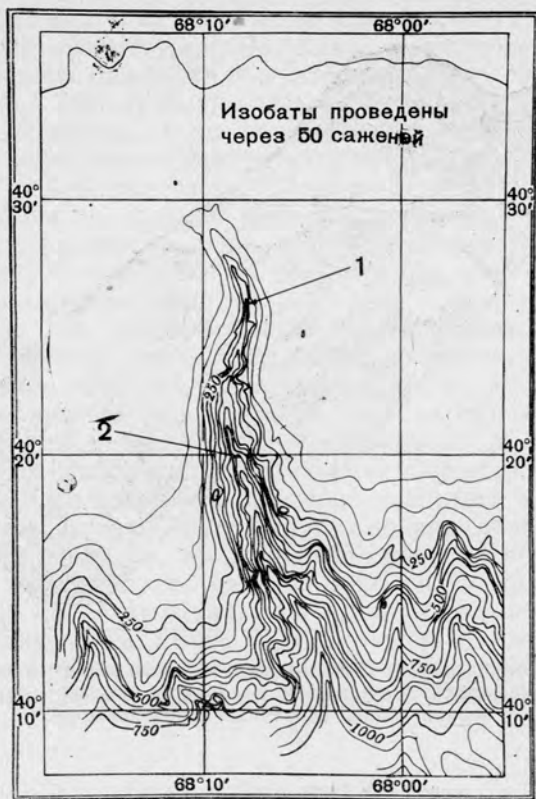
Г. Стетсон пришел, однако, к выводу, что вертикальные обрывы в каньоне близ побережья Новой Англии все же существуют. При драгировании ему удалось поднять оттуда огромный обломок песчаника. Порода была глубоко пропилена стальным тросом перпендикулярно залеганию слоев. Это значит, что трос тянул драгу вертикально вверх по поверхности обнаженного обрыва, сложенного песчаниками. Породы, обнаруженные Стетсоном, содержали ископаемую фауну. Оказалось, что многие из образцов имеют возраст древнее мела (около 100 млн. лет назад по абсолютной шкале времени). Осадки, взятые со



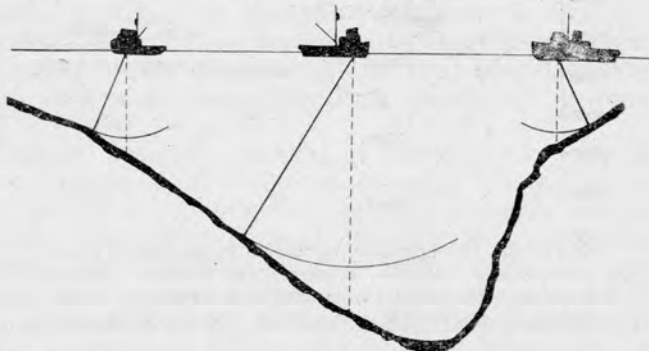
Фиг. 61. Блок-диаграмма, показывающая связь между каньоном ручья Сан-Хосе, Калифорния, и вершиной подводного каньона Кармел. Тонкая черная линия обозначает уровень моря.



Фиг. 62. Поперечные профили подводного каньона вблизи южной оконечности Нижней Калифорнии в сравнении с профилями каньонов суши. Профили построены в одном и том же масштабе.



Фиг. 63. Типичный подводный каньон вблизи побережья новой Англии.
 1 — точка, в которой драгой были взяты образцы коренных пород мелового возраста;
 2 — положение колонки, в которой были найдены морские гляциальные осадки, залегающие под постгляциальными отложениями.



Фиг. 64. Звуковые сигналы, посылаемые эхолотом, отражаются от ближайшей отражающей поверхности дна, создавая ложное впечатление о глубине под кораблем.

дна каньонов восточного побережья США, указывают на их длительное и медленное накопление. В нижней части шестифутовой колонки Стетсон обнаружил фораминифер, обитающих сейчас в водах субарктических морей. Следовательно, осадки нижней части колонки были отложены в период похолодания, вероятно в ледниковую эпоху (10 тысяч лет назад), когда холодные воды спускались значительно южнее, чем сейчас.

Каньон близ устья реки Гудзон имеет многочисленные притоки (см. фиг. 31). Максимальная высота стенок каньона 4 тысячи футов. Проведенные здесь Стетсоном драгировки не дали результатов. Однако группе сотрудников Ламонтской геологической обсерватории, возглавляемой М. Юингом, удалось получить во внешней части каньона образцы миоценовых глин. Один большой обломок такой породы был поднят со дна каньона с глубины 7 тысяч футов. В колонке с глубины 12 тысяч футов осадки на дне каньона состояли из гравия, перемешанного с раковинами и обломками плотной глины. Группа Юинга проследила продолжение каньона и обнаружила, что он тянется в виде неглубокой долины через широкий аккумулятивный шлейф, своего рода конус выноса, на дне Атлантического океана. Длина этой подводной долины, включая собственно каньон и его внешнее продолжение, составляет примерно 180 миль. При этом долина спускается на глубину до 14 тысяч футов.

Пробы донных осадков из внешней части долины и прилегающих к ней частей аккумулятивного шлейфа содержали большое количество песка. Это был хорошо отмытый песок, подобный пескам, обнаруженным вблизи устья каньона Ла-Холья.

Каньоны вдоль побережий Французской Ривьеры и Корсики

Каньоны Средиземного моря во многих отношениях особенно загадочны. Здесь на подводных склонах каньонов больше, чем в каких-либо других изученных областях. Они хорошо прослеживаются на глубинах, превышающих пороговую глубину Средиземного моря (примерно 1400 футов). Вода в некоторых местах там настолько прозрачна, а многие каньоны начинаются так близко от берега, что их можно увидеть прямо с суши. Я стоял как-то на верхней площадке древней генуэзской башни и рассмотрел сразу два притока огромного каньона, спускающегося из залива Порто на западном побережье Корсики. Прогуливаясь вдоль берега вблизи отеля Эден в Эце, к западу от Монако, я разглядел крутую стенку подводного каньона, скрывающуюся где-то на глубине около 100 футов в водах Средиземного моря. Мой друг Роберт Дилл, морской геолог из Мор-

ской электронной лаборатории военно-морского флота США, опускался вместе с Андре Портелатином на глубину 200 футов в один из каньонов вблизи побережья Монако и был поражен видом узких подводных скалистых ущелий. Он сравнивает их с речными ущельями Приморских Альп, которые возвышаются здесь над самой водой. Спуски в батискафе, проведенные Кусто и Ж. Гуо (французский военно-морской флот) в значительно более глубоких каньонах вблизи Тулона, позволили обнаружить там лишь покрытые илом, а не скалистые склоны¹.

Каньоны Французской Ривьеры в одном отношении резко отличаются от каньонов западной Корсики. В качестве примера можно сослаться на картину, наблюдаемую вблизи Ниццы. Плававшая на французском военном корабле «Эли Монье» вместе с профессором Жаком Буркаром из Сорбонны, я наблюдал, как эхолот записывал на ленте серию крутых ущелий и узких хребтов. В это время мы шли так близко вдоль ровного берега этого знаменитого курорта, что видели купающихся на пляже. Здесь, как и в заливе Монтерей, рельеф суши очень ровный, а подводный склон уже у самого берега прорезан долинами, переходящими затем в огромные каньоны. Драгой были подняты обломки коренных пород. Во время наших работ в районе Ниццы мы получили со дна каньона колонки, содержавшие прослойки песка, подобные найденным в подводных каньонах Америки.

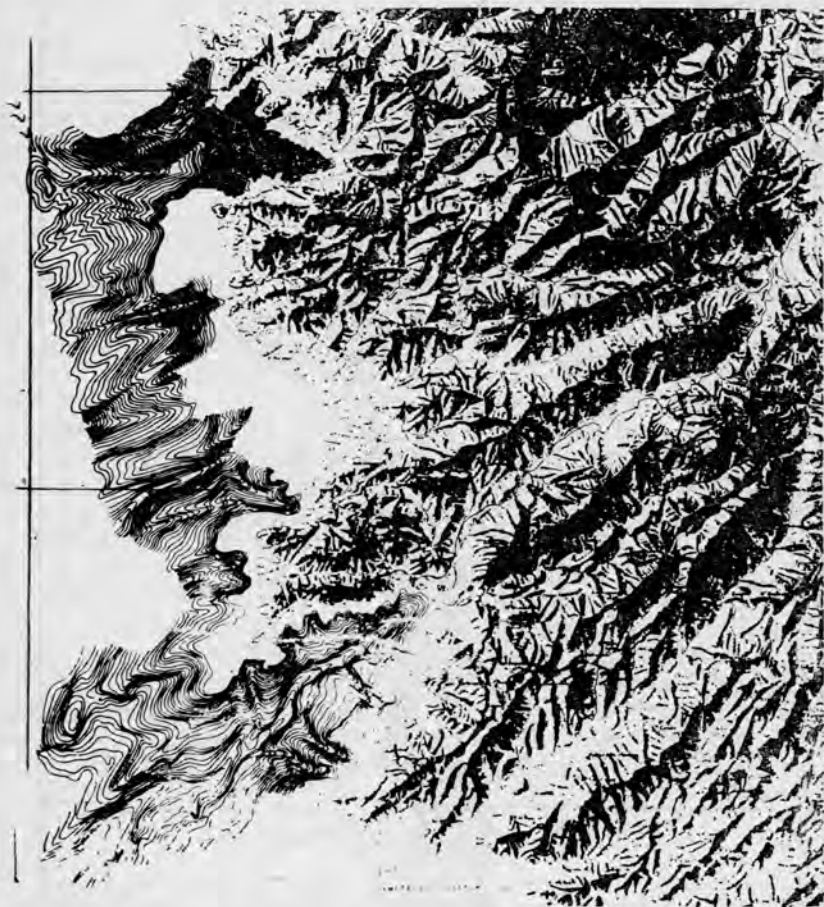
Каньоны Корсики, в отличие от каньонов Французской Ривьеры, по форме соответствуют долинам суши (фиг. 65). Каждый залив на западном побережье Корсики имеет свой подводный каньон, каждое ответвление залива также продолжается под водой. Такая тесная связь рельефа суши с подводным рельефом выражена в этом районе гораздо ярче, чем в заливе Кармел в Калифорнии. Создается впечатление, что горный хребет опустился здесь совсем недавно и часть каньонов на его склонах оказалась при этом под водой. Вряд ли можно сомневаться, что это было именно так. Наверное, Наполеон был бы весьма удивлен, узнав, что в заливе Аяччо, где он провел свою молодость, каньоны суши продолжают под водой.

Каньон Конго

Из всех африканских рек самый большой сток у Конго, и тем не менее она не имеет дельты и впадает вблизи порта Банана в глубокий эстуарий. Последний является не чем иным, как вершиной подводного каньона Конго, простирающегося в океан на 145 миль (фиг. 66). Сторонникам теории происхожде-

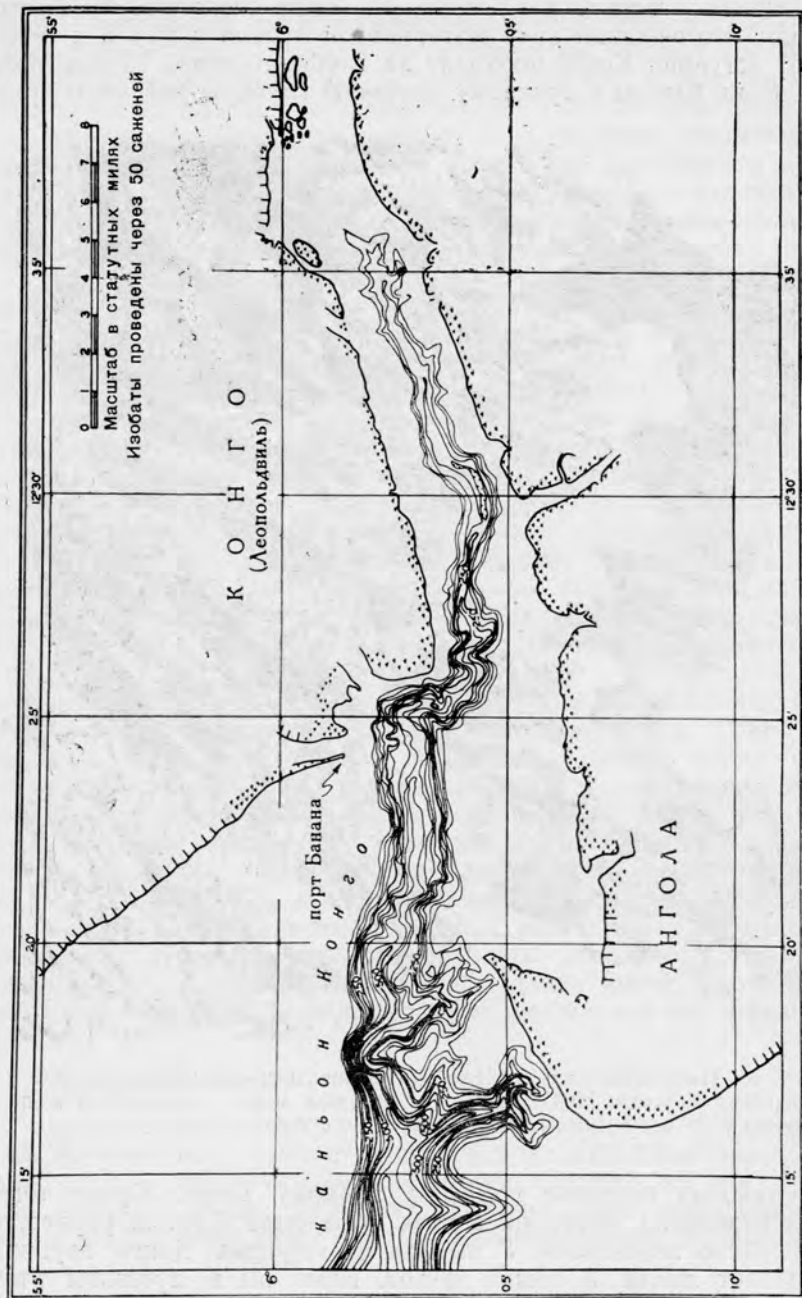
¹ Georges Houot, Pierre Henri Willm, 2000 Fathoms Down, New York, E. P. Dutton & Co., 1955.

ния каньонов вследствие погружения суши следовало бы иметь в виду, что внешний край материковой отмели к югу и к северу от эстуария Конго проходит на глубинах около 70 саженей. Это очень близко к среднему значению глубины внешнего края



Фиг. 65. Подводные каньоны, глубоко проникающие в заливы западного побережья Корсики. Наблюдается тесная связь между подводными каньонами и каньонами суши.

материковых шельфов по всему земному шару. Кроме того, за исключением эстуария Конго, побережье Африки ровное, а не глубоко изрезанное. У выхода из эстуария Конго глубина достигает почти 3 тысяч футов. Если бы в прошлом этот район подвергался оледенению, то происхождение такого зали-



Ф и г. 66. Подводный каньон Конго, глубоко проникающий в эстуарий у устья реки Конго.

ва объяснить было бы нетрудно. В самом деле, такие глубины часто встречаются в выпаханных ледниками фьордах. Однако этот залив находится в области жаркого климата, вблизи экватора. Помимо того, и по своей форме дно эстуария совсем не похоже на дно фьорда. Оно спускается в океан без всякого порога, который так характерен для котловин фьордов.

Внешняя часть каньона Конго была недавно исследована Хейзенем (Ламонтская геологическая обсерватория). Он обнаружил близ устья каньона конус выноса с расходящимися по нему неглубокими желобками, подобный конусам выноса других больших подводных долин.

Каньон Токийского залива

Этот подводный каньон проникает на 12 миль в устье Токийского залива. Очертания его более извилистые, чем каньона Конго, а притоки хорошо развиты. В действительности он больше похож на каньоны заливов Корсики, за исключением того, что начинается в широком мелководном заливе. Многочисленные пробы грунта, собранные японскими геологами, свидетельствуют, что каньон имеет скалистые стенки и, возможно, скалы могут быть встречены также и на дне каньона. Пробы осадков со дна каньона содержат много песка.

Токийский подводный каньон протягивается до глубин около 770 саженей, где соединяется с желобом, спускающимся из залива Сагами. Склоны каньона сравнительно прямолинейные и, несомненно, образованы в результате сброса. В самом деле, именно вдоль этого желоба происходили смещения коры, вызвавшие катастрофическое Токийское землетрясение 1923 г. Сочетание извилистого каньона с прямолинейным сбросовым желобом — одна из загадок, ответ на которую мог бы явиться ключом к разгадке происхождения подводных каньонов.

Каньоны или желоба вблизи больших дельт

Глубокие долины, или каньоны, врезанные в материковые шельфы вблизи больших дельт, имеют мало общего с уже описанными каньонами рек. Эти каньоны лучше всего развиты на шельфе у берегов Индии. Каньон Суотч-оф-Но-Граунд (Бездонная полоса) вблизи дельты Ганга представляет собой трогообразную плоскодонную депрессию, врезанную в шельф на 20 миль от края дельты. У края шельфа ее глубина около 500 саженей. Она продолжается вниз по склону и далее по дну Бенгальского залива в виде неглубокого желоба. Каньон Инда начинается в 3 милях от края отмели, окружающей дельту Инда. В виде относительно прямого желоба с непрерывно углубляющимся дном он протягивается отсюда на 70 миль к краю шель-

фа, где глубина его уже 620 саженей. Все поперечные профили этого каньона показывают довольно широкое плоское дно. Вблизи западной части дельты реки Миссисипи имеется похожая трогообразная долина, но она начинается в 50 милях от берега. Геофизические исследования на шельфе показали, однако, что этот желоб может быть прослежен в его пределах. Он связан при этом с погребенной долиной, дно которой находится у края дельты на глубине 400 футов ниже уровня моря. Этот подводный желоб может быть прослежен в море до глубины более 1 тысячи саженей, где он, по-видимому, оканчивается, а на его продолжении располагается большой конус выноса.

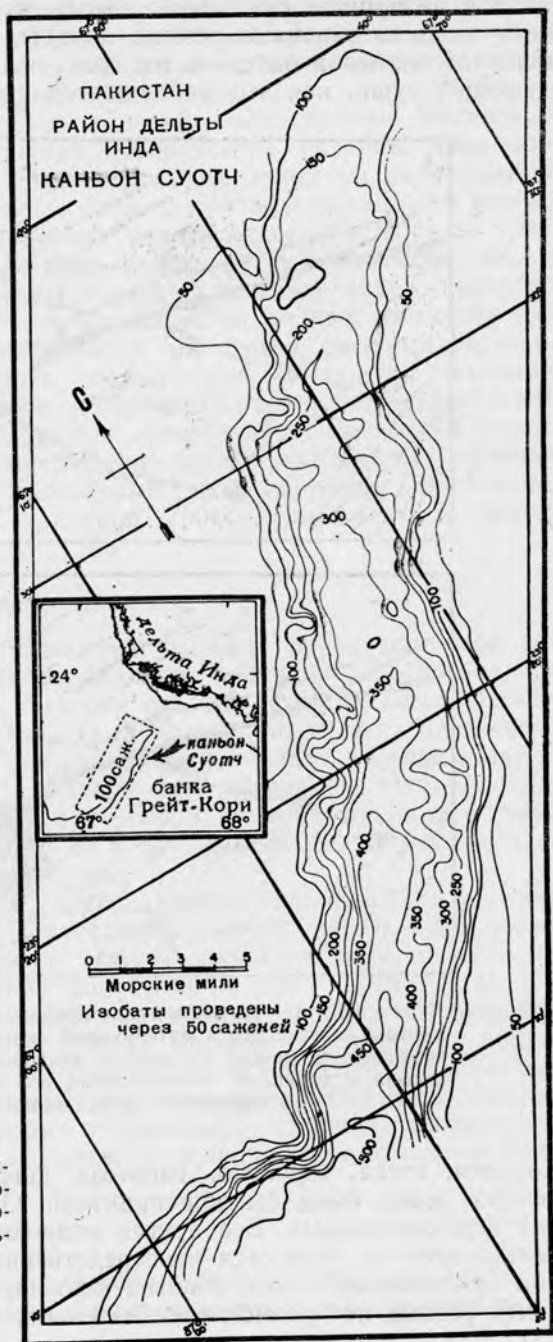
Несколько нам известно, ни одна из троговых долин не прорезает скалистые породы, они врезаются только в дельтовые отложения. Существование боковых притоков, а также извилистые очертания, свойственные типичным подводным каньонам, ни для одной из них не установлены. Осадки трогообразной долины Миссисипи содержат прослойки песка; мелководная фауна встречается в ее осадках на глубинах до 800 саженей.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ПРИЧИНЫ СОХРАННОСТИ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ

Пытаясь объяснить происхождение подводных каньонов, следует основываться прежде всего на данных об устройстве наиболее типичных из них. В начале этой главы мы говорили, что подводные каньоны — это долины, напоминающие каньоны суши по характеру продольного профиля, извилистым очертаниям, в общем V-образной форме поперечного профиля и наличию многочисленных потоков или ответвлений. Такому определению отвечают все описанные выше каньоны, за исключением трогообразных долин вблизи дельт. Рассмотрение других типов долин излишне усложнило бы нашу задачу. Больше того, даже на суше происхождение различных типов хорошо изученных долин не может получить одинаковое объяснение. В образовании некоторых из них главную роль первоначально сыграли реки, а в развитии их склонов — размыв стекающими водами. Другие обязаны своим происхождением оледенению, сбросам и оползням. Таким образом, вопрос сводится к тому, чтобы выяснить, что является первичным процессом, обусловившим образование подводных каньонов.

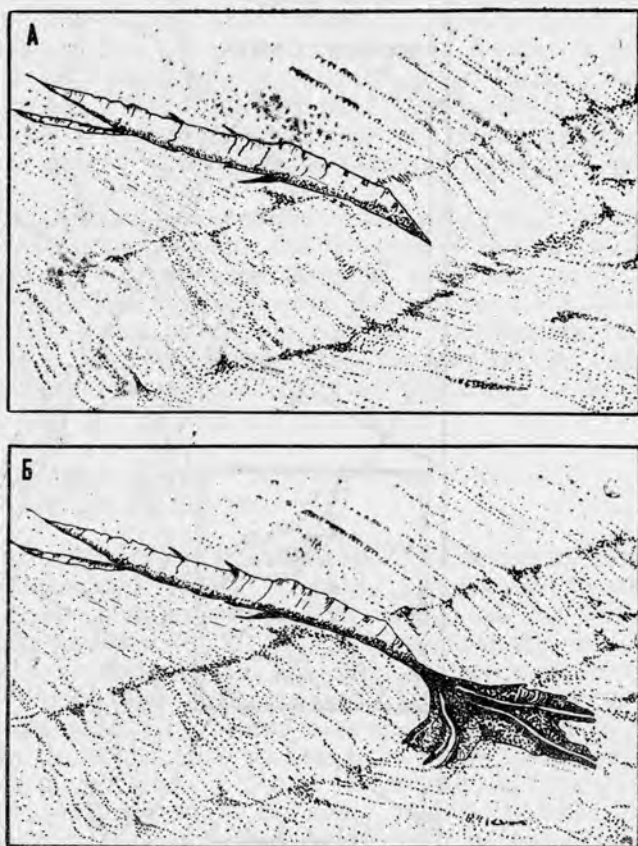
Усложняющие факторы

При чтении приведенных выше описаний отдельных подводных каньонов кажется странным, почему ни одному геологу до



Фиг. 67. Прямолинейный желоб, пересекающий широкую материковую отмель вблизи дельты Инда.

сих пор не пришла счастливая мысль, что каньоны — всего-навсего лишь затопленные речные долины. Если бы все долины морского дна были бы столь же тесно связаны с долинами прилегающей суши, как это наблюдается у западного побережья



Фиг. 68. А — гипотетическое окончание подводного каньона, врезанного в материковый склон. Б — истинное соотношение между подводным каньоном материкового склона и долинами, образующими его продолжение на поверхности конуса выноса.

Корсики, тогда, вероятно, гипотеза погруженных эрозионных речных долин была бы общепринятой. Однако Корсика — случай исключительный. Все другие подводные каньоны в своем большинстве не являются непосредственным продолжением долин прилегающей суши. Многие каньоны расположены вблизи почти ровных побережий; следовательно, эта местность вряд ли

испытала в прошлом погружение, иначе берега имели бы изрезанные очертания — результат затопления суши с ее холмами и долинами. Подводные каньоны почти всегда значительно круче падают, чем долины прилегающей суши.

Кроме того, насколько известно, простираание подводных каньонов не ограничивается материковым склоном. Они продолжаютсЯ дальше в виде неглубоких долин по дну морей и океанов. Если бы каньоны были прорезаны реками, то почему они не заканчиваются вблизи подножия склона, то есть уровня, к которому стекала река до его погружения (фиг. 68,А)? Распространение каньонов по всему земному шару, вероятно, служит еще более общим возражением против гипотезы эрозионного происхождения. Когда мы будем располагать большим количеством данных, возможно, окажется, что большинство подводных каньонов, показанных на карте, в действительности не вполне соответствует данному здесь довольно узкому определению. Их происхождение может оказаться связанным с совершенно иными процессами, чем процессы образования типичных подводных каньонов, рассматриваемых в данной главе.

Отвергнутые старые гипотезы

Чтобы избежать трудностей, стоящих перед гипотезой речного врезания, ученые предложили много других гипотез происхождения каньонов. Все они связаны с процессами, возможными на подводных склонах. Большинство из этих идей сейчас уже отвергнуто, так как они вызвали появление еще большего количества проблем, чем сами они объясняли. Однако следовало бы сделать краткий их обзор и напомнить, что в науке развенчанные гипотезы хотя и трудным путем, но все же часто вновь возвращаются к жизни.

Некоторые геологи считали сбросы причиной образования подводных каньонов. Опусканием блоков земной коры можно объяснить происхождение многих долин суши, и понятно, что аналогичное объяснение допустимо и для многих подводных долин морского дна, например долины в области Алеутских островов (см. фиг. 53). Однако морфология типичных подводных каньонов совсем не сопоставима с морфологией сбросовых долин суши. Извилистые очертания, дендритовидные ответвления и V-образная форма поперечного профиля, по-видимому, исключают сбросы как основную причину происхождения каньонов.

Типы течений

Некоторые авторы полагали такой основной причиной циркуляцию подземных вод, сопровождающуюся растворением гор-

ных пород и формированием карстовых пещер с последующим их обрушением. Грунтовые воды, однако, не могут активно циркулировать ниже уровня моря, если только они не обладают значительным напором, заставляющим их проникать в толщу более плотной морской воды. Для этого необходимо наличие очень высокой суши и наклона слоев горных пород в глубины океана. Между тем это вовсе нетипично для областей развития каньонов. Кроме того, разрушение пещер должно было бы привести к образованию чрезвычайно сложно расчлененных долин, а мы обнаружили их лишь вдоль побережья Мексиканского залива, где превышение суши совершенно недостаточно, для того чтобы вызвать активную подземную циркуляцию воды.

Геологи, не знакомые с результатами океанографических исследований, выдвигали идеи о различных типах течений для объяснения происхождения подводных каньонов. Однако и нисходящие течения, направленные против общего движения водных масс, и восходящие, ведущие к поднятию воды с больших глубин, о которых известно, что они очень слабы, совершенно неспособны прорезать глубокие ущелья или подводные долины какого-либо типа. Очевидно, то же самое справедливо и для течений, обусловленных различной плотностью воды, направленных в глубину и вызванных охлаждением воды вдоль берега или испарением в частично закрытых заливах, вследствие чего в обоих случаях вода становится более плотной, чем на соседних участках. Цунами и другие огромные морские волны также рассматривались в качестве одной из причин образования каньонов, но весьма сомнительно, что они вызывают сколько-нибудь значительные течения, за исключением районов прибрежных мелководий. Кроме того, распределение каньонов совсем не соответствует областям, где обычны цунами. Интересна гипотеза подводных оползней, но они обычно рассматриваются лишь как частная причина образования каньонов. Безусловно, оползни в большей мере способствуют образованию долин в мягких, нежели в твердых породах, таких, как гранит. Позднее будет сказано несколько подробнее об оползнях, как о причине, содействующей образованию каньонов, но преимущественно предохраняющей их от захоронения осадками.

Суспензионные потоки

На следующем месте после гипотезы речной эрозии, поддерживаемой в настоящее время достаточно широким кругом геологов, стоит гипотеза о врезании подводных каньонов суспензионными потоками. Первоначально она была предложена Р. Дэли (Гарвардский университет), но не получила поддержки, пока Ф. Кюннен не продемонстрировал в своем 100-футовом опытном бассейне Гронингенского университета в Голландии,

что песок и даже гравий могут переноситься во взвешенном состоянии по подводному склону, если на верхнюю часть этого склона вылить однородную суспензию воды и осадков, содержащих достаточное количество илистых частиц. Дальнейшее подкрепление этой гипотезы было получено благодаря работам М. Юинга и группы его сотрудников в Ламонтской геологической обсерватории, сообщивших о широком распространении песчаных отложений в конусах выноса вокруг устьев некоторых подводных каньонов. Затем появились сообщения Хейзена и Юинга о разрывах кабелей, сопровождавших землетрясение на Большой Ньюфаундлендской банке. Они рассматривали эти разрывы как следствие суспензионного потока, имевшего скорость около 60 миль в час. Если придонные потоки могут двигаться с такой скоростью и разрывать прочные кабели, то они, конечно, способны прорезать каньоны даже в граните.

К сожалению, мы еще не до конца разобрались в этой сложной и противоречивой проблеме. Теория К. Терцаги о прогрессивном разжижении осадков, сопровождающем землетрясение, представляет собой, по-видимому, один из вариантов гипотезы в противоположность гипотезе, основанной на предположении о деятельности суспензионных потоков,двигающихся с большой скоростью. Гипотеза К. Терцаги не вызывает возражений, возникающих в связи с идеей об огромных скоростях потоков, развивающихся, несмотря на трение морской воды на пологих склонах. Ведь еще надо доказать, что высокоскоростные суспензионные потоки действительно существуют. Измеренные до сих пор только в искусственных водоемах скорости суспензионных потоков не превышают 1 мили в час. Мы планируем подготовить оборудование для измерения скоростей таких потоков в подводных каньонах вблизи Скриппсовского института, но пока еще такого оборудования нет.

Некоторые косвенные сведения проливают свет на деятельность суспензионных потоков в каньонах южной Калифорнии. Хорошо сортированные прослойки песка, обнаруженные в колонках, взятых со дна каньонов, показывают, что по дну каньона проходили потоки достаточной силы, чтобы переносить и сортировать песок. Однако данные о чередовании слоев песка и глубоководного ила¹ еще не доказывают, что потоки, выносящие песок, способны производить значительную эрозию. Если бы это было действительно так, то мягкие илы, подстилающие песок, были размыты и унесены и по мере ослабления потока песок отлагался бы прямо на коренные породы, в которые врезан каньон. Более вероятно, что суспензионные потоки способны лишь переносить песок и другие осадки, но не эродировать

¹ По типу содержащихся в них фораминифер эти илы определены как глубоководные.

дно. То же самое подтверждают, по-видимому, исследования древних отложений суспензионных потоков, проведенные Кюенем и другими. В одном месте грубозернистые осадки суспензионного потока были обнаружены в кровле тонкозернистых глубоководных осадков с сохранившимися ходами червей, не уничтоженные потоком. С другой стороны, такие результаты воздействия суспензионных потоков, как знаки ряби и косая слоистость, были найдены в древних осадках, очевидно связанных с суспензионными потоками. Как видно, всех данных еще недостаточно для суждения об истинной роли подобных потоков.

Речная эрозия в отдаленном прошлом

Наилучшим объяснением происхождения подводных каньонов было бы предположение, что они были прорезаны в результате огромного понижения уровня океана во время одной из ранних стадий оледенения, когда шапки покровных ледников могли быть значительно мощнее, чем в последнюю, висконсинскую стадию. Однако десять лет назад стало ясно, что и от этой гипотезы следует отказаться. Исследования некоторых плосковершинных подводных гор показали, что таких больших понижений уровня океана не могло быть даже на ранних стадиях ледникового периода. Мелководные ископаемые, обнаруженные на этих подводных горах, значительно древнее. Кроме того, подводные каньоны настолько сильно отличаются от долин прилегающей суши, что это обстоятельство также заставляет отказаться от идеи о большом погружении суши в плейстоцене или в более позднее время. Наконец, в погребенных под осадками каньонах, находящихся в верховьях современных каньонов, обнаружены породы разного возраста вплоть до миоцена (около 20 млн. лет назад).

Таких серьезных возражений против гипотезы погружения каньонов не было бы, если учесть отдаленные геологические эпохи. Данные глубокого бурения вдоль материковых окраин, полученные геологами, изучающими древние осадочные породы, подтверждают значительные погружения суши на давних этапах геологической истории. Почти каждое побережье, вблизи которого отмечаются подводные каньоны, подстилается толщей осадков мощностью в тысячи футов. Осадки содержат фауну, указывающую, что их отложение происходило на уровне значительно более высоком, чем современное положение места взятия образцов. Например, результаты бурения на восточном побережье США показывают, что меловые осадочные породы, образовавшиеся в условиях суши, сейчас лежат на глубине 6500 футов ниже уровня моря. В буровой скважине на

Багамских островах с глубины 14 тысяч футов были получены осадочные породы мелководного происхождения. Вблизи верховья каньона Монтерей буровые скважины в долине Салинас показали существование древнего каньона с дном, залегающим на глубине 5 тысяч футов ниже уровня моря, этот древний каньон заполнен мелководными осадками миоценового возраста. Другими словами, во многих местах окраина суши в прошлом располагалась значительно выше. Очевидно, именно в этот период более высокого стояния суши и были врезаны многие каньоны, прежде чем произошло последующее погружение, сопровождавшееся отложением мощной осадочной толщи.

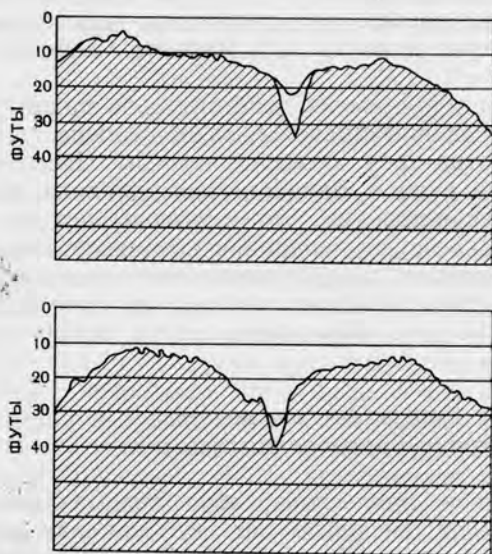
Если подводные каньоны действительно такие древние, как следует из приведенных данных, то не должно быть серьезных возражений против предлагаемой гипотезы. Несоответствие современных долин суши с большинством древних каньонов морского дна объясняется тем, что миллионы лет со времени погружения каньонов суша неоднократно подвергалась существенным преобразованиям вследствие эрозии и накопления осадков. Если все это верно, то остается только проблема, почему древние погруженные каньоны сохранились от захоронения.

*Оползни и суспензионные потоки
в свете теории образования каньонов*

Движение песка вдоль побережья близ Ла-Холья достаточно быстрое, чтобы за несколько лет верховья каньонов, проникающие на отмели очень близко к берегу, оказались полностью заполненными осадками. Мы наблюдаем за изменениями глубин в этих каньонах вот уже более двадцати лет, и нет никаких признаков такого заполнения. Это объясняется периодическими оползнями, происходящими в верховьях каньонов (фиг. 69). После оползней песок вновь очень быстро накапливается, но через некоторое время (примерно через год) снова происходит оползень и процесс начинается сначала. Оползни возникают как во время землетрясений, так и независимо от них. В 1949 г. во время работ по исследованию каньона Ла-Холья по контракту с отделом береговых исследований, у нас в гостях были сотрудники этого отдела. Во время завтрака на веранде в отеле «Ла Валенсия» от внезапного толчка землетрясения закачались столы. Испугавшись, что балюстрада балкона свалится нам на головы, мы поспешили удрать оттуда. Вскоре после этого, проводя исследования верховья каньона, мы обнаружили, что вдоль одного из контрольных профилей глубина внезапно достигла 16 футов. Донные осадки, по-видимому, оказались разжиженными в результате землетрясения и сползли, подобно

песчаным дюнам на побережье Зеландии в Нидерландах, иногда сползающим в Северном море.

В Редондо, вблизи Лос-Анжелеса, и в Мосс-Лендинге, в заливе Монтерей, пирсы были построены на самом краю подводных каньонов. Оба пирса оказались поврежденными в результате оползней. Не вызывает сомнения, что такие оползни удаляют осадки из подводных долин, не давая им заполниться.



Фиг. 69. Сравнение эхолотных профилей, полученных при повторных съемках верховьев подводного каньона Скрипса. Обратите внимание на заметное увеличение глубины каньона, произошедшее в период между съемками. Это связано с подводными оползнями, вызванными землетрясением.

В конечном счете такие перемещения осадков в верховьях подводных каньонов, по-видимому, вызывают активные суспензионные потоки. А они в свою очередь переносят осадки вдоль каньона, отлагая часть из них на дне котловин или ложбин, являющихся продолжением каньона. Деятельностью суспензионных потоков можно, вероятно, объяснить, тот факт, что каньоны простираются до подножия материковых склонов и за их пределы. Суспензионные потоки, вероятно, способны формировать неглубокие долинки в нижней части склона и промывать желобки, пересекающие поверхность растущих конусов выноса (см. фиг. 68). Именно эти желобки и создают впечат-

ление продолжения подводных каньонов в нижней части склона.

Таким образом, как устанавливают теперь наши исследования (или как по крайней мере это кажется мне), каньоны являются результатом древней речной эрозии во время более высокого положения побережий, медленного погружения материковых окраин и процессов, в течение длительного времени предохраняющих каньоны от захоронения осадками. Погруженные верховья каньонов, по-видимому, были разработаны в верхней части склона подводными оползнями, тогда как продолжения долин в нижней части склона — результат деятельности суспензионных потоков.

ГЛУБОКОВОДНОЕ ДНО ОКЕАНА

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мореходы времен Колумба и Магеллана не имели даже представления об океанских глубинах. Их сведения ограничивались лишь прибрежными глубинами. Магеллан все же пытался измерить глубину Тихого океана, что делает ему честь. Однако трос, которым он располагал, имел длину всего 200 саженей, а этого, конечно, было недостаточно. В 1840 г. Джеймс Кларк Росс впервые измерил действительно океанскую глубину. Он определил глубину около 2 тысяч саженей пеньковым тросом с грузом на конце. Это было тогда выдающимся достижением, но результат оказался не очень точным. Пеньковый трос, очевидно, растянулся под своим весом, и, кроме того, течение, вероятно, снесло корабль и вызвало изгиб троса. После 1870 г., когда лорд Келвин применил для этих целей стальную фортепьянную струну, растяжение троса удалось в основном устранить и измерения глубин стали более точными. Но даже в наши дни, когда мы располагаем мощными электрическими лебедками, требуются долгие часы, для того чтобы опустить грузы или инструменты на дно глубочайших впадин океана.

Не удивительно поэтому, что к 1923 г., когда эхолоты произвели революцию в исследованиях глубоких частей океанов, примитивными лебедками было сделано только около 15 тысяч глубоководных промеров.

Поразительно, что первые достаточно точные определения глубины океана были сделаны уже в 1856 г. косвенным путем. Физик А. Д. Баше подсчитал, что средняя глубина Тихого океана около 12 тысяч футов. В своих расчетах он исходил из того, что скорость распространения длиннопериодных волн меняется в зависимости от глубины. Он отметил время подводных землетрясений вблизи Японии, впервые зарегистрированных с помощью сейсмографов, и учел размеры волн на западном побе-

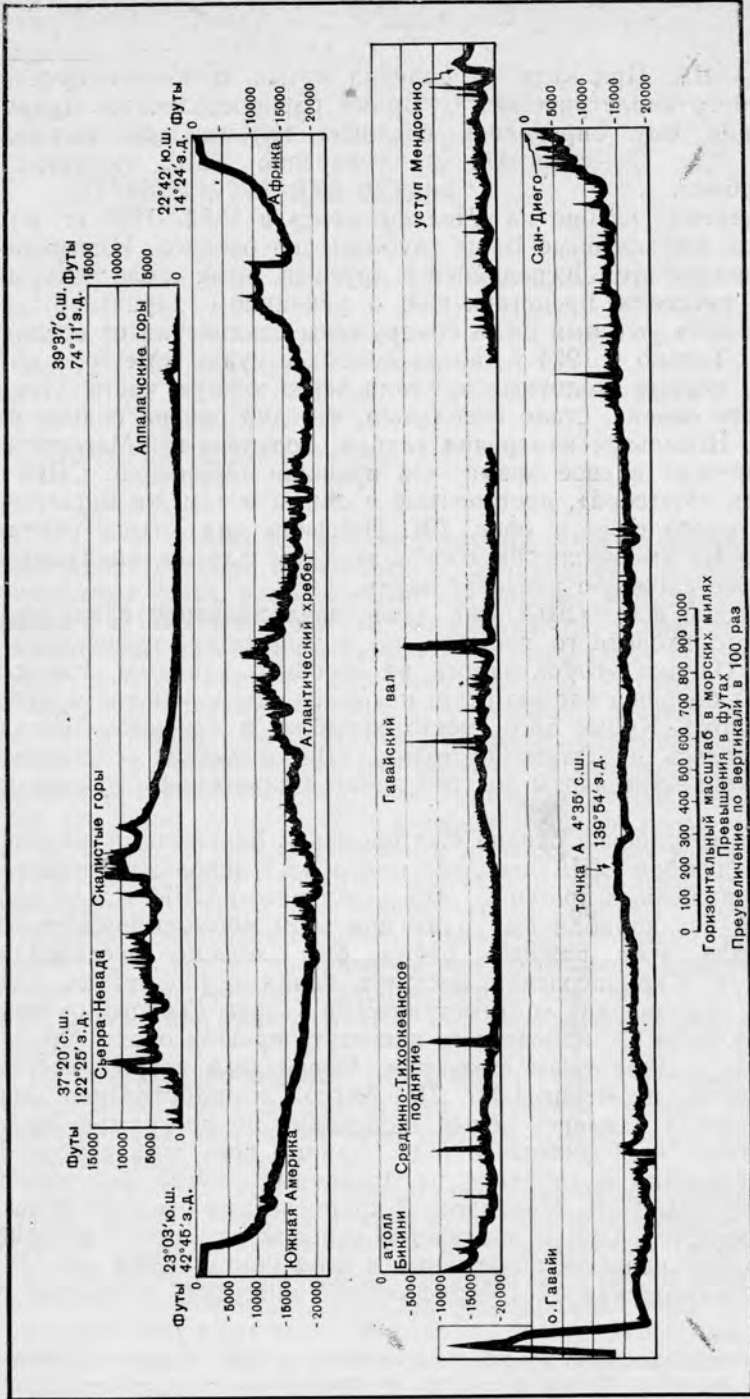
режье США. При этом он получил время прибытия цунами, вызванного землетрясением¹. Время распространения цунами позволило ему определить среднюю глубину, по формуле $C = gh$, где C — скорость, g — ускорение силы тяжести и h — глубина.

Измерения глубин на «Челленджере» в 1872—1876 гг. подтвердили вычисленные Баше глубины дна океанов. Измерения, выполненные этой экспедицией и другими, были столь редкими, что не рассеяли представления о равнинном характере дна океана, хотя уже ими были обнаружены отклонения от средних глубин. Только в 1924 г., когда немецкое судно «Метеор» проложило первые эхолотные профили через южную часть Атлантического океана, стало очевидным, что дно океана сильно неровное. Используя измерения глубин, полученные «Метеором», я обнаружил в свое время, что профили территории США и профили «Метеора», построенные в одном и том же масштабе, имеют много общего (фиг. 70). Профили дна Тихого океана, полученные американским военно-морским флотом, показывают такую же сложную расчлененность.

Морской флот США уже давно ввел практику проведения попутного эхолотного промера на большинстве транспортных линий. Однако это оказалось не особенно удачным, так как эхолоты большей частью были недостаточно налажены и работали плохо. Кроме того, место корабля в открытом океане определялось недостаточно точно. При попытках составлять батиметрические карты по этим данным гидрографы приходили в ужас.

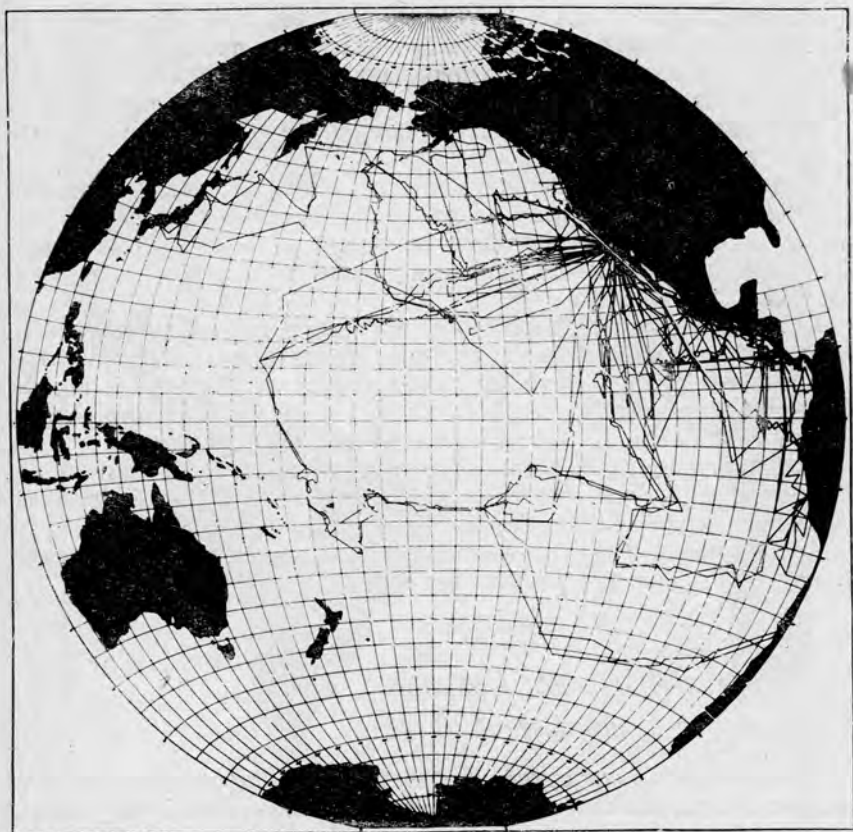
Один из районов океана был промерен Береговой и геодезической службой США довольно подробно с использованием хорошо налаженных приборов. Это район между США и Аляской. Каждый раз корабли выбирали при этом новые маршруты; в результате этот важный район был хорошо исследован. С 1950 г. Скриппсовский институт начал осуществлять программу составления батиметрической карты Тихого океана. К 1957 г. суда Скриппсовского института прошли около 300 тысяч миль с эхолотным промером. Океан был покрыт весьма густой сетью промеров (фиг. 71). Автор уже работал над этой книгой, когда начались новые экспедиции по программе Международного геофизического года. Данные всех этих рейсов, а также сведения о глубинах из различных других источников были собраны Г. В. Менардом (Скриппсовский океанографический институт). Они и послужили основой для представлений о подводном рельефе, излагаемых в этой книге. Рейсы «Атлантика» (Вудсхолский океанографический институт) и «Вимы» в

¹ Землетрясение само по себе не вызывает цунами. И землетрясения и цунами — результат образования сброса на дне океана.



Ф и г. 70. Сопоставление профилей дна Атлантического и Тихого океанов и материка Северной Америки. Соотношение горизонтального и вертикального масштабов 1 : 100.

Атлантическом океане также дали многочисленные данные о глубинах. Однако подробность изучения там не столь высока, как в Тихом океане.



Фиг. 71. Схема маршрутов экспедиций судов Скриппсовского института, выполнявших эхолотный промер в Тихом океане до 1957 г.

ТЕРМИНОЛОГИЯ ФОРМ РЕЛЬЕФА ДНА ОКЕАНА

Для большей части форм рельефа дна океана здесь будут применяться термины, содержащиеся в отчете Британского национального комитета, опубликованном в 1953 г. Однако иногда приходится оспаривать термины, предложенные комитетом. Кроме того, новейшие исследования обнаружили некоторые неизвестные ранее формы.

Поднятие и хребет определяются как вытянутые вздутия дна океана с пологими ровными склонами в случае поднятия и крутыми неровными — в хребте.

Подводные горы представляют собой отдельные возвышения на дне океана, поднимающиеся на 3 тысячи футов или более над дном. Если эти горы имеют плоские вершины, то их называют *гюйо*, или *столовыми горами*. Комитет предпочел второе название, но в практике употребляют преимущественно термин *гюйо* (в честь французского географа, открывшего их).

Подводные уступы представляют собой вытянутые крутые склоны на дне океана.

Котловины — это впадины на дне океана, имеющие более или менее изометрические очертания. *Желоба* — длинные и узкие депрессии с очень крутыми склонами. *Пучина* — самая глубокая часть какой-либо депрессии, если она глубже 3 тысяч саженей.

Шлейфы — слегка наклонные, покрытые осадками равнины, окаймляющие материковые склоны. Термин *материковое подножие* имеет примерно то же самое значение. *Островные шлейфы* — это термин, относящийся к окружающим океанские острова конусам выноса. Они не всегда покрыты осадками.

Глубоководные долины — вытянутые ложбины, неглубоко врезающиеся в поверхность многих шлейфов и иногда продолжающиеся в пределах котловин.

Абиссальные равнины — совершенно плоские поверхности, обнаруженные на дне многих котловин.

ДНО АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Срединно-Атлантический хребет

Срединно-Атлантический хребет (фиг. 72) протягивается по середине Атлантического океана, от Исландии на юг до точки, расположенной южнее мыса Доброй Надежды. Г. В. Менард отметил, что линия, равноотстоящая от материковых склонов обеих сторон Атлантического океана, соответствует оси Срединно-Атлантического хребта почти на всем его протяжении. Хребет возвышается примерно на милю над дном котловин, расположенных по обе стороны от него. Часто вершины хребта поднимаются над уровнем океана в виде островов, например Азорских, Св. Павла, Вознесения и Тристан-да-Кунья, но остальная часть хребта скрыта под водами океана. Остров Св. Елены, где провел свои последние годы Наполеон, расположен к востоку от хребта в южной части Атлантического океана.

Легенду о затонувшей Атлантиде, записанную греческим философом Платоном, до сих пор поддерживают некоторые увле-

кающиеся геологи и археологи. Существование Срединно-Атлантического хребта представляется им доказательством этой легенды. Однако сколько-нибудь серьезное ознакомление



Фиг. 72. Важнейшие формы рельефа дна Атлантического океана. Размеры желобов несколько преувеличены.

с самой легендой показывает, что ученым не следует поддерживать ее. Атланты, как сообщают греческие рукописи, жили где-то за Геркулесовыми столбами, то есть за Гибралтарским проливом. В легенде могли подразумеваться при этом какие-либо острова или даже африканское побережье. Предполагаемое

исчезновение их могло в действительности объясняться тем, что древние мореплаватели не могли найти место, с которого они вышли. Не получены еще пока доказательства того, что Срединно-Атлантический хребет выступал над уровнем воды, по крайней мере в последние миллионы лет.

Исследования Вудсхолского института, Ламонтской геологической обсерватории и Британского национального океанографического института показали поразительную сложность рельефа хребта, особенно к югу от Азорских островов. На профилях через хребет видно множество гор и долин, подобно тому как это можно воочию наблюдать при полете над Скалистыми горами. На склонах хребта расположены террасоподобные плоские ступени. Сначала их считали террасами, врезанными волнами в подводную горную цепь. Однако вскоре обнаружили, что они покрыты толстым слоем осадков. Поэтому теперь террасы объясняют как результат заполнения отложениями суспензионных потоков котловин, отгороженных хребтами. Точно так же заполняются осадками искусственные водохранилища, замкнутые плотинами.

Англичане, по-видимому, первыми заметили интересную особенность Срединно-Атлантического хребта. Работая на Азорских островах, они обнаружили желоб с крутыми склонами, протягивающийся вдоль оси хребта. Он имеет плоское дно шириной несколько миль, а глубины в нем на протяжении нескольких сотен миль почти не изменяются. Он очень похож на огромную долину, называемую бороздой Скалистых гор, идущую между горными хребтами северной Монтаны через Британскую Колумбию и дальше через территорию Юкатана к Аляске. Она совпадает на отдельных отрезках с долинами Кутини, Колумбии и других больших рек Северо-Запада. Осевой желоб Срединно-Атлантического хребта стали рассматривать как форму рельефа планетарного масштаба, после того как М. Юинг и Б. Хейзен сообщили, что, по их данным, он не только прослеживается на всем протяжении Срединно-Атлантического хребта, но, вероятно, продолжается вокруг мыса Доброй Надежды в Индийский океан. Там одна ветвь его якобы протягивается в Аравийское море, а другая — вокруг Австралии в восточную часть Тихого океана. Общая протяженность ее достигает 40 тысяч миль. Однако потребуется много новых измерений глубин, чтобы доказать это предположение. Уже изученная часть желоба является зоной многочисленных землетрясений и, по всей вероятности, представляет собой рифтовую, образованную сбросами долину.

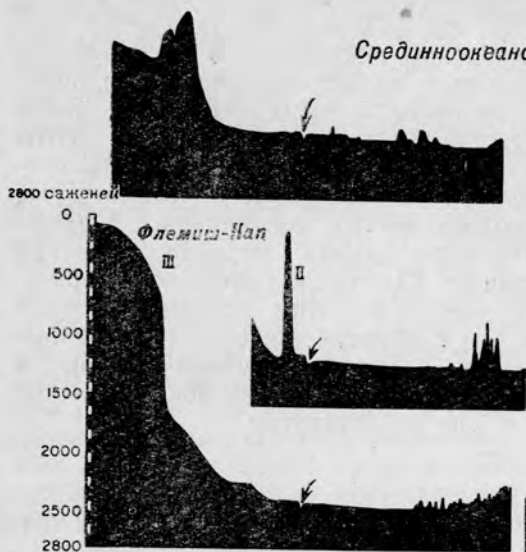
Кроме Срединно-Атлантического хребта, в Атлантическом океане известны поперечные хребты и поднятия, связанные либо с материками, либо со Срединно-Атлантическим хребтом. На севере Исландско-Фарерское и Гренландско-Исландское

поднятия образуют мелководный порог между Европой и Гренландией с глубинами около 400 саженей. На западе он продолжается Баффино-Гренландским поднятием. В южной части Атлантического океана Китовый хребет связывает Срединно-Атлантический хребет с Африкой, а последний через плато Бромлей соединяется с Южной Америкой. Однако эти хребты расположены на большой глубине. Эти поперечные хребты позволили Б. Виллису, профессору Станфордского университета, выдвинуть идею о материковых мостах, соединявших в прошлом обе стороны Атлантического океана, подобно тому как Панамский перешеек соединяет Южную и Северную Америку. Виллис предположил, что именно по этим мостам животные переселились через океан, чем и объясняется сходство ископаемой фауны Северной Америки и Европы, с одной стороны, и Южной Америки и Африки — с другой. Однако доказательства существования этих мостов еще недостаточны.

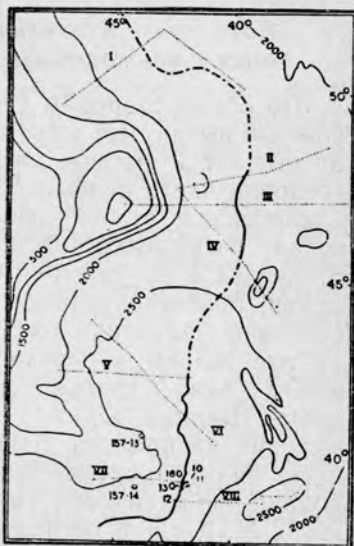
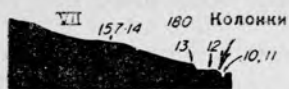
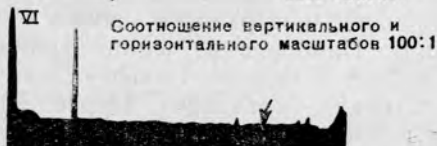
Котловины Атлантического океана и их глубоководные долины

По обеим сторонам Срединно-Атлантического хребта расположены вытянутые широкие котловины, их глубина в основном превышает 2 тысячи, иногда 3 тысячи саженей. Днища этих котловин часто необыкновенно плоские. Поверхность их полого наклонена в сторону максимальных глубин. Несколько лет назад сотрудники Ламонтской геологической обсерватории Б. Хейзен и Д. Нортроп обратили внимание на существование долин, протягивающихся по полого наклонным равнинам дна котловин Атлантического океана (фиг. 73). Эти долины имеют крутые склоны и плоские днища, углубленные на 10—100 саженей ниже уровня окружающей поверхности океанского ложа. Ширина долин 3—5 миль. Наиболее изученная долина выходит из пролива Дэвис, огибает Большую Ньюфаундлендскую банку и спускается в глубокую котловину Нарес. Эта долина, по-видимому, тянется непрерывно на несколько сотен миль. М. Юинг и группа его сотрудников объясняют происхождение этих долин размыванием дна суспензионными потоками. Со дна этой долины им удалось получить колонку с песчаными прослоями, что подтверждает предположение о суспензионных потоках, которые устремлялись вдоль долины. С другой стороны, тот факт, что эти глубоководные долины расположены примерно параллельно рифтовой долине Срединно-Атлантического хребта, несомненно тектонического происхождения, наводит многих геологов на мысль о тектонической природе и на дне котловин. Суспензионные потоки могли перемещаться вдоль такой зоны трещин, откладывая песок на ее дне.

Срединноокеанский каньон



Другие вероятные срединноокеанские каньоны



Колонки осадков 180 ю

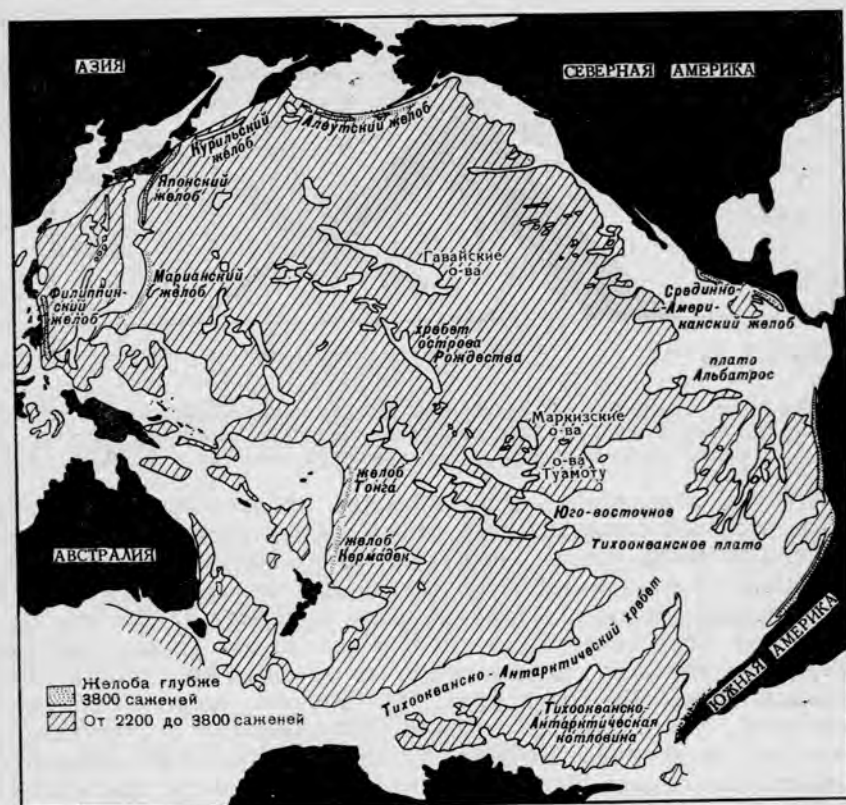


Фиг. 73. Системы глубоководных долин в Атлантическом океане. Профили составлены по эхোগраммам.

ДНО ТИХОГО ОКЕАНА

Желоба и максимальные глубины океана

Для дна Тихого океана в отличие от Атлантического в большей мере характерны не подводные хребты, а цепочка глубоководных желобов, окружающая этот величайший из океанов



Фиг. 74. Важнейшие формы рельефа дна Тихого океана. Размеры желобов слегка преувеличены.

Земли (фиг. 74, 77). В Атлантическом океане есть только четыре таких желоба, да и то небольших: два близ островов Вест-Индии, один к востоку от Срединно-Атлантического хребта вблизи экватора (желоб Романш) и один вблизи Антарктиды. Некоторые желоба Тихого океана имеют длину до 2500 миль (например, Перуанско-Чилийский желоб), и с ними связаны наибольшие глубины океана. Еще несколько лет назад считали, что максимальная глубина (5738 саженей) наблюдается в же-

лобе Минданао; теперь полагают, что самой большой является глубина «Челленджер» — 5936 саженей, открытая англичанами в Марианском желобе¹, а второй по величине — глубина «Хорайз» — 5936 саженей в желобе Тонга, открытая Скриппсовским институтом. Возможно, что к ним очень близка по величине глубина «Рамапо» в Японском желобе. Впрочем, измерения глубин в одном из последних рейсов судов Скриппсовского



Фиг. 75. Сравнение профилей горы Джомолунгма (Эверест) и желоба Тонга. Оба профиля построены в одинаковом масштабе. Соотношение горизонтального и вертикального масштабов 1:16.

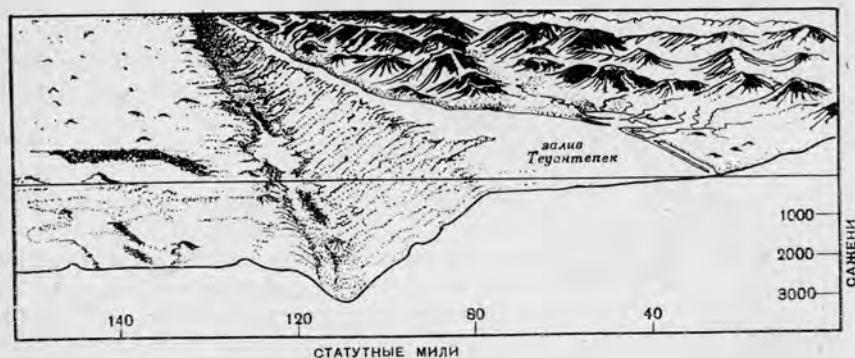
института поколебали наши прежние представления. Оказалось, что 5500 саженей — вероятный предел глубин в этом желобе. Советские ученые сообщили о глубине 5670 саженей, открытой «Витязем» в Курильском желобе, и это позволяет относить Курильский желоб к числу наиболее глубоких.

Яркое представление о глубине желобов Тихого океана можно получить из сравнения размеров горы Эверест (Джомолунгма) и желоба Тонга (фиг. 75). Желоба, расположенные в западной части Тихого океана, несомненно, представляют величайшие впадины поверхности Земли. Однако и на восточной стороне океана Перуанско-Чилийский желоб (с максимальной глубиной 4214 саженей) углублен относительно вершины горного хребта Анд примерно на 42 тысячи футов.

Лучше всего исследован Центрально-Американский желоб, протягивающийся на юг от южной оконечности Калифорнийского залива почти до Панамы. По результатам промера, выполненного главным образом Р. Л. Фишером (Скриппсовский институт), была составлена батиметрическая карта этого желоба. Желоб имеет V-образный профиль, но местами его дно

¹ Советские океанографы недавно обнаружили в этом желобе глубину 6 тысяч саженей (точнее, 11 022 м). — Прим. ред.

плоское, шириной несколько миль. Используя метод сейсмического зондирования, Фишер и Шор определили, что участки плоского дна желоба подстилаются толстым слоем осадков, отсутствующих в тех местах, где профиль желоба V-образной формы. Внутренний склон желоба рассеян несколькими подводными каньонами. Судя по имеющимся данным, эти каньоны не доходят до дна желоба, на котором на различной глубине



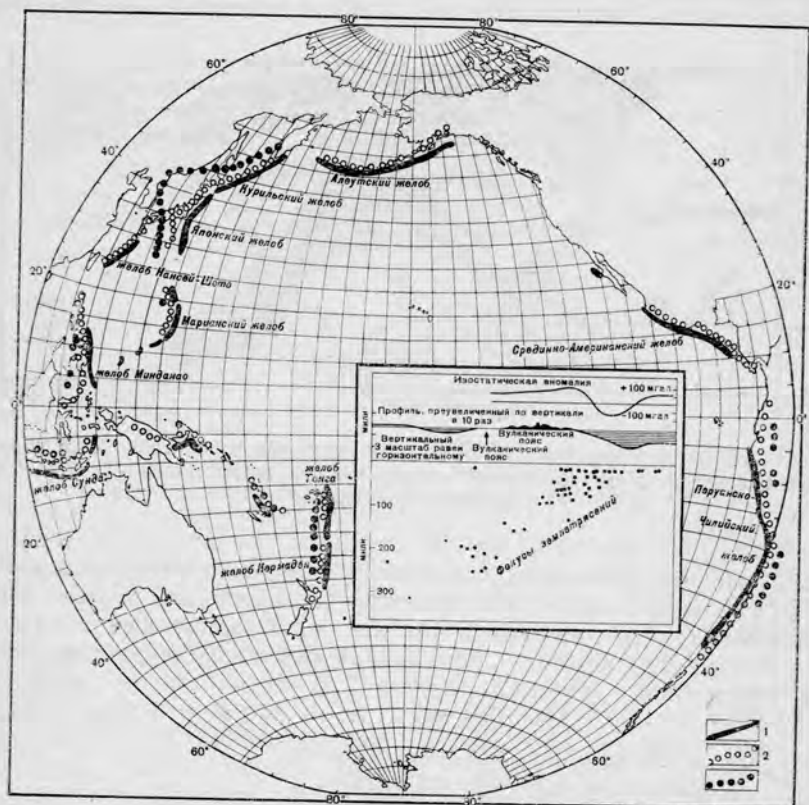
Фиг. 76. Блок-диаграмма Центрально-Американского желоба близ западного побережья Мексики. Холмы и горы на дне океана представляют собой подводные вулканы.

расположены котловины; однако ни одна из них не превышает 3700 саженей. Можно предполагать, что несколько холмов, поднимающихся со дна, представляют собой подводные вулканы. На фиг. 76 приводится блок-диаграмма желоба в районе залива Теуантепек.

*Связь желобов с землетрясениями,
вулканами и островными дугами*

На тесную связь желобов с землетрясениями и вулканами уже обращали внимание Г. Хесс (Принстонский университет), Б. Гутенберг и Ч. Рихтер (Калифорнийский институт) и другие. Не вызывает сомнения, что желоба — следствие тектонических движений, видимо сбросов. Землетрясения отмечаются вдоль желобов чаще, чем в любых других местах Земли. В самих желобах все толчки происходят на небольшой глубине, где-то в пределах земной коры. Однако по мере продвижения от желобов в сторону суши глубина очагов землетрясений увеличивается. На расстоянии около 200 миль от желобов землетрясения становятся глубокофокусными — глубины их очагов превышают 200 миль (фиг. 77).

Такая взаимосвязь, по-видимому, характерна для всех желобов мира. Интересно, что там, где глубина очагов землетрясений не возрастает по направлению к суше, желоба отсутствуют. Очевидно, под край материка здесь погружается огромная зона разлома (фиг. 77).



Фиг. 77. Связь глубоководных желобов с землетрясениями, вулканическими поясами и аномалиями точек земного тяготения. На врезке показан разрез через Японию.

1 — желоба; 2 — среднефокусные землетрясения; 3 — глубокофокусные землетрясения.

Цепочки вулканов протягиваются параллельно многим желобам, располагаясь примерно в зоне промежуточных землетрясений. Точно так же располагаются дугообразные цепочки островов (островные дуги), например Алеутские, Курильские и Марианские острова. При этом все они лежат на выпуклой стороне дугообразно изогнутых желобов. Острова этих дуг в основном вулканические. Измерения силы тяжести показали

еще одну характерную особенность глубоководных желобов (фиг. 77). Под всеми этими желобами, где были произведены измерения силы тяжести с подводных лодок, обнаружены огромные отрицательные аномалии силы тяжести¹. Создается впечатление, будто здесь под желобом пустота! Поскольку этого, конечно, не может быть, то предполагают, что здесь существует глубокий прогиб земной коры, сложенный относительно легкими породами. Возможно, что кора прогнулась под действием сил горизонтального сжатия. Такая идея была высказана Венинг-Мейнесом, но оспаривается, впрочем, М. Юингом и другими.

Подводные горы и гюйо Тихого океана

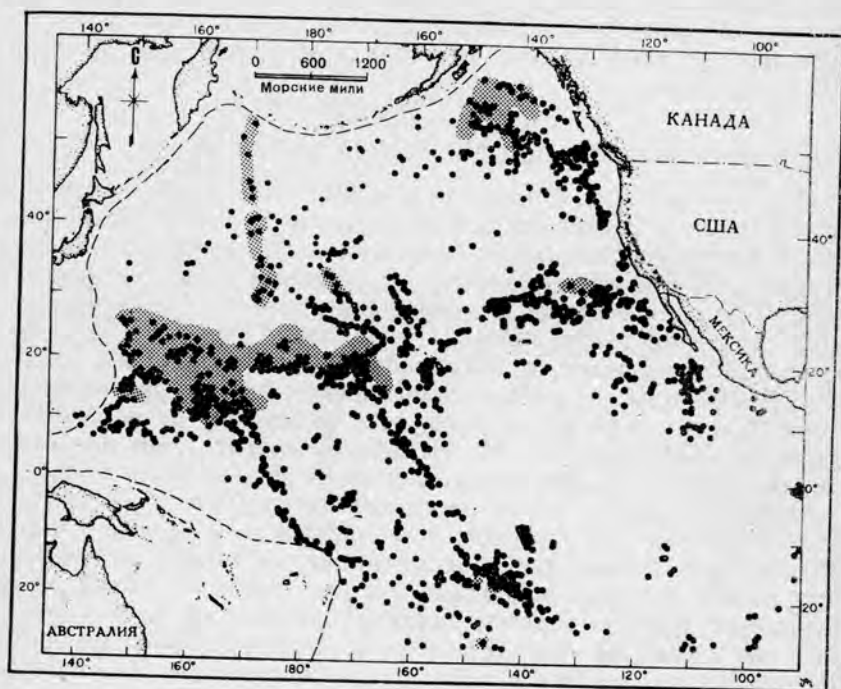
Подводные горы и плосковершинные гюйо встречаются и в Атлантическом океане, но там их немного. В Тихом океане подводные горы необыкновенно многочисленны. Гюйо встречаются несколько реже и, по-видимому, в основном вдоль трех линий (фиг. 78): одна — это подводные горы к югу от Камчатки; другая — поднятие Маркус-Некер, западнее Гавайских островов; третья протягивается от Марианских до Маршалловых островов. Кроме того, 10 гюйо в Аляскинском заливе расположены столь близко одно от другого, что, возможно, располагаются вдоль параллельных линий. Несколько других гюйо представляют собой отдельные горы. Плоские вершины гюйо лежат на различной глубине, но в западной части Тихого океана — в среднем около 800 саженей, а в Аляскинском заливе — около 500 саженей. Если принять во внимание все острова, мелководные банки и рифы, подводные горы и гюйо, то Тихий океан буквально «набит» горами, поднимающимися на тысячи футов над его дном (см. фиг. 78). Многие из белых пятен на карте Тихого океана, несомненно, будут вскоре стертые — ведь каждая экспедиция, проходящая в неисследованных водах, сопровождается открытием новых подводных гор. Правда, новые гюйо обнаруживают редко и большей частью в тех районах, где они уже были известны.

Происхождение подводных гор и гюйо

Существование в океане подводных гор уже давно не тайна. Еще во время плавания на «Бигле» Дарвин правильно оценил значение вулканизма в океане. Вулканические извержения на дне океана могли создать горы так же, как и на суше. Однако,

¹ Большой вклад в эти исследования внесли Венинг-Мейнес (Нидерланды), Дж. Ламар Ворзел и Г. Л. Шорбет (Ламонтская геологическая обсерватория).

когда извержения происходят на большой глубине, из-за огромного давления воды они не обладают такой взрывной силой, как на небольшой глубине или над поверхностью воды. Кроме того, на дне лава остывает быстрее и образует более крутые склоны. Породы, собранные на океанских островах или поднятые драгой с подводных гор, почти на 100% состоят из вулканического материала. Это главным образом темные лавы — базальты.



Фиг. 78. Горы, поднимающиеся над ложем Тихого океана на высоту 3 тысяч и более футов в виде островов, рифов, подводных гор и гюйо. Большинство гор в заштрихованных районах представляют собой гюйо.

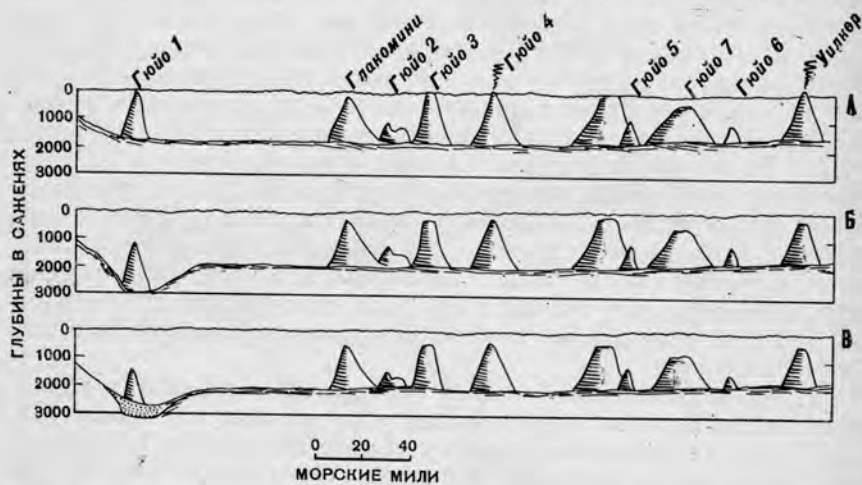
Гюйо — серьезная загадка. Известно, что некоторые вулканы имеют плоскую вершину вследствие того, что их кратер заполнен лавой. Однако большинство вершинных кратеров — неровные, и не так-то просто превратить их в плоские плато. Кроме того, на склонах некоторых подводных гор имеются террасы, которые не могут быть объяснены вулканизмом. По-видимому, более вероятно, что плосковершинные подводные горы когда-то находились близко к поверхности воды или даже выступали над ней. Волны при этом могли врезать террасы на склонах молодых вулканов за очень короткий период. Ведь

молодые вулканы сложены сыпучим пеплом и вулканическим шлаком, которые быстро поддаются воздействию океанских волн. Тот факт, что глубина краев вершин гюйо несколько больше, чем в середине, явно указывает на волновую абразию. В тропических районах дальнейшее выравнивание абразионной платформы возможно благодаря росту коралловых рифов (см. гл. X). Большинство таких рифов имеет, однако, приподнятые (как у кратера) края. Опускание плосковершинных коралловых банок обычно сопровождается ростом кольца коралловых рифов по их краю. Это наблюдается даже в тех случаях, когда погружение было быстрым и рост кораллов не мог его компенсировать. Поэтому, если бы гюйо действительно были погруженными коралловыми рифами, мы обнаружили бы такие кольца, но пока что они не найдены. Склоны рифов, как правило, значительно круче, чем верхние части склонов гюйо. Это также свидетельствует в пользу гипотезы об опущенных рифах. С другой стороны, кораллы действительно росли на некоторых гюйо. Во время экспедиций Скриппсовского института и Лаборатории электроники военно-морского флота США с двух гюйо были подняты драгой обломки древних кораллов. Вполне возможно, что гряды островов — атоллов, подобных Маршалловым островам и островам Гильберта, покоятся на вершинах вулканических гор. Может быть, они стали бы гюйо, если бы по мере их погружения изменились условия, необходимые для роста кораллов.

Предположим, что большая часть гюйо — результат волнового выравнивания и погружения абразионных платформ. Однако как же объяснить причину самого погружения? Есть две гипотезы, заслуживающие внимания. Одна предполагает, что произошло общее погружение крупных блоков земной коры по линиям разломов; согласно другой, погрузились сами гюйо. Первая гипотеза была выдвинута Г. Хессом, впервые обратившим внимание на гюйо. Он полагал, что они были островами, срезанными абразией еще в докембрии. Осадконакопление в океанах с тех пор было достаточным, чтобы вызвать поднятие уровня воды и одновременное прогибание земной коры. Эта идея встретила два возражения. Во-первых, время срезания вершин по крайней мере некоторых гюйо сейчас уже определено по остаткам кораллов и фораминифер, собранных с их поверхности. Кораллы с гюйо к западу от Гавайских островов определены Е. Л. Гамильтоном (Лаборатория электроники военно-морского флота США) как меловые. Мелководные фораминиферы с гюйо, расположенного близ Калифорнии, отнесены несколькими калифорнийскими микропалеонтологами к миоцену. То же справедливо для гюйо вблизи Ньюфаундленда. В обоих случаях поверхности гюйо должны были находиться над уровнем океана значительно позднее, чем в докембрийское время.

Кроме того, как будет показано в гл. X, маловероятно, чтобы осадочный покров на дне океана имел толщину, необходимую по гипотезе Хесса.

Р. Ревелл (Скриппсовский океанографический институт) предположил, что уровень океана повысился совсем недавно, с конца мела, в результате лавовых излияний, выделивших огромное количество газа, сконденсированного в виде воды. Дно океана само по себе опустилось при этом вследствие перемещения газа, а уровень моря поднялся, кроме того, в результате увеличения объема воды в океане. В качестве аргумента, подтверждающего эту гипотезу, Ревелл ссылается на огромные количества известковых отложений, накопленных начиная с



Фиг. 79. Схема развития подводных гор и гюйо в Аляскинском заливе. А — крайняя слева подводная гора расположена примерно на том же самом уровне, что и другие. Б — гора опустилась ниже прежнего уровня вследствие прогибания Алеутского желоба. В — гора опустилась еще ниже и оказалась частично захороненной осадками, скапливающимися на дне желоба.

мелового периода. Очевидно, было время, когда глобигериновые илы и другие известковые осадки покрывали большую часть дна океана. Накопление такого огромного количества карбоната кальция было возможно только при условии поглощения живыми организмами колоссальных объемов углекислого газа, а поступление его в свою очередь возможно лишь при интенсивнейшей вулканической деятельности.

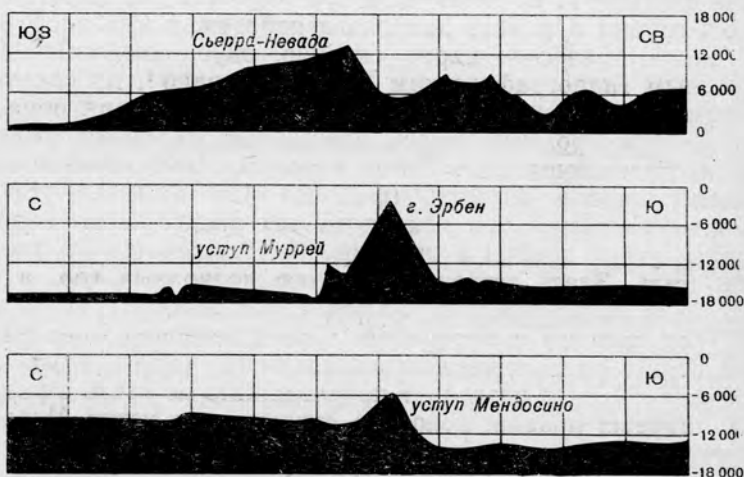
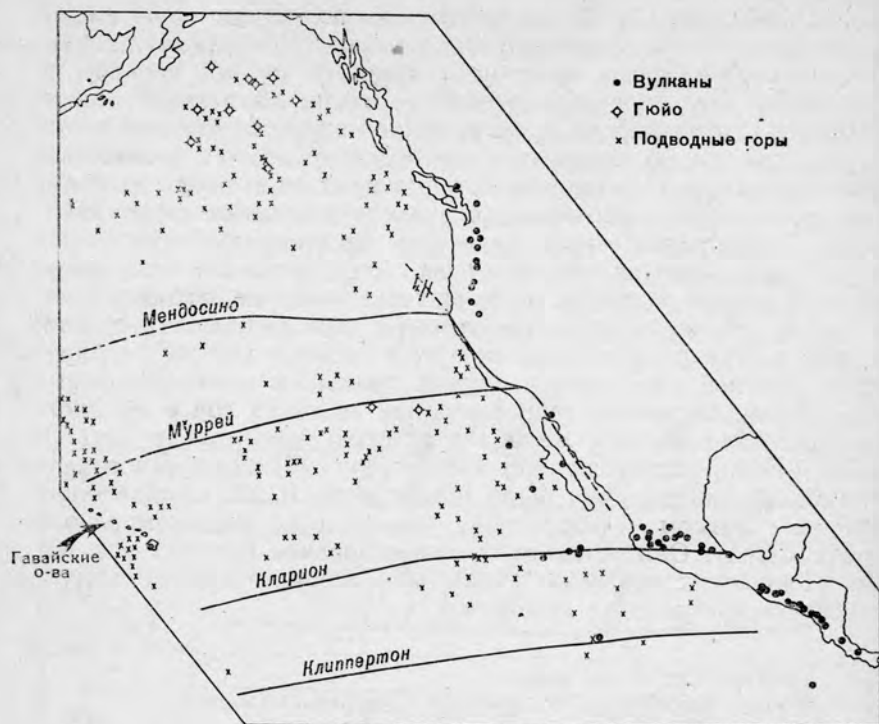
Поддерживаемая Менардом гипотеза регионального опускания гюйо как будто бы подтверждается тем фактом, что плосковершинные подводные горы группируются большей частью в линейные ряды.

Ведь обычные, не плосковершинные, подводные горы широко распространены по всему Тихому океану. Если предполагать, что в меловое время произошел какой-то резкий перелом в ходе всего геологического развития Земли, вызвавший общее поднятие уровня океана и погружение островов, то гюйо были бы разбросаны по океану так же бессистемно, как и обычные подводные горы. Однако это не так, и вряд ли все горы вообще, а не только одни гюйо были погружены в меловое время. Очевидно, правильный ответ на вопрос о происхождении гюйо можно дать, сочетая обе гипотезы. Действительно, если говорить об океане в целом, то вершины гюйо не находятся на одном и том же уровне, но вместе с тем в пределах одного района всегда расположены почти на одной и той же глубине. Гюйо Аляскинского залива служат реальным подтверждением прогибания, поскольку вершина одной из таких гор в молодом прогибе Аляскинского желоба находится значительно глубже вершин гюйо, расположенных южнее (фиг. 79). Другое подтверждение прогибания дна было обнаружено Е. Л. Гамильтоном и Р. С. Дитцем (Лаборатория электроники военно-морского флота США). Они установили существование прогиба дна вокруг Гавайских островов, вызванного весом огромного вулканического хребта этих островов.

*Хребты или зоны разлома
вблизи западного побережья Северной Америки*

Одно из наиболее удивительных открытий за последние годы сделано Г. В. Менардом при изучении результатов измерения глубин в районе западного побережья Северной Америки. Батиметрические карты океанов, опубликованные Международным гидрографическим бюро в Монако¹, не показывают в этом районе ничего интересного, однако Менард обнаружил там четыре огромные полосы необычайно расчлененного рельефа, протягивающиеся в Тихий океан на 1600—3000 миль при средней ширине 60 миль (фиг. 80). Он называл эти пояса «зонами разлома», так как вдоль них расположены сбросовые уступы, узкие хребты и грабены. Протяженность их достигает 1000 миль. Здесь встречается много подводных гор, а также несколько вулканических островов. По крайней мере три из этих зон связаны с материком. Самая северная, зона разлома Мендосино, расположена непосредственно около уступа Горда (см. фиг. 52), что позволяет предположить ее связь с разломом Сан-Андреас; правда, довольно странно, что уступ Мендосино, в некоторых местах достигающий мили высотой, обращен к

¹ Эти карты устарели, и сейчас не существует организации, которая поддерживала бы их на современном уровне.



Фиг. 80. Распространение подводных гор и гюйо в северо-восточной части Тихого океана. Горные гряды протягиваются в океан с западного побережья Северной Америки. Обратите внимание на сходство профиля Сьерра-Невады с двумя профилями подводных гор. Вертикальный масштаб в футах. Вертикали проведены через 10 миль.

югу, в то время как уступ Горда — к северу. На северной стороне этого подводного уступа находится узкий гребень. Благодаря своей огромной протяженности и прямолинейности эта зона разлома дает прекрасную возможность для определения места корабля в открытом море. К югу от зоны разлома Мендосино глубины океана примерно на 500 саженей больше, чем к северу от нее.

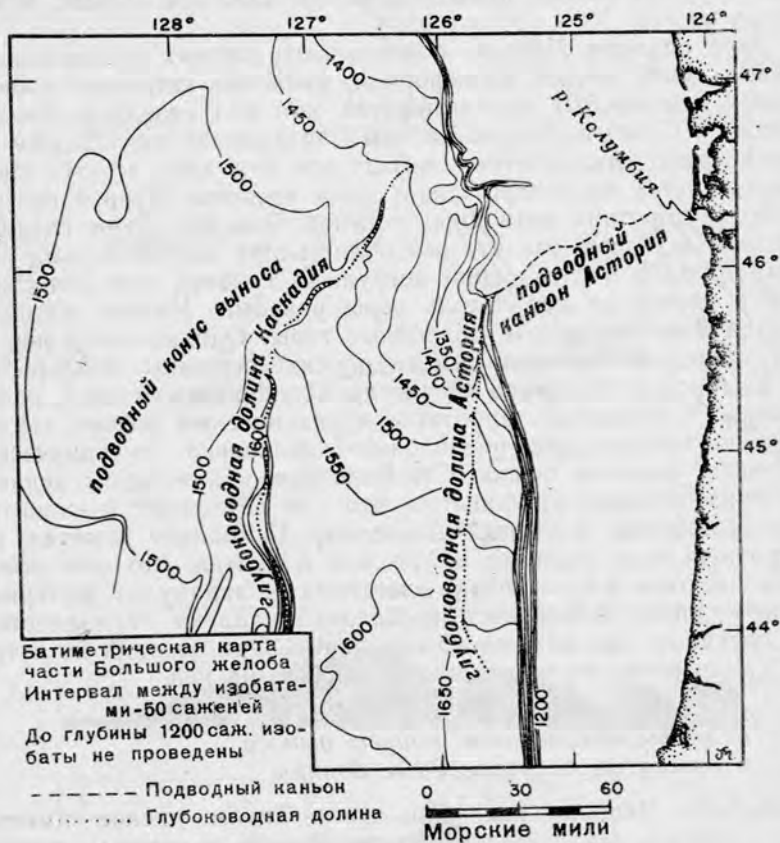
Зона разлома Муррея, по-видимому, служит продолжением горных цепей южной Калифорнии, имеющих широтное простирание. Эти хребты протягиваются как раз севернее Лос-Анжелеса и Санта-Барбары. Разлом Сан-Андреас здесь также довольно резко отклоняется к западу (см. стр. 125), а затем снова продолжается на северо-запад. Зона разлома Муррея состоит из более коротких подводных уступов. Они обращены главным образом к северу, так что вся область дна между зонами разлома Муррея и Мендосино погружена глубже, чем области с юга и севера от нее. Вдоль зоны разлома Муррея располагаются многочисленные подводные горы. Однако лишь две из них, вблизи Калифорнии, имеют плоские вершины. Зона разлома Клариион исследована значительно хуже. Она связана, по-видимому, с огромным широтным вулканическим поясом южной Мексики. Вдоль нее расположено несколько вулканических островов, включая остров Сан-Бенедикто, на котором недавно было извержение. Любопытно, что 150 лет назад знаменитый путешественник и ученый Александр Гумбольдт заметил эту широтную зону разлома в Мексике и считал, что она может продолжаться на островах, известных к западу от материка. Зона разлома Клиппертон исследована далеко не полностью, но, очевидно, она похожа на остальные. Она названа по острову Клиппертон, расположенному как раз на ней.

Шлейфы архипелагов, конусы выноса и изогнутые глубоководные долины

Работы Менарда показали, что в Тихом океане имеется много полого наклоненных равнин. Вокруг некоторых архипелагов он обнаружил шлейфоподобные выровненные склоны. Он назвал их шлейфами архипелагов, или островными шлейфами. Они образованы, видимо, главным образом потоками лавы, стекавшей с островов или поступившей при трещинных излияниях на их подводных склонах. В некоторых местах лавовые поверхности покрыты современными осадками, а местами лава, вероятно, обнажается непосредственно на склоне.

Вблизи многих крупных рек западного побережья США, по-видимому, существуют полого наклоненные конусы выноса, часто смыкающиеся; они прорезаны глубоководными долинами, которые протягиваются в глубокие части котловин (фиг. 81).

Эти конусы подобны огромным шлейфам, окаймляющим материковые склоны Атлантического океана. Судя по образцам донных осадков, они сложены отложениями суспензионных потоков. Вероятно, и глубоководные долины также связаны с суспензионными потоками (см. стр. 35). Любопытно, что все



Фиг. 81. Русла на поверхности глубоководных конусов выноса (вблизи устья реки Колумбия).

эти долины изгибаются влево, так что проходят по южной или восточной части конуса. Это характерно также и для большинства долин, расположенных на меньших глубинах и являющихся продолжением небольших подводных каньонов южной Калифорнии. Менард предположил, что такой изгиб русел влево — результат вращения Земли, заставляющего течения в северном полушарии поворачивать вправо (например, Гольфстрим). Поворот суспензионных потоков на дне вправо вызы-

вает более интенсивное осадконакопление на северной стороне конуса, так что в конце концов русло смещается влево, то есть на юг. Это предположение вызывает интерес, но, конечно, нуждается в более убедительном подтверждении. Следует поискать такие долины вдоль других побережий и в южном полушарии, например вблизи каньона Конго, так как вращение Земли создает к югу от экватора противоположный эффект.

НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О РЕЛЬЕФЕ ДНА ОКЕАНА

Примеры различных типов подводного рельефа, приведенные выше, относятся к двум самым большим и наиболее изученным океанам — Тихому и Атлантическому. Другие океаны достигают почти такой же глубины: она превышает 2 тысячи саженей. Предварительное изучение Индийского океана показывает, что для него характерны многие из тех форм рельефа, которые известны в Тихом и Атлантическом океанах. В нем существует, например, огромный срединный хребет, протягивающийся через весь океан в Аравийское море, а также многочисленные поперечные хребты. Северный Ледовитый океан также имеет по крайней мере один главный хребет. Измерения глубин, выполненные Советским Союзом, показали, что он протягивается от Новосибирских островов к острову Элсмир, лежащему западнее Гренландии. Глубокие внутренние моря — Мексиканский залив, Карибское, Средиземное и Черное моря — по своим глубинам вполне сопоставимы с океанскими котловинами. На огромных пространствах их глубины превышают 2 тысячи саженей. Дно Мексиканского залива и Черного моря почти плоское, в то время как в Средиземном и Карибском морях имеются многочисленные хребты и котловины.

Три величайших океана имеют следующие средние глубины:

Океан	Глубина, исключая внутренние моря, саженей	Глубина, включая внутренние моря, саженей
Тихий	2340	2200
Атлантический	2150	1820
Индийский	2180	2140

Из сопоставления этих средних значений следует исключительно интересный вывод: оказывается, что Тихий океан с его глубочайшими желобами ненамного глубже Атлантического и Индийского, которые не имеют желобов. Нельзя не заметить, что все океанские котловины, включая краевые моря, примерно одинаковой глубины и, таким образом, по-видимому, одного и

того же происхождения. Сейсмические исследования, описанные в гл. IX, показывают, что образование океанских котловин и материковых поднятий связано с глубокими различиями в строении земной коры.

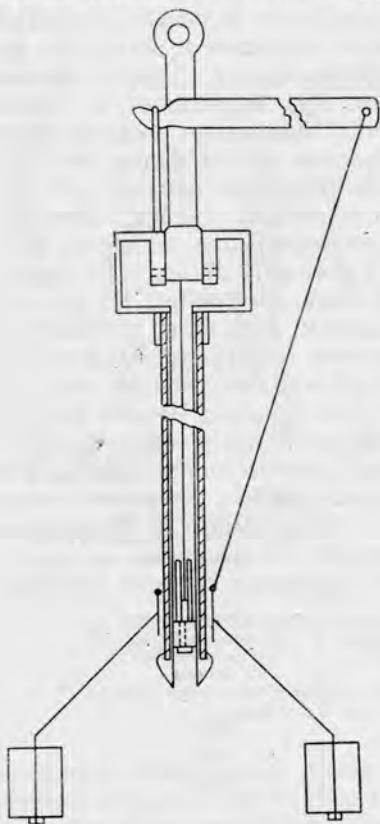
ОСАДКИ НА ДНЕ ОКЕАНА

Приборы для взятия колонок донных осадков

Колонки осадков со дна океана берут со времен экспедиции на «Челленджере», в 1872—1876 гг. Правда, длина первых колонок была всего около фута. В нашем столетии вплоть до

конца второй мировой войны было получено только несколько колонок из глубоких частей океана. (В большинстве во время работ немецкой экспедиции на «Метеоре».) Исследователи Вудсхолского океанографического института, работавшие на судне «Атлантик», стали получать в различных частях Атлантического океана колонки длиной примерно до 10 футов. В 1929—1930 гг. экспедиция на «Снеллиусе» собрала пробы донных осадков в глубоких котловинах индонезийских морей. Шарль Пигго (Национальный исследовательский совет США) получил колонки длиной до 10 футов, используя нечто вроде пушки, стрелявшей в грунт трубкой. Однако эта трубка-пушка слишком часто стреляла не вовремя и надела немало пробоин в обшивке корабля, так что от нее очень быстро отказались.

Во время второй мировой войны Б. Кулленберг, возглавляющий сейсчас Океанографический институт в Гётеборге (Швеция), использовал принцип двигающегося поршня. Он создал конструкцию трубки, которая настолько проста, что



Фиг. 82. Схема устройства поршневой грунтовой трубки Кулленберга. По бокам трубки видны грузы-разведчики. Поршень находится внутри трубки. Для сокращения размеров схемы она разорвана в середине.

многие ученые-океанографы были поражены, как они сами не додумались до этого раньше (фиг. 82). Поршневая трубка имеет груз-разведчик, который подвешен на сбрасывателе. В тот момент, когда груз-разведчик достигает дна, сбрасыватель освобождает грунтовую трубку. При этом она свободно падает вниз и вонзается в толщу осадков. В это время поршень внутри трубки почти останавливается. Лебедка на палубе корабля затормаживается, когда напряжение троса резко уменьшается, указывая на то, что огромный груз сброшен с троса¹. Это предотвращает запутывание троса на дне. Грунтовая трубка свободно движется относительно поршня, который связан с тросом и остается неподвижным. Поршень значительно уменьшает трение колонки грунта о трубку. Именно этот принцип используется во многих типах буров для взятия образцов почвы на суше. В глубинах океана огромное гидростатическое давление, возрастающее на 1 фунт на 1 кв. дюйм на каждые 2 фута глубины, действует как дополнительная сила, помогающая грунтовой трубке вонзиться в толщу осадков. Трубка Кулленберга — один из многочисленных вкладов, сделанных скандинавскими учеными в развитие океанографии.

Ледниковое время и колонки глубоководных осадков

Если бы 25 лет назад спросить любого геолога, стоит ли тратить время и силы на получение длинных колонок глубоководных осадков, он расхохотался бы в ответ и, конечно, сказал бы, что легче найти другой способ тратить деньги без всякого толка, а для изучения глубоководных осадков вполне можно обойтись и короткими колонками. В самом деле, что можно было найти в длинной колонке глубоководных осадков? Ведь тогда считали, что осадки в океанах образуются из непрерывно выпадающего дождя остатков мельчайших морских животных, атмосферной пыли, тончайших илестых частиц, выносимых в океан реками. Важным источником накопления осадков считали также метеориты. Исходя из такого представления о медленном и однообразном накоплении осадочного материала, ученые и полагали, что нельзя надеяться обнаружить слоистость донных осадков, отмечающую изменение их характера с течением времени. Как часто случалось в прошлом, эта идея,

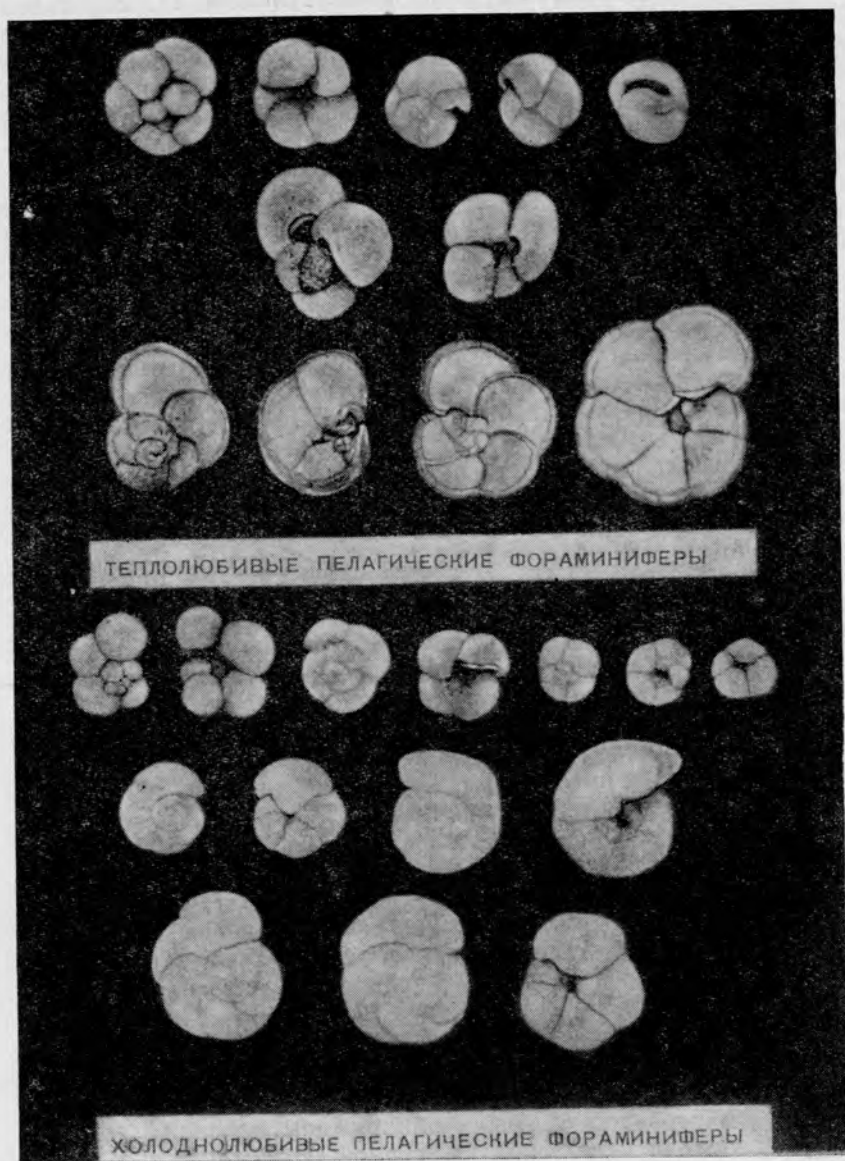
¹ Прикосновение ко дну определяется с помощью разбивающегося стеклянного шара. Разбивается он падающим грузом в момент прикосновения ко дну, в результате чего отмечается нечто вроде взрыва. Этот звук идет к кораблю примерно со скоростью 4800 футов в секунду и принимается гидрофоном, подвешенным за бортом, как раз в то время, когда нужно остановить лебедку.

опиравшаяся на недостаточное количество фактического материала, оказалась ошибочной. В действительности длинные глубоководные колонки показали характерную слоистость донных осадков.

Одним из первых фактов, проливших свет на ошибочность представлений о неизменности осадочного материала на протяжении миллионов лет, были колонки, взятые трубкой Пигго. Эти колонки были получены по разрезам, пересекающим северную часть Атлантического океана. Изучение колонок М. Н. Брамлетом и В. Г. Бредли (Геологическая служба США) показало, что отложения периода великого оледенения встречаются уже на горизонтах, лежащих на глубине около 1 фута от поверхности дна. Само собой разумеется, что в то время, когда огромные ледники покрывали Северную Америку, Гренландию и значительную часть Европы, айсберги откалывались от шельфовых ледников и выносились в северную часть Атлантического океана. Они несли с собой огромное количество камней, падавших на дно по мере таяния льда. Поскольку другие виды осадков в глубоких частях океана накапливались сравнительно медленно, подобно тому как это происходит сейчас, в отложениях ледникового периода очень много обломочного материала. Колонки Пигго, полученные в Северной Атлантике, содержат линзы камней и гравия, переслаивающиеся с илистым материалом, соответствующим сравнительно теплым периодам, чередовавшимся с периодами похолодания.

Оказалось возможным связать горизонты, отвечающие разным стадиям ледникового периода по всему разрезу через Атлантический океан. Подтверждение чередований периодов холодного и теплого климата было получено также путем изучения фораминифер, содержавшихся в различных слоях колонок. Некоторые из этих одноклеточных животных, обитающих в поверхностных водах океана, очень чувствительны к температуре воды. Специалисты научились распознавать виды этих животных, отражающие температурные условия их жизни (фиг. 83). По мере того как со сменой периодов оледенения и потепления менялась температура воды, фораминиферы, живущие в арктических морях, мигрировали то в более низкие, то в более высокие широты. Благодаря этому фораминиферы на различных горизонтах колонок отличаются от фораминифер в поверхностных осадках.

Наиболее полное изучение осадков ледникового и послеледникового периодов было выполнено Д. Эриксоном (Ламонтская геологическая обсерватория). Его исследования фораминифер в сочетании с определениями абсолютного возраста, выполненными В. С. Брокером и Ж. Л. Калпом (Ламонтская обсерватория) радиоуглеродным методом, а также с палеотемператур-



Фиг. 83. Теплолюбивые и холодолубивые фораминиферы (значительно увеличенные), используемые для определения климатических условий существовавших в прошлом.

ными исследованиями по O^{18} ¹, выполненными Ц. Эмильяни (Университет Майами), показали, что воды Атлантического океана приобрели современную температуру примерно 11 тысяч лет назад.

Это дает дату отступления огромных ледниковых щитов, которая согласуется с результатами других определений. Длительность последнего ледникового периода, по мнению Эриксона, составляет около 50 тысяч лет. Однако это спорный вопрос, так как другие исследователи считают, что он был значительно короче.

Глубоководные пески

То, что период великого оледенения получил отражение в характере осадков в районах высоких широт, поразило геологов меньше, чем обнаруженные позднее песчаные прослои в колонках илистых глубоководных осадков. Было непонятно, каким образом песок, столь обычный для береговых пляжей и отмелей, оказался занесенным на большие глубины. Удивление еще больше возросло, когда в этих песчаных прослоях были обнаружены раковины мелководных фораминифер, обитающих сейчас только на дне мелководных морей.

Вначале эти глубоководные песчаные слои считали признаком огромного погружения, то есть полагали, что абиссальное дно когда-то находилось вблизи поверхности океана. Ведь именно на малых глубинах можно было бы встретить грубозернистые осадки, переносимые волнами и течениями. Однако с развитием техники для получения длинных колонок было накоплено много данных о том, что песчаные слои во многих местах переслаиваются с типичными глубоководными отложениями. Распределение песчаных слоев в Северной Атлантике по результатам изучения колонок, собранных Ламонтской обсерваторией, показано на карте Д. Эриксоном (фиг. 84). Имеются признаки, что эти пески распространены в пределах огромных подводных конусов выноса, своего рода аккумулятивных шлейфов, образовавшихся у подножия материкового склона. Совершенно ясно, что эти прослои песка служат ярким подтверждением огромной роли суспензионных потоков в выносе осадочного материала. С другой стороны, то обстоятельство, что только в 134 из 550 глубоководных колонок, взятых Ламонтской обсерваторией, были обнаружены прослои песка, показывает, что большая часть Северной Атлантики, видимо, не получает грубозернистого материала, выносимого суспензионными потоками.

¹ Метод, разработанный Г. Юри (Калифорнийский университет). В этом методе используется соотношение изотопов O^{18} и O^{16} , полученных из раковин, для определения температуры воды, в которой обитали эти животные.

К другим, более распространенным типам глубоководных отложений относятся органогенные илы, красные глины и терригенные илы. Распределение этих типов осадков, насколько это возможно при современной изученности, показано на фиг. 85.

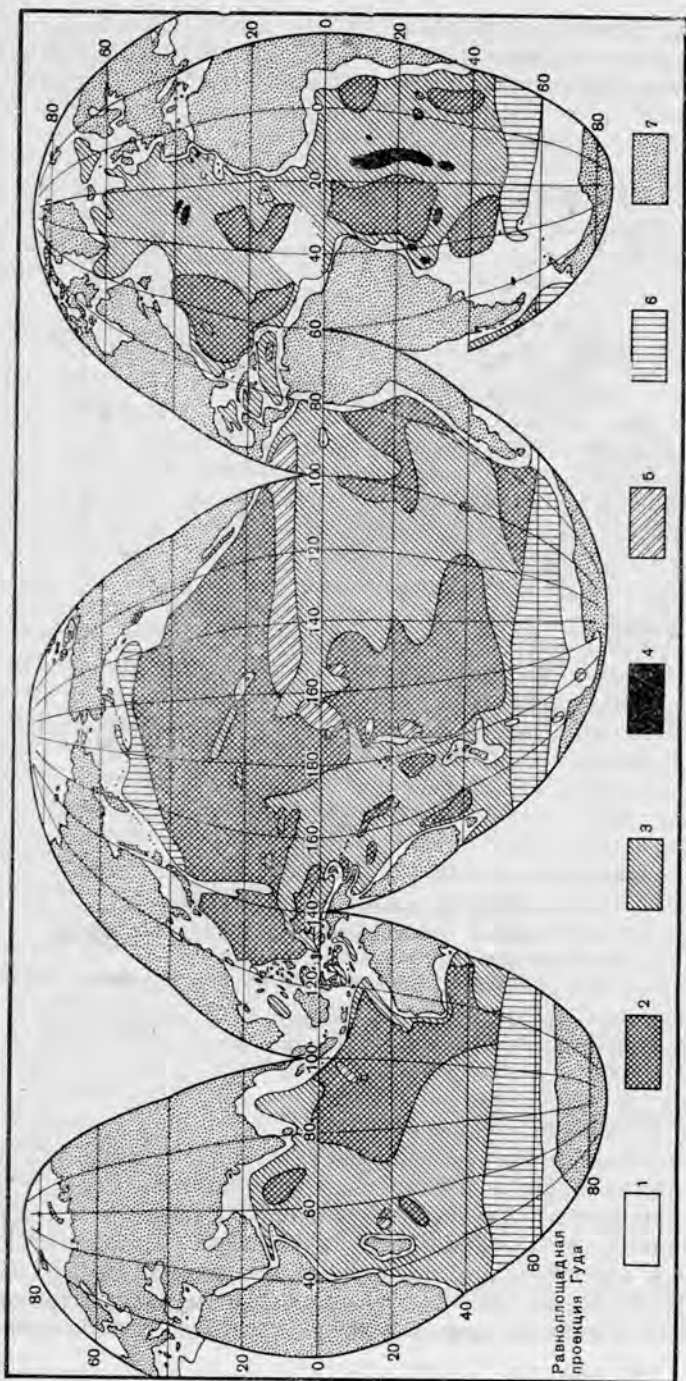


- Колонки с прослоями сортированного песка
- Колонки с прослоями несортированного песка
- ▲ Колонки с прослоями алеврита
- Колонки без прослоев песка или алеврита

Фиг. 84. Расположение колонок, взятых в Атлантическом океане, с прослоями песка и ила (заштрихованные площади).

Биогенные илы

Мягкие органогенные илы распространены в основном в относительно мелководных частях океана. Эти илы состоят из мельчайших раковин или скелетов низших животных и растений, обитающих в поверхностных и близких к поверхности слоях воды и известных под названием планктона. Из них фораминиферы наиболее многочисленны, а самым распространенным родом из отряда фораминифер являются глобигеричны



Фиг. 85. Распределение различных типов пелагических осадков Мирового океана.

1 — терригенные осадки; 2 — красные глины; 3 — каолиновые ил.; 4 — диатомовый ил.; 5 — кремнистый ил.; 6 — фораминиферный ил.; 7 — радиолярный ил.

(см. фиг. 83), поэтому осадок, в котором они преобладают, называют глобигериновым илом. Этот тип ила широко распространен в Атлантическом океане и в пределах обширных районов южной части Тихого океана.

Диатомовые илы

Диатомовые илы состоят из остатков кремнистых водорослей, которые очень широко распространены в верхних слоях воды. В периоды цветения этих водорослей вода в океане становится густой, словно суп. Диатомовые илы обнаружены в пределах широкой полосы вокруг Антарктиды и в обширном районе Тихого океана к северо-востоку от Японии.

В обоих этих районах глубинные океанские воды, богатые питательными веществами — фосфором и нитратами, выходят к поверхности и обеспечивают растениям обильное питание. Растения в свою очередь служат кормом для животных. Однако лишь немногие из этих остатков животных достигают дна, так как они более растворимы, чем кремнистые скелеты диатомовых водорослей. В некоторых районах экваториальной части Тихого океана в осадках преобладают кремнистые скелеты животных, известных под названием радиолярий. Они составляют еще одну разновидность органогенного ила.

Красные глины

Осадки, в которых преобладают глинистые частицы, обнаружены в пределах большинства глубоководных частей океанских котловин. Название *красная глина* явно неудачно, поскольку эти глубоководные глины обычно коричневого цвета. Дело в том, что первые пробы глубоководных глин, полученные в южной части Атлантического океана, были именно красного цвета, и это название укрепилось для всех глин подобного типа. Низкое содержание карбоната кальция в этих глинах вначале было загадкой. Ведь известно, что в водах океана плавает огромная масса организмов, накапливающих известь. Казалось бы, скелеты этих животных должны откладываться на дне океана. Однако вскоре поняли, что этому препятствует растворение, ибо холодные, насыщенные углекислотой воды, движущиеся из Антарктики и распространяющиеся по дну глубоких котловин, растворяют карбонат кальция еще до того, как он оседает, или даже после того, как он уже выпал в осадок. По Р. Рексу (Скриппсовский институт), красная глубоководная глина образуется главным образом из атмосферной пыли, состоящей из мельчайших минеральных частиц, снесенных с суши и распространяющихся на большие расстояния основными

системами океанских течений. В какой-то мере красную глину слагают метеоритные частицы и в еще меньшей степени — частицы вулканического пепла.

Терригенные илы

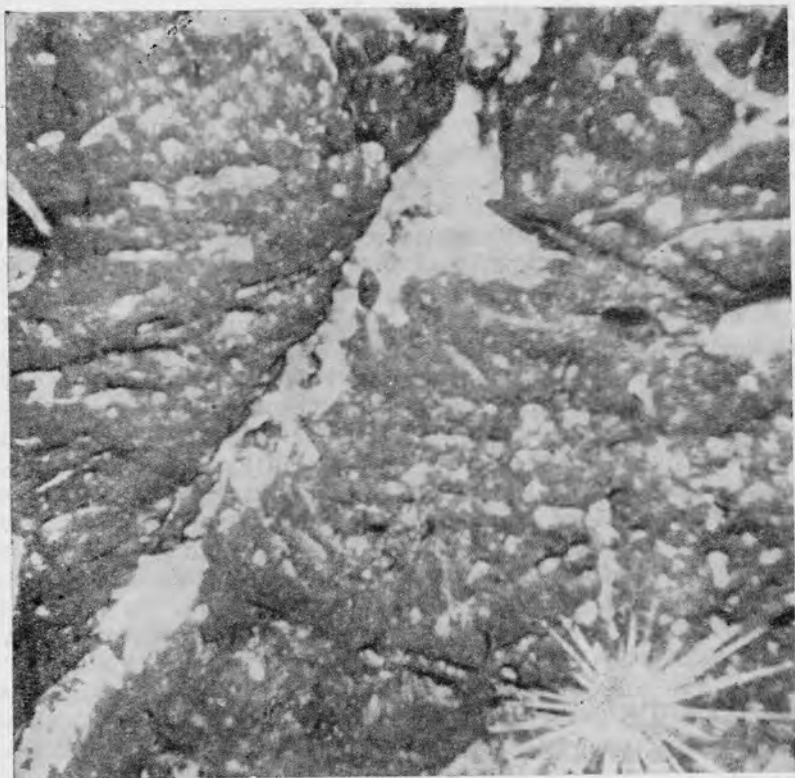
Осадки, окаймляющие материки и составляющие основную часть отложений глубоководных конусов выноса и аккумулятивных шлейфов, называют терригенными илами. Они отличаются от красной глубоководной глины значительным содержанием алевритовой фракции. Для них характерны, как узнали лишь недавно, многочисленные прослои песка. Материал илов смыт в основном с поверхности суши и представляет продукт ее выветривания. В его переносе важную роль играют суспензионные потоки. Цвет илов указывает на их связь с теми или иными областями суши. Если в океан впадают большие реки, то цвет илов обычно оказывается красноватым, поскольку осадки рек связаны с окислительными процессами. Вдоль засушливых побережий цвет осадков обычно зеленоватый. Черные илы приурочены к застойным котловинам, где накапливаются остатки растений и животных. Возможно, что эти органические остатки послужат исходным материалом для накопления будущих запасов нефти. Белые илы располагаются по крутым подводным склонам коралловых островов. Они состоят из мелких обломков кораллов и других накапливающих известь организмов, обитающих в коралловых рифах. В перемещении этого материала вниз по склону важная роль принадлежит оползням.

Зоны, лишенные осадков

Все проведенные нами на подводных горах и холмах драгировки показали, что отложения донных осадков там либо совсем отсутствуют, либо распространены отдельными пятнами и имеют ничтожную мощность. Впервые мы поняли это еще в 1938 г., когда пытались взять колонку с вершины одного подводного холма. Вершина его находилась на глубине 2 тысяч саженей, а глубины ложа вокруг него были порядка 2400 саженей. Было довольно сильное волнение, и нам пришлось поработать несколько часов. Результат оказался самым неожиданным. Наша грунтовая трубка была поднята погнутой от удара о коренные породы, покрытые марганцевыми конкрециями. Внутри трубки мы обнаружили небольшие обломки этой породы. Фотография одного из гүйо, расположенного вблизи Калифорнии, показала рассеянные пятна глобигеринового ила, отложенного в понижениях коренной породы (фиг. 86). Интересно, что почти на всех фотографиях подводных гор Атлантического океана, сделанных М. Юингом, видны лишь коренные

породы. Выходы большей частью покрыты марганцевой коркой. Марганцевые конкреции вообще широко распространены на дне океана. Это указывает на исключительно медленное осадконакопление.

Особенно удивительно то, что обширные зоны, где осадконакопление не наблюдается, встречены на больших глубинах



Фиг. 86. Подводная фотография выходов коренных пород на вершине гюйо вблизи западного побережья США. Белые пятна — глобигериновый ил, отложенный в трещинах. Животное с иглами — морской еж.

на сравнительно плоском дне Тихого океана. Это было обнаружено работами У. Р. Риделя (Скриппсовский институт) по изучению радиолярий в колонках шведской глубоководной экспедиции на «Альбатросе». Ридель обнаружил, что из пятнадцати колонок, взятых по разрезу от Таити до Гавайских островов и далее до островов Эллис (вблизи островов Фиджи), одиннадцать уже у самой поверхности содержали третичные радиолярии. Во многих местах древние радиолярии были смешаны с

современными осадками. Следовательно, осадконакопление в тропической зоне центральной части Тихого океана происходит весьма медленно. Местами же осадконакопление, видимо, вообще не происходит, и здесь идет лишь перераспределение древнего осадочного материала. В некоторых районах глубоководные течения, по-видимому, способны смывать большую часть тонкозернистого осадочного материала или даже полностью препятствовать его накоплению. При этом на дне осаждаются только частицы относительно крупных размеров, например фораминиферы.

Еще со времени экспедиции на «Челленджере» было известно, что на дне океана встречаются железо-марганцевые конкреции. Океанографические экспедиции последних лет, особенно экспедиции в Тихом океане, обнаружили, что в некоторых частях дна океана железо-марганцевые конкреции находятся в таком огромном количестве, что их можно добывать и в коммерческих целях. Они представляют промышленный интерес, в особенности из-за кобальта и никеля, содержащихся в их ядрах. Фотографии часто показывают большие скопления этих конкреций, нагроможденных на дне (см. фиг. 11). Наибольший диаметр некоторых из них достигает 3 футов. Конкреции обнаружены в виде толстого слоя в большей части обломков коренных пород, поднятых драгой с подводных гор Атлантического и Тихого океанов. Их редко можно найти в колонках донных отложений осадков, к тому же они приходится на верхнюю часть колонок. Эти конкреции представляют очень серьезную проблему. Почему они образовывались только в относительно недавнее время, а не в более отдаленные периоды? Пока еще нет даже достаточного количества данных, чтобы быть абсолютно уверенным, что такое различие существует, не говоря уже о том, чтобы объяснить его.

Другой, еще не нашедшей объяснения загадкой является относительная молодость всех органических остатков, обнаруженных до сих пор на дне океана и на подводных горах. Среди них нет осадков старше мелового периода. Может быть, это свидетельствует о том, что океаны вовсе не такие уж древние.

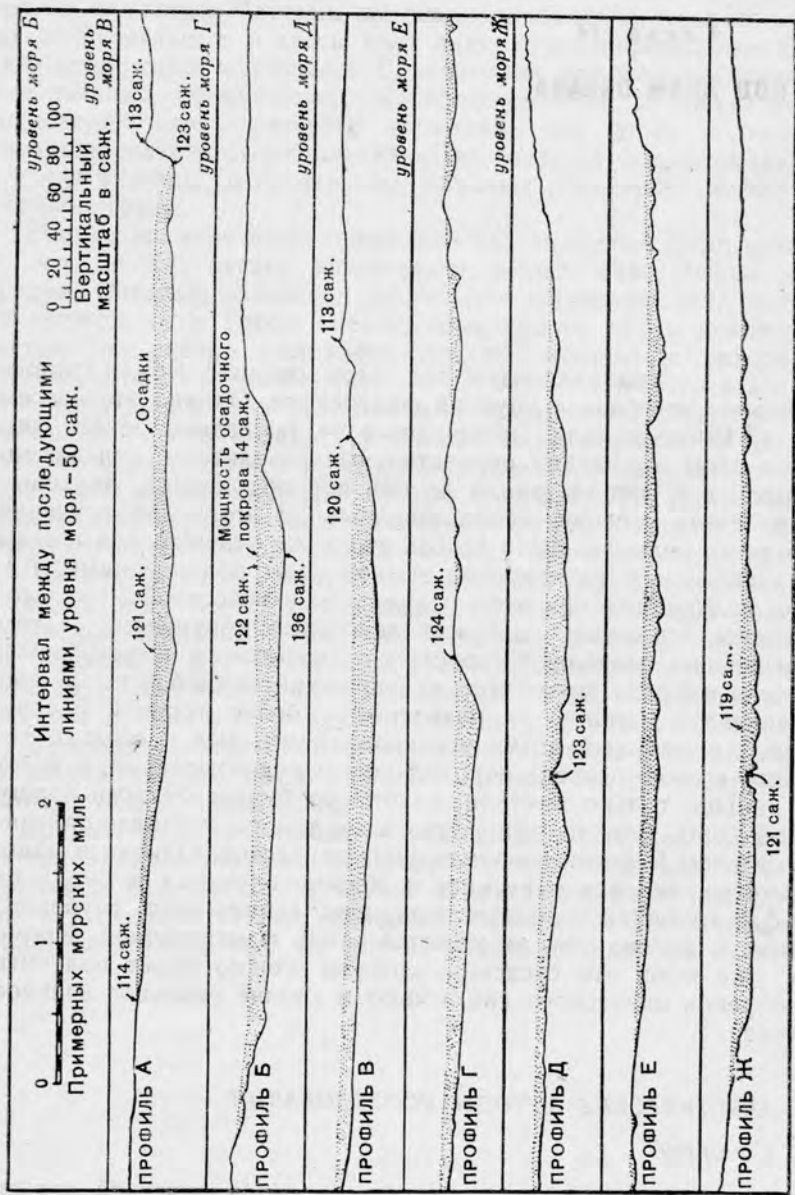
ПОД ДНОМ ОКЕАНА

Что находится под дном океана? Вот, казалось бы, вопрос из области научной фантастики. Однако это совсем не так. Исследования, проведенные за последние десять лет, дали в этом отношении поразительные результаты, они затмили собой все, что мы знали до сих пор об океанах. Звуковые волны, столь успешно использованные до этого для изучения подводного рельефа, были теперь столь же успешно применены для раскрытия тайн строения земной коры под океанами. Конечно, получаемые при этом результаты в известной мере умеренны, поскольку содержат некоторые допущения. И тем не менее они позволяют геологам и геофизикам понять очень многое в природе тектонических движений земной коры и восстанавливать историю ее развития на более прочной основе. Интерес, вызванный этими исследованиями, был настолько велик, что в свою очередь породил новый род изысканий, о которых раньше только мечтали: глубинное бурение сквозь толщу земной коры. Еще не так давно идея такого бурения, описанного Жюлем Верном, казалась фантастической. Однако в наши дни, когда человек запускает в Космос спутники и бурит на шельфах глубокие нефтяные скважины, возможность глубокого бурения в океане уже не кажется столь фантастичной. Кроме того, уже ясно, что сведения, которые можно будет получить при бурении океанского дна, имеют и вполне реальное военное значение.

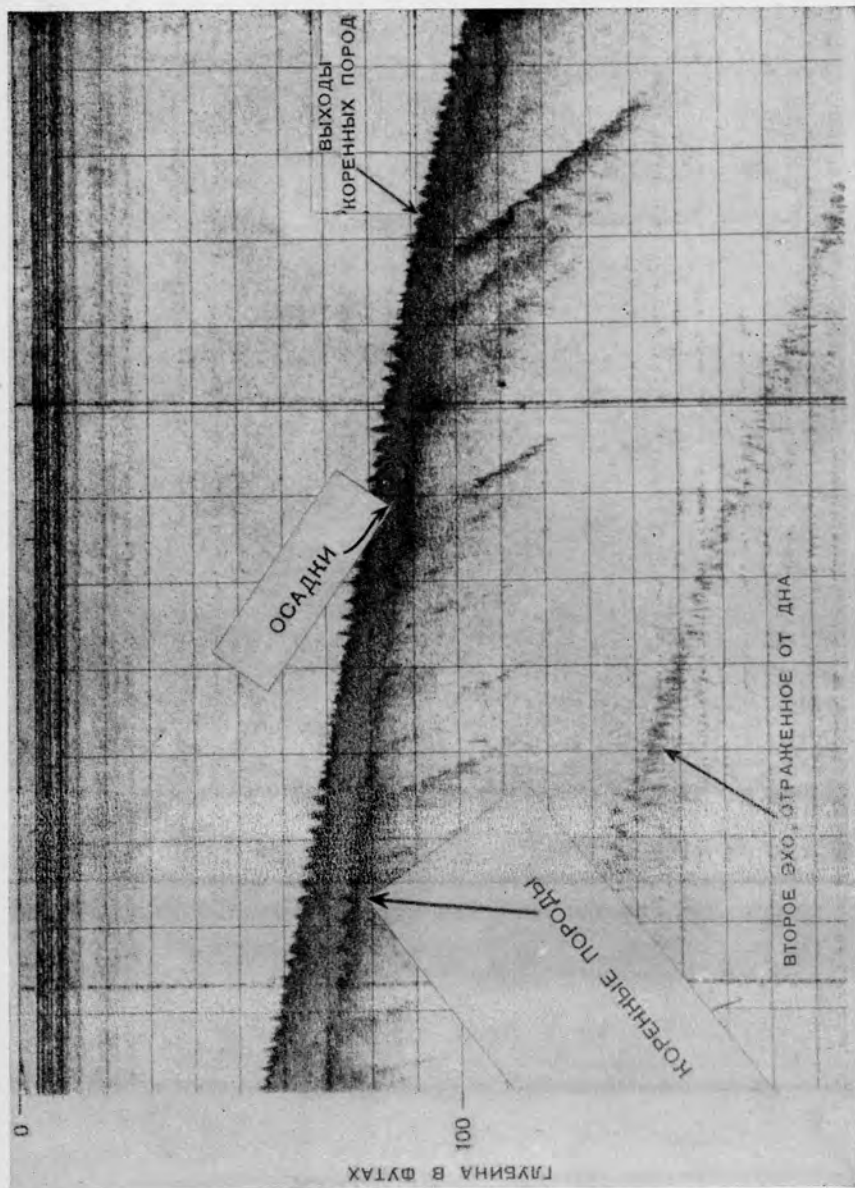
АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сонопроб

Как только появилась возможность автоматической записи эхолотных измерений глубин, были получены первые эхограммы с записью отражающих поверхностей, расположенных ниже поверхности дна океана (фиг. 87). Эти записи были получены



Ф и г. 87. Профили рыхлых осадков, покрывающих твердые коренные породы в заливе Мэн.



Фиг. 88. По записи сонопроба определяется залегание коренных пород под рыхлым осадочным покровом. Второе эхо вызвано отражением звука от дна вслед за отражением от водной поверхности.

в тех местах, где очень мягкие илы перекрывали, по-видимому, плотные пески или скальные коренные породы. Однако на эограммах часто не обнаруживалось никаких подповерхностных отражений. Дело в том, что ультразвуковые сигналы эхолотов¹ отражаются преимущественно поверхностью дна океана. Все последующие отражения от подстилающих слоев обычно оказывались недостаточно сильными для такой записи на эограмме или зачастую терялись на фоне реверберации² первого отраженного сигнала. Лишь в самые последние годы многочисленные эксперименты с низкочастотными звуковыми сигналами показали, что звук может успешно проникать сквозь насыщенные водой осадки на глубину 200 или даже 300 футов и возвращаться как эхо от подстилающих коренных пород. Прибор, названный сонопробом, был разработан на этом принципе нефтяной компанией «Магнолия» («Магнолия петролеум компани»). Он предназначен для выбора основания при постройке искусственных островов для буровых вышек при бурении на нефть в области материкового шельфа. Кроме того, этот прибор использовали также для изучения структуры коренных пород, подстилающих рыхлый осадочный покров при разведке нефти (фиг. 88). Сонопроб работает примерно так же, как эхолот, и запись ведется во время движения корабля. Однако записи обычного эхолота почти не дают представления о строении дна. Записи сонопроба, регистрируя даже небольшие отличия в условиях распространения звуковых волн, проникающих сквозь осадки и отражающихся от нижележащих коренных пород, открывают очень большие возможности. Правда, при этом оператор должен постоянно регулировать настройку прибора, чтобы добиваться необходимого выхода звуковых сигналов. Работа с сонопробом значительно сложнее, чем с обычным эхолотом.

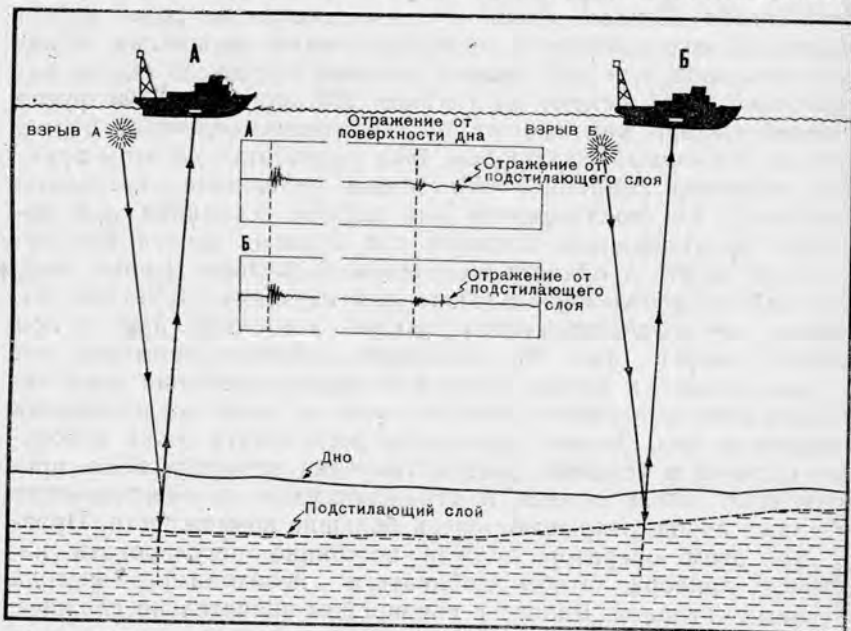
Прежде чем интерпретировать записи сонопроба, необходимо определить скорость распространения звука в насыщенных водой донных осадках, поскольку она отличается от средней скорости распространения звука в морской воде, равной 4800 футам в секунду. Проведенные в различных лабораториях эксперименты, среди которых особенно должны быть отмечены работы Лаутона (Кембриджский университет), Дж. Нейфа (Ламонтская геологическая обсерватория) и Дж. А. Шамуэя (Лаборатория электроники военно-морского флота США), позволили определить скорость звука в рыхлых осадках и различных типах твердых пород.

¹ Звуковые колебания с частотой более 20 кГц. Эта частота — предел слышимости для большинства людей.

² Реверберация — явление искажения формы звукового сигнала, связанное с растяжением его продолжительности и соответствующим изменением его энергетической структуры во времени. — *Прим. ред.*

Отражения взрывных волн

Несколько раньше, чем был разработан сонопроб, отражения звуковых волн от подповерхностных горизонтов дна океана были получены путем применения взрывов. Взрывы посылают настолько мощные звуковые волны, что они легко проникают сквозь толщу осадков и отражаются от подстилающих их коренных пород (фиг. 89). Вследствие большой интенсивности



Фиг. 89. Использование взрывов для изучения глубины залегания коренных пород под рыхлой осадочной толщей. В центре — образцы записей, по которым построен разрез дна.

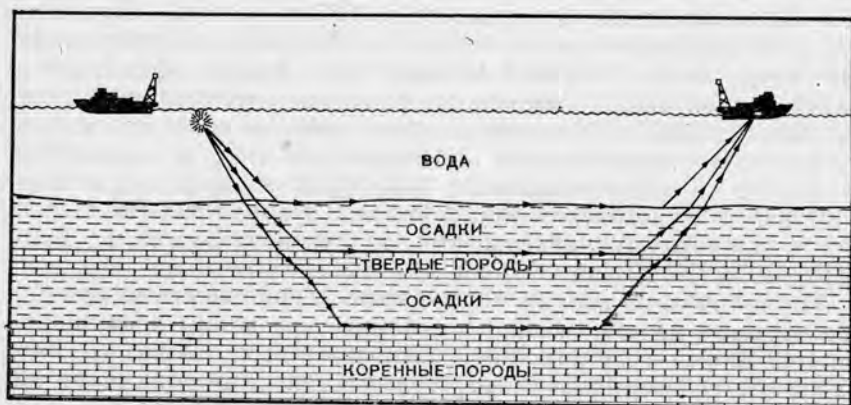
звуковых сигналов и реверберации этим способом можно регистрировать лишь значительные мощности осадочного покрова. Морской сейсмический метод отраженных волн был впервые разработан В. Вейблом — шведским геофизиком из Гётеборгского океанографического института. Он участвовал в работах Г. Петерсона (из того же института) во время знаменитой шведской кругосветной экспедиции на «Альбатросе» в 1947/48 г.¹ Вейбл обнаружил значительные изменения мощностей осадков от места к месту, достигающие двух миль. Подобный метод исследований был применен в Ламонтской геологической обсерватории, Вудсхолским океанографическим институтом и

¹ Hans Pettersson, *Westward Ho with the «Albatross»*, New York, E. P. Dutton & Co., 1953.

Скрипсовским океанографическим институтом. Сочетание этого метода с методом преломленных волн, описываемым ниже, дает наиболее надежные результаты. Именно этим методом были определены мощности осадков в желобах в восточной части Тихого океана.

Преломленные волны от взрывов

В начале 20-х годов геологи и геофизики начали применять взрывные волны для исследования структур горных пород в области нефтяных полей. В значительной мере эта работа была



Фиг. 90. Использование преломленных и многократно отраженных волн для определения мощности и природы горных пород и рыхлой осадочной толщи под дном океана. Обратите внимание, что при вхождении из слоя твердой породы в подстилающие его рыхлые осадки звуковой луч преломляется без образования граничных преломленных волн.

обусловлена все возрастающей угрозой нефтяного голода в связи с невероятно быстрым ростом нефтяной промышленности. В неглубоких шпурах взрывали динамит, вызывая как бы искусственные землетрясения. Время прохождения сейсмических волн измеряли небольшими портативными сейсмографами, располагая их на различных расстояниях от точки взрыва. Волны, распространяющиеся сквозь земную кору, приходят к приемным станциям различными путями. Времена вступлений зависят при этом от скорости прохождения волн в различных слоях горных пород, встречающихся на их пути. Если волны, удаляющиеся от источника колебаний вниз, проходят сквозь верхний слой с более высокой скоростью распространения упругих колебаний, они преломляются, почти до горизонтального луча и во многих случаях идут далее вдоль поверхности раздела, то есть вдоль кровли этого твердого слоя, выходя затем частично вверх, к

поверхности (фиг. 90). Вследствие того, что скорость преломленных волн вдоль этих глубоких слоев очень высокая, они могут достигнуть сейсмографов раньше, чем волны, распространяющиеся с меньшей скоростью в поверхностных слоях. Если близповерхностные волны прибывают первыми, они могут быть все же существенно подавлены в момент второго вступления, так что и последующие волны оказываются отмеченными на записи сейсмографа.

Применение преломленных волн для исследований дна океана было начато М. Юингом и его сотрудниками — А. С. Вайном (Вудсхолский океанографический институт), Дж. Л. Ворзелом (Ламонтская геологическая обсерватория) и Дж. Р. Вуллардом (Висконсинский университет) в 1937 г. на судах Вудсхолского океанографического института. Результаты, полученные еще перед второй мировой войной, были весьма эффектными, но все же допускали возможность различных толкований. Сразу же после войны работа была продолжена и сосредоточена в Ламонтской геологической обсерватории под руководством М. Юинга, в Скриппсовском институте под руководством Р. Райта, в Вудсхолском институте под руководством Б. Херси и в Кембриджском университете под руководством Э. К. Буларда и М. Н. Хилла.

Первоначально заряды взрывчатого вещества помещали перед взрывом на дно океана, и сейсмические волны регистрировались серией сейсмографов, расположенных также на дне. Затем эти сейсмографы с полученными записями поднимали на поверхность. Балласт удерживал приборы на дне до тех пор, пока вода не растворяла соляные предохранители, освобождавшие груз, позволяя тем самым поплавкам поднимать приборы на поверхность. Это был довольно дорогой и сложный метод. Он был отброшен, как только стало известно, что взрывы вблизи поверхности воды почти столь же эффективны, как и глубинные¹. Теперь стали размещать плавающие сейсмографы вытянутыми в линию за кораблем, получая записи от каждого из них. Однако в дальнейшем признали более удобным производить серию взрывов с движущегося корабля, в то время как неподвижный корабль принимает сейсмические волны своими сейсмографами. Расстояние между кораблями в моменты взрывов определяется по времени прохождения водной волны².

Метод преломленных волн не только дает сведения о мощности рыхлой осадочной толщи, но и позволяет исследовать подстилающие слои твердых пород коры, поскольку скорость распространения в них звука изменяется резкими скачками.

¹ Метод донных наблюдений был недавно заново переработан и приспособлен для специальных целей Дж. И. Юингом в Ламонтской геологической обсерватории.— *Прим. ред.*

² В отличие от волны, идущей в твердых породах.— *Прим. ред.*

МОЩНОСТЬ ОСАДОЧНОГО ПОКРОВА НА ДНЕ ОКЕАНА

Многие геологи строили предположения относительно возможной мощности осадочной толщи, покрывающей коренные породы дна океана. Наиболее настойчивые попытки получить удовлетворительные результаты различными методами были предприняты Ф. Кюненом. Используя данные изучения различных колонок, указывающие на положение контакта между ледниковыми и послеледниковыми осадками, он получил среднюю скорость осадконакопления, равную 1 см (0,4 дюйма) в 1000 лет. Он считал, что в отдаленные эпохи скорость осадконакопления должна была быть ниже современной вследствие более высокого положения современной суши по сравнению с более древними эпохами. Кроме того, он полагал, что глубоко погребенные осадки должны испытывать уплотнение. Вводя соответствующую поправку, он получил скорость осадконакопления $\frac{1}{6}$ см за 1000 лет. Умножив эту скорость на возраст океана (2 млрд. лет), Кюнен подсчитал, что средняя мощность осадков на дне океанских котловин должна быть равна 9800 футам, или приблизительно 2 милям. Другими методами, как, например, умножением возраста океана на вычисленный объем осадков, выносимых ежегодно реками с материков в океан, Кюнен получил цифры, которые оказались грубо вполне сравнимыми.

Из множества сейсмоакустических измерений, имеющих в настоящее время, лишь немногие отвечают расчетам Кюнена. Мы знаем, что приближенные значения мощности¹ слоя осадков с низкими скоростями прохождения звука, вплоть до первого подповерхностного горизонта, дающего сильные отражения, во многих частях Тихого океана составляют в среднем всего лишь около 1000 футов, а в Атлантическом — в среднем около 2 тысяч футов. Большие мощности осадочного покрова в Атлантике связаны с тем, что реки выносят в этот океан на единицу поверхности значительно больше осадков, чем в Тихий. В любом случае, однако, существует большое несоответствие между расчетами Кюнена и измеренными значениями мощностей.

Пока никто еще не объяснил полностью это несоответствие. Возможно, что измерения проводились в областях, где осадочная толща гораздо тоньше средней, но это не убедительно, так как относительно тонкий осадочный покров обнаружен и в Атлантическом и в Тихом океане.

¹ Приближенное значение, потому что скорость распространения звука в неконсолидированных осадках меняется в зависимости от пористости и уплотнения, и при расчетах приходится использовать какую-то условную, наиболее вероятную скорость. Порядок этой предположительной скорости, по-видимому, верен.

Согласно другому объяснению, океаны значительно моложе, чем обычно считают.

Гюйо, покрытые мощным слоем воды, сильно опущенные основания атоллов, а также огромные глубины подводных каньонов могут означать, что глубины подводных каньонов, как предполагает Р. Ревелл, значительно возросли со времени мелового периода. Повышение уровня океана на 5 тысяч футов за последние 70 млн. лет¹, возможно, означает, что действительный возраст океана меньше 200 млн. лет (средняя глубина океана — 13 тысяч футов). Это может также объяснить меньшую мощность осадочного покрова по сравнению с расчетной.

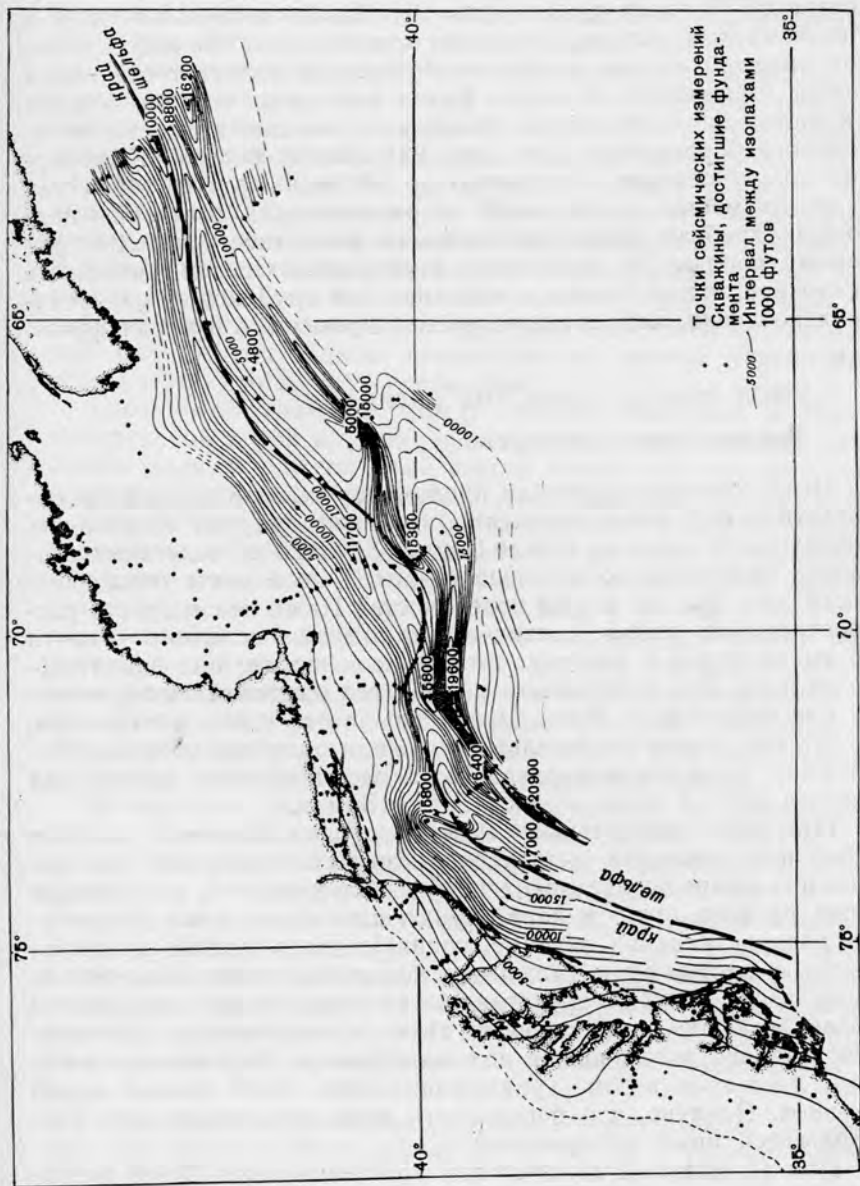
Однако наиболее удачное объяснение было недавно предложено Гамильтоном. По его мнению, наиболее глубокие части осадочного покрова уже сильно диагенетически изменены, так что отраженные или преломленные волны, получаемые от предполагаемой подошвы осадков, в действительности приходят от поверхности раздела между слоями неконсолидированных (нелитифицированных) и консолидированных осадков. Если слой консолидированных осадков лежит между слоями неконсолидированных, то подстилающий слой осадков не может быть обнаружен с помощью звуковых импульсов. В самом деле, ведь преломление звуковых волн возможно лишь в том случае, когда звук распространяется из неконсолидированных осадков в слой консолидированных (см. фиг. 90). Возможно, что тонкий слой лавы излился на поверхность осадочного покрова в нескольких местах и замаскировал, таким образом, подстилающие его осадки.

Если предложенное Гамильтоном объяснение правильно, то понять геологическую историю океанов значительно легче, чем если руководствоваться гипотезой относительной их молодости. По мнению большинства геологов, древние формации, ископаемая фауна и флора свидетельствуют о существовании океана на всех этапах геологической истории Земли.

МОЩНОСТЬ ОСАДКОВ ПО ОКРАИНАМ МАТЕРИКОВ

Вдоль окраин океанских котловин можно встретить мощные толщи осадков. Исследователи Ламонтской геологической обсерватории установили два заполненных осадками желоба у восточного побережья Соединенных Штатов. Внутренний из них располагается под материковым шельфом и выполнен осадками, мощность которых по расчетам составляет 17 тысяч футов. Внешний желоб находится отчасти под поверхностью мате-

¹ Примерный возраст мелового периода.



Ф и г. 91. Изопах мощностей неконсолидированных и полуконсолидированных осадков вблизи восточного побережья США. Видно поднятие коренных пород вблизи внешнего края материкового шельфа.

рикового склона, отчасти под прилегающей к нему поверхностью ложа океана. Мощность заполняющей его осадочной толщи достигает 30 тысяч футов (фиг. 91). Вдоль побережья США в Мексиканском заливе, согласно отчетам геологов-нефтяников, под внешней частью материкового шельфа залегает осадочная толща мощностью 20 тысяч футов или даже больше. Ученые Скриппсовского института обнаружили на дне котловин материкового бордерленда (см. фиг. 92) вблизи берегов Калифорнии толщу осадков мощностью до 10 тысяч футов, тогда как в других местах, в частности на разделяющих котловины подводных хребтах, непосредственно на поверхность выходят коренные породы. За пределами материкового склона мощность осадочной толщи близка к типичной для глубоководных океанских котловин, хотя местами может превышать 6 тысяч футов.

СЛОИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОД ОКЕАНАМИ

Земная кора и мантия

Исследования по методу преломленных волн позволили обнаружить под дном океанских котловин одну из важнейших поверхностей раздела в теле Земли. Глубина ее залегания оказалась сравнительно небольшой — от 3 до 8 миль от поверхности дна. Что же это за поверхность? Ниже нее скорость распространения звука достигает огромной величины — почти 26 тысяч футов в секунду, тогда как выше нее она значительно меньше. Эта поверхность называется разделом Мохоровичича или сокращенно Мохо. Она наблюдается и под материками, но там она лежит значительно глубже, на глубине порядка 20—25 миль. Слои выше раздела Мохо рассматривают обычно как земную кору а ниже — как мантию Земли.

Открытие относительно малых глубин залегания раздела Мохо под океанами оказалось чрезвычайно важным для понимания природы океанских глубин. Слои мантии, залегающие ниже раздела Мохо и характеризующиеся высокими скоростями распространения звука, ассоциируются в нашем представлении с плотными и тяжелыми породами, тогда как породы выше этого раздела представляются нам менее плотными и более легкими; ведь скорости звука в них меньше. Поэтому относительно толстая кора под материками, обладающая меньшим удельным весом, уравнивается более тонкой корой океанов. Понятно, что поверхность коры океанского типа располагается ниже материковой.

Под Срединно-Атлантическим хребтом раздел Мохо местами обнаружить очень трудно. Создается впечатление, что в этих местах между обычной корой и мантией существует переходный слой. Скорости в этом слое несколько меньшие, чем обыч-

но наблюдающиеся в мантии, но более высокие, чем характерные для коры. Высказано предположение, что под широким сводовым поднятием хребта вещество коры и мантии перемещено при соприкосновении расплавленных пород.

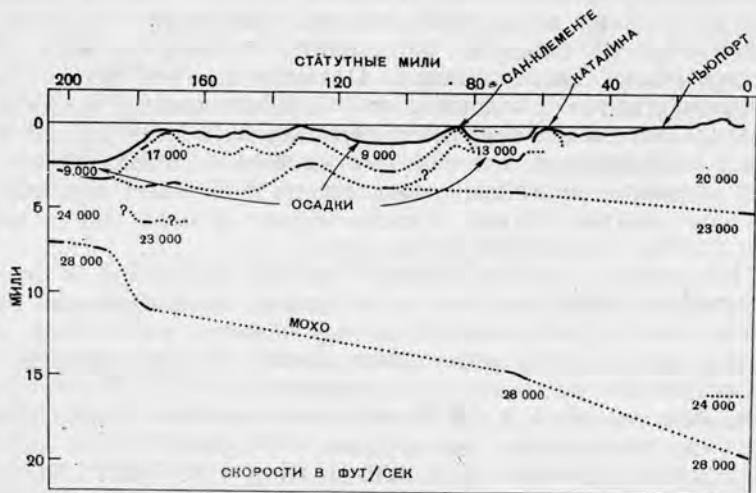
Первоначально предполагали, что под глубоководными океанскими желобами кора должна быть еще тоньше, чем в остальных частях океана, чтобы компенсировать эти глубочайшие депрессии. Лишь в самое последнее время были проведены исследования, позволившие установить глубину раздела Мохо под желобами Тихого океана. Проводились эти исследования преимущественно геофизиками Скриппсовского института¹. В результате было обнаружено, что под желобами раздел Мохо скорее погружается, нежели поднимается. Следовательно, желоба являются прогибами, созданными действием горизонтальных сил сжатия. Такое предположение вполне закономерно, если учесть, что желоба очень узки.

Положение границы между тонкой океанской и толстой материковой корой все еще недостаточно ясно. Согласно имеющимся данным, материковый шельф лежит в переходной зоне, в пределах которой раздел Мохо довольно быстро погружается в направлении от океана к материку (фиг. 93). Материковый бордерленд вблизи южной Калифорнии занимает переходную зону между материком и ложем океана. Мощность коры под ним также промежуточная (фиг. 92). Д. Шор и Р. Рейтт обнаружили, что вдоль внешней части этого бордерленда раздел Мохо расположен ближе к поверхности, чем под его внутренней частью, ближайшей к материку. Однако глубины поверхности дна при этом в обеих частях бордерленда примерно одинаковы. Таким образом, мощность коры здесь, как и под желобами, не находится в прямой зависимости от глубины океана.

Интересные результаты были достигнуты с применением метода преломленных волн при исследованиях таких относительно небольших котловин, как Мексиканский залив и бассейн Северного Ледовитого океана. Многие геологи считают, что Мексиканский залив — опущенная часть материка Северной Америки. Однако раздел Мохо здесь, как и во многих других глубоководных котловинах, залегает так же близко к поверхности дна, как и в океанах. Трудно поверить, что материковые массивы с их мощной корой и глубоко погруженным разделом Мохо могли быть преобразованы в океанские котловины с не-

¹ Комплексные геофизические исследования земной коры под глубоководными океанскими желобами проводились и советскими учеными. Большие успехи были достигнуты ими при изучении Курило-Камчатского желоба (см. И. П. Косыгинская и др., Основные черты строения земной коры Охотского моря и Курило-Камчатской зоны Тихого океана по данным глубинного сейсмического зондирования, Изв. Акад. наук СССР, сер. геофиз., 1963, № 1). — *Прим. ред.*

глубоким залеганием раздела Мохо. Если бы такое преобразование произошло, то оно должно было бы сопровождаться преобразованием слоя материковой коры мощностью 20 миль в вещество мантии. Более вероятно, что Мексиканский залив всегда был глубоким и что, следовательно, прежняя интерпретация его геологической истории ошибочна.



Фиг. 92. Разрез дна Тихого океана против Ньюпорта, южная Калифорния, показывающий мощность осадков на дне котловин и скорости распространения сейсмических волн в футах в секунду в подстилающих их коренных породах. В основании разреза показан раздел Мохо. Обратите внимание, что раздел Мохо под материком проходит значительно глубже, чем под океаном.

Промежуточный слой коры

На ранних этапах исследования дна океанов методом преломленных волн под осадочным покровом выделили только один слой коры. В дальнейшем, однако, работы Р. Рейтта и его коллег показали, что в Тихом океане под осадками, несомненно, существует еще один слой коры. Этот же самый слой был затем обнаружен и в Атлантическом океане другими исследователями. Теперь установлено, что последовательность залегания слоев такова: сверху лежит осадочный слой со средней скоростью распространения сейсмических волн 7 тысяч футов в секунду, под ним — слой коренных пород со средней скоростью волн 16 тысяч футов в секунду, и наиболее глубоко залегает слой коры со средней скоростью 22 тысячи футов в секунду. Верхний слой твердых пород коры может быть представлен ли-

бо литифицированными осадками, например известняками, либо лавами. Вокруг вулканических островов скорости сейсмических волн в слагающих их породах иногда достигают 16 тысяч футов в секунду, и в этом случае они определенно отвечают лавам с множеством пустот, заполненных газами, или сильно раздробленным. Возможно, что и в других местах промежуточный слой коры, называемый иногда условно «вторым» слоем, сложен лавами. Судя по скоростям сейсмических волн (21—23 тысячи футов в секунду), самый нижний слой коры состоит из кристаллических пород типа габбро. Этот слой иногда условно называют базальтовым, но слагающие его породы вряд ли похожи на мелкозернистые базальты вулканических островов.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНОВ

Исследования строения дна океана проводятся еще одним геофизическим методом: путем измерения силы тяжести. Для этого определяют период колебания маятника, находящегося на подводной лодке. Лодка погружается при этом на такую глубину, чтобы не испытывать качки. В каждой точке земного шара период колебания маятника постоянный. Чем больше сила тяжести, тем быстрее качается маятник. Однако чтобы заметить разницу в периоде качаний, составляющую миллионные доли секунды, необходимо определять время колебаний с очень большой точностью. Кроме того, следует принимать во внимание и рельеф земной поверхности. Чем выше положение точки, в которой находится маятник, тем дальше она от центра массы Земли. Сила земного тяготения воздействует поэтому на маятник слабее, и он качается медленнее. Поправки на рельеф земной поверхности нужно вводить и в океане, потому что дно, как мы уже видели, имеет весьма сложное строение. Однако при этом поправка вводится не на высоту, как на суше, а на глубину. Путем этой поправки учитывается, что покрывающая дно вода легче, чем слагающие его горные породы. Результаты гравиметрических наблюдений после введения всех необходимых поправок дают нам представления об относительной плотности пород, подстилающих дно океана.

Гравиметрические исследования в океанах показали, что океанская кора почти всюду уравновешена материками, подобно тому как уравновешены плавающие в воде куски тяжелого и легкого дерева. При этом первый из них опущен в воду глубже второго. Аналогично этому материка поднимаются над поверхностью дна океана, так как они сложены более легкими породами. Результаты гравиметрических исследований в основном согласуются с результатами исследований методом пре-

ломленных волн и данными сейсмологических наблюдений, поскольку относительно более плотные породы имеют в общем также и более высокие скорости прохождения сейсмических волн. Гравиметрические исследования в сочетании с сейсмическими очень помогают определять мощность слоев земной коры. Ведущими специалистами в морских гравиметрических исследованиях являются Вейнинг-Мейнес (Голландия) и в последние годы Л. Ворзел (Ламонтская геологическая обсерватория).



Фиг. 93. Упрощенный разрез, показывающий соотношение между осадочным покровом, корой и мантией Земли вблизи восточного побережья США. Обратите внимание, что точно такое же соотношение существует в строении коры вблизи побережья Калифорнии (см. фиг. 92).

Одним из интересных результатов гравиметрических измерений было открытие областей исключительно высоких отрицательных аномалий силы тяжести в глубоководных океанских желобах, где бы они ни исследовались. Следовательно, желоба могли быть образованы в результате прогибания под воздействием сил бокового горизонтального сжатия, вызванных, вероятно, конвекционными течениями, которые сдвигают земную кору и образуют в различных местах горные хребты. Была высказана и другая точка зрения относительно возможной интерпретации гравиметрических аномалий силы тяжести и строения коры под желобами. Группа ученых Ламонтской геологической обсерватории на основании данных гравиметрических исследований утверждает, что земная кора под желобами очень тонка. Однако, как уже указывалось ранее, сейсмические работы ученых Скриппсовского института указывают, что под желобами кора имеет относительно большую толщину и что раздел Мохо под ними погружается. Дальнейшие исследования, несомненно, разрешат это противоречие во мнениях. Таким образом, интерпретация гравиметрических наблюдений в океане во многом еще ненадежна.

Геологи давно уже интересуются потоком тепла из глубин Земли. Вначале предполагалось, что он исходит из остывающей расплавленной коры. До того как был определен теплопродуцирующий эффект радиоактивности, полагали, что возраст Земли не старше 80 млн. лет и что внутренняя часть ее уже утратила все свои запасы тепла. Затем, после открытия радиоактивности горных пород земной коры и изучения темпов генерации ими тепла, было установлено, что при этом образуется достаточное его количество для поддержания высоких температур внутренних частей Земли на протяжении миллиардов лет. Это открытие очень помогло понять причины вулканической активности за длительную геологическую историю Земли. Согласно прежним представлениям, вулканическая деятельность связана в основном с далеким прошлым. Однако нам известно, что грандиозные вулканические извержения происходили как раз в сравнительно недавнее время, образовав, например, огромные лавовые плато штатов Вашингтон и Орегон. Сильные извержения происходили в недавнем прошлом в центральной Индии и Тибете.

Изучение радиоактивности помогло установить некоторые поразительные факты. Например, было обнаружено, что гранитные породы материков содержат значительно больше радиоактивных минералов, чем базальты вулканических островов. Это навело на мысль, что радиоактивность более значительна под материками, чем под океанами. Следовательно, вулканическая активность на материках должна была бы быть сильнее, чем в океанах. Однако вулканов в океане оказалось значительно больше, чем на материках. Отчасти это может быть объяснено денудацией материковых вулканов и лучшей сохранностью их в океанах. Но даже с учетом этого совершенно ясно, что вулканизм в океанах не менее активен, чем на материках.

Измерения теплового потока на материках представляют известные трудности в связи с флуктуациями температуры на поверхности. Поэтому приходится измерять их в глубоких скважинах, ниже уровня возможных флуктуаций и ниже уровня влияния циркулирующих грунтовых вод. Еще большие трудности связаны с необходимостью избежать проникновения тепла с поверхности Земли из-за циркуляции воздуха и воды в скважине. На дне океанов температура постоянна, и это облегчает задачу. Специальный длинный зонд, снабженный регистратором и датчиками температуры в нижней и верхней частях погружается в осадочную толщу дна океана на глубину около 10 футов и позволяет получить записи температуры в момент погружения. Записи эти могут быть прочитаны после того, как прибор будет поднят на поверхность.

Чтобы ввести поправки в полученные отсчеты, рядом с точкой измерений берут колонку донных осадков, в которой измеряют теплопроводность.

В настоящее время уже проведены измерения теплового потока во многих местах в Атлантическом и Тихом океанах. Основной вклад в эти работы был сделан Э. Буллардом, А. Максвеллом и Р. Ревеллом. Вопреки ожиданиям поток тепла на дне океана оказался не меньше, чем на материке, а даже несколько выше. Кроме того, тепловой поток на океанском дне, по-видимому, более изменчив, чем на материках. Правда, измерения на материках пока еще слишком редки, чтобы говорить об этом достаточно уверенно. Кроме того, на суше они часто приурочены к нефтяным скважинам и шахтам и поэтому могут оказаться нетипичными. Одним из наиболее интересных результатов, полученных при геотермических измерениях в океане, является открытие интенсивного теплового потока на поднятии острова Пасхи в восточной экваториальной части Тихого океана и в некоторых частях Срединно-Атлантического хребта. С другой стороны, тепловой поток оказался совершенно ничтожным в желобах восточной части Тихого океана. Кажется возможным хотя бы отчасти объяснить причину воздымания указанных поднятий над океанским дном относительно высокими температурами в подстилающей их коре. Однако эти наблюдения и интерпретация их результатов находятся еще на очень ранней стадии и позволяют делать пока лишь самые предварительные выводы.

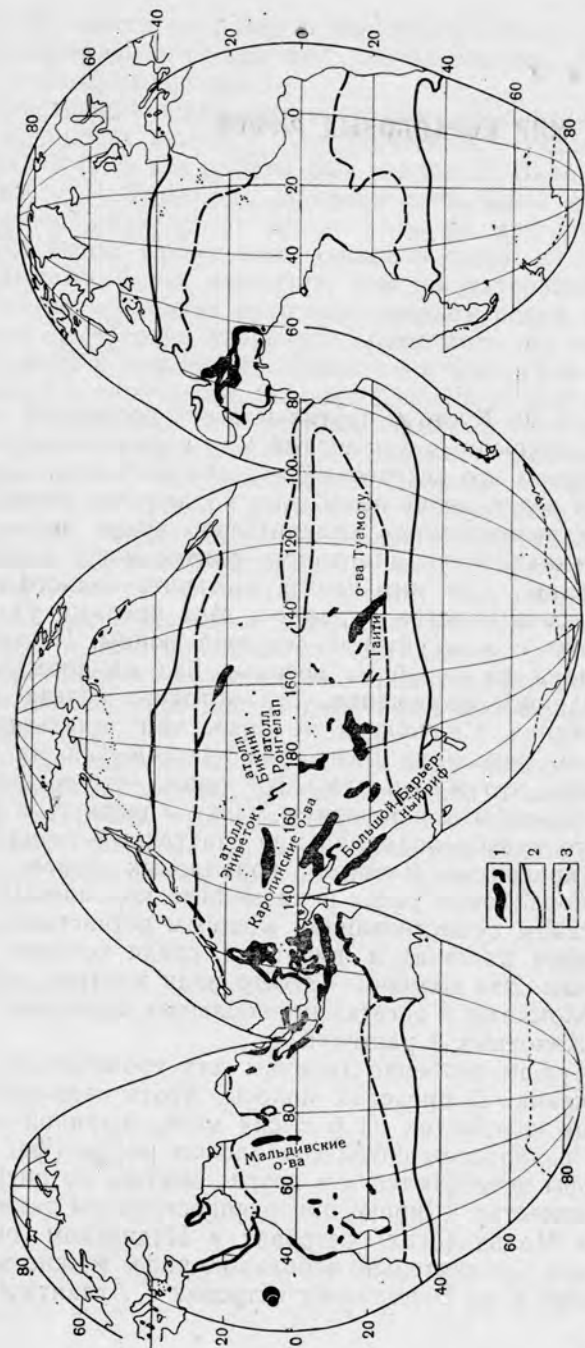
Вообще следует заметить, что современное состояние наших знаний о строении земной коры под океанами достаточно только для того, чтобы отвергнуть некоторые старые и явно ошибочные гипотезы. К сожалению, эти знания еще слишком скудны, чтобы послужить основой для новых перспективных гипотез.

ЧУДЕСНЫЙ МИР КОРАЛЛОВЫХ РИФОВ

Жак Ив Кусто и другие мастера подводной кино-съемки впервые открыли нам чудесный мир коралловых рифов. Люди поняли, какой это интересный и необычный мир. Трудно описать словами великолепие подводных коралловых лесов, где резвятся стайки разноцветных, ослепительно ярких рыбок. Но как бы ни были живописны кинокадры, они не могут заменить личных впечатлений, и по ним нельзя составить полного представления о красоте царства кораллов. Мне впервые удалось увидеть этот мир в годы второй мировой войны. Несколько недель я просидел на одной из военных баз на коралловом острове в ожидании снаряжения, без которого нельзя было начать исследования. Сначала я не знал, чем заняться. Работники военного персонала базы, располагавшейся на этом острове, говорили, что жизнь здесь все равно, что в тюрьме. Но стоило мне раздобыть водолазную маску и нырнуть в воду, как я понял, что судьба подарила мне счастливый случай познакомиться с красочным царством коралловых рифов.

Подводные коралловые рифы и низменные коралловые острова обязаны своим существованием мощным ветвистым колониям бесчисленных растений и животных, среди которых преобладают кораллы. Эти колонии — своего рода жесткий каркас, заполненный обломками и остатками небольших кораллов, микроскопических животных и растений.

Коралловые рифы особенно типичны для тропических районов Тихого океана. В пределах полосы, протягивающейся с северо-запада на юго-восток на 6 тысяч миль, шириной около 1500 миль, там разбросаны сотни коралловых рифов (фиг. 94). Коралловые рифы встречаются и в других местах, но нигде их нет в таком количестве. Широко они распространены также на Сейшельских и Мальдивских островах в Индийском океане и в Красном море. Сравнительно небольшие рифы можно встретить в Вест-Индии и на Бермудских островах в Атлантическом океане.



Ф и г. 94. Распространение коралловых рифов. Районы, занятые рифами, из-за мелкого масштаба карты несколько преувеличены. Изотермы ограничивают пояса, где температура воды летом и зимой не ниже 70° (по Фаренгейту).
 1 — коралловые рифы; 2 — летняя изотерма 70° по Фаренгейту; 3 — зимняя изотерма 70° по Фаренгейту.

Коралловые острова были заселены задолго до прихода сюда белых. Полинезийцы, меланезийцы и отважные мореплаватели стран Азии добрались до них на своих утлых суденышках. Пришельцы быстро оценили удобства вулканических островов, окруженных коралловыми рифами. Под защитой рифов лодки легко приставали к берегу. В спокойных водах лагун можно было ловить рыбу и обеспечить себе пропитание. Сами коралловые острова не были столь надежной защитой: очень низкие, они во время сильных штормов заливались водой. Однако и они оказались густозаселенными. Корабли Магеллана в 1520 г., к сожалению, миновали бесчисленные коралловые острова, и первые европейские мореплаватели Тихого океана так и не узнали об их существовании. Впрочем, вскоре их открыли другие, и в течение первой половины XVI в. острова посещались неоднократно. Первые сведения о природе коралловых рифов собрал Кук во время своих плаваний в конце XVIII в. И все же первыми научными исследованиями коралловых рифов были наблюдения Чарлза Дарвина во время его плавания на корабле «Бигль» в 1835 г. Вскоре после своего путешествия Дарвин опубликовал остроумную гипотезу о погружающихся в глубины океана вулканических горах и растущих на них коралловых рифах. Споры вокруг этой гипотезы продолжались более ста лет.

Большинству исследователей, изучавших после Дарвина коралловые рифы, по-видимому, не хватало ни проницательности, ни фактов. Два выдающихся американских ученых первой половины XIX в. — В. М. Дэвис и Р. Дэли — читали в Гарвардском университете лекции о коралловых рифах и много писали о них. Именно они и сделали гипотезу Дарвина предметом горячих споров. Дэвис поддерживал ее, а Дэли предпочитал гипотезу А. Пенка, связывавшую образование коралловых атоллов с колебаниями уровня океана в ледниковое время. Дэли развивал гипотезу Пенка столь энергично, что в конце концов его стали считать автором этой новой идеи. Споры разгорались. Самое любопытное, что все участники этих споров были знакомы с коралловыми рифами только по литературе и видели их лишь во время коротких туристских экскурсий.

Тем не менее пока шли академические споры, кое-кто из ученых все же собирал материалы о коралловых рифах. Настоящему рифы стали изучать после второй мировой войны в связи с испытаниями американцами атомных и водородных бомб на Маршалловых островах. Специальные экспедиции, организованные генеральным штабом военно-морских сил США, в широких масштабах провели исследования коралловых рифов в Тихом океане.

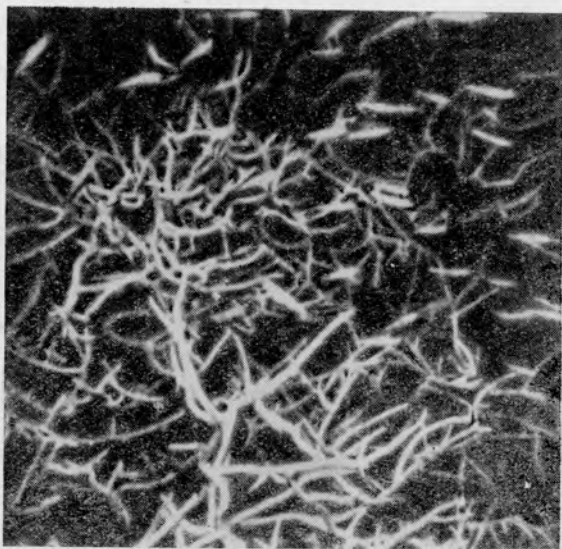
ПРИРОДА КОРАЛЛОВЫХ РИФОВ

Несмотря на все свое разнообразие, коралловые рифы обладают общими характерными особенностями. Все они представляют собой скалистые холмики, площадки или гряды, несколько возвышающиеся над уровнем океана. Состоят они главным образом из скелетов отмерших организмов. Внешний «каркас» рифа построен ветвистыми кораллами (фиг. 95), эти кораллы

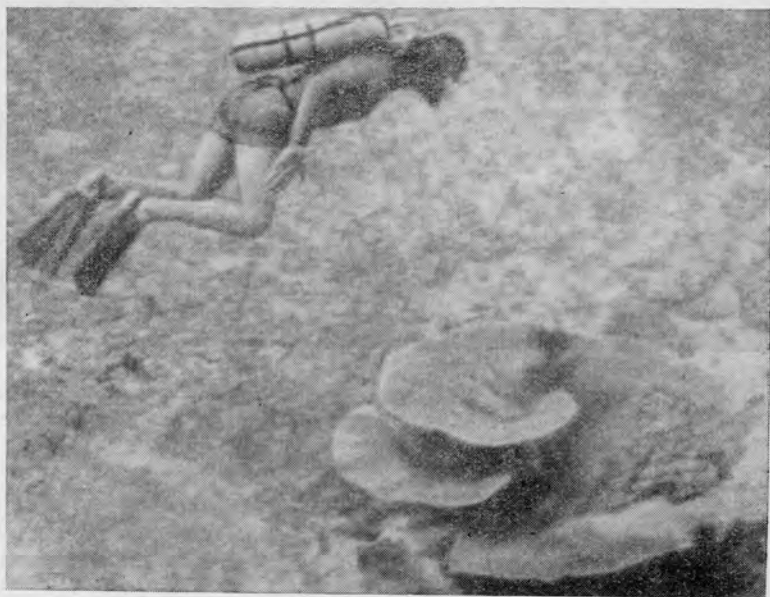


Фиг. 95. Над внешним краем рифа поднимается литотамниевая гряда.

растут вверх, так как все новые и новые поколения поселяются на отмерших. Волны смывают с внешнего рифа обломки кораллов и заносят их внутрь «каркаса». Обломки кораллов, живые кораллы, раковины моллюсков, известковые водоросли (например, ветвистая халимеда) и различные литотамнии скапливаются внутри этого сооружения (см. фиг. 95, 96, 97), образующего гряды по краям рифа. Коралловый риф — отнюдь не сплошная плотная масса известковой породы. Кораллы часто вырастают над неровной поверхностью рифа, оставляя в нем проходы и пещеры. Одни из них заполняются обломками, другие — лишь морской водой. Более мелкие отверстия делают в



Фиг. 96. Заросли ветвистых кораллов (акропора) в лагуне Бикини.



Фиг. 97. Похожий на зонтик или гриб коралл (акропора) растет на глубине 90 футов (южная часть Тихого океана).

рифе сверлящие организмы — морские ежи (фиг. 98) и моллюски. Эти организмы хотя и разрушают рифы, но деятельность их ничтожна в сравнении с буйным ростом рифообразующих кораллов и водорослей.

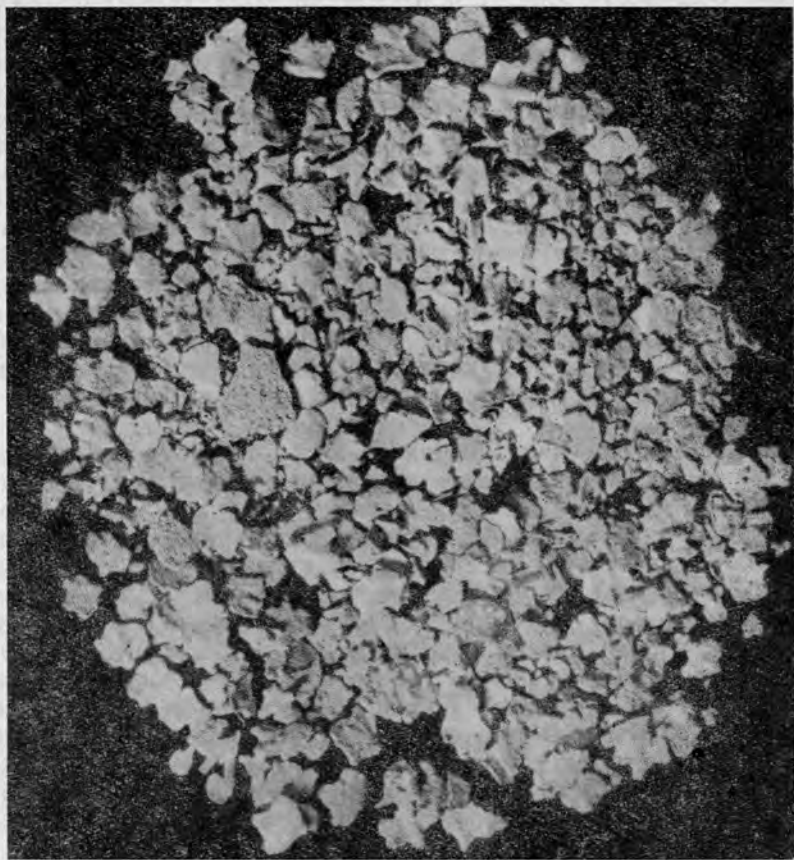


Фиг. 98. В нижнем правом углу фотографии — покрытый иглами морской еж, роющий себе нору в теле коралла. Коралл около аквалангиста — гелиопора, а в нижнем левом углу — поритес.

УСЛОВИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РОСТА КОРАЛЛОВЫХ РИФОВ

В то время как многие одиночные кораллы живут почти при любой температуре океанской воды и в пределах очень широкого диапазона глубин, рифообразующие кораллы более «при-

вередливы». Коралловые рифы обнаружены только в тех районах, где вода достаточно теплая почти круглый год. Отмечалось, что коралловые рифы не выносят температур ниже $18-16^{\circ}\text{C}$. Однако последние измерения температур воды во



Фиг. 99. Скопление известковых водорослей галимеда, поднятых со дна лагуны Бикини.

время работ Арабско-американской нефтяной компании вблизи Дахрана в Персидском заливе показали, что в течение последних пяти лет некоторые небольшие рифы выдержали довольно низкую температуру воды зимой (около 11°C). Возможно, такое понижение уравнивается сравнительно высокими летними температурами (30°C). Однако температура выше 40°C

для большинства кораллов, очевидно, смертельна. Глубина, на которой еще возможна жизнедеятельность рифообразующих кораллов, обычно равна 150 футам, хотя отдельные их виды были подняты драгой с глубины 580 футов.

Жизнедеятельность кораллов зависит также от солености воды. Они могут жить при солености воды 27—40 промилле (нормальная соленость воды 34—36 промилле). Иногда они гибнут из-за необычайно сильных дождей, которые значительно снижают соленость воды. Около Паго-Наго в Восточном Самоа, по сведениям Майджера (Институт Карнеги, Вашингтон), в 1920 г. прошел сильнейший ливень. За четыре дня выпало 37 дюймов осадков. Ливень этот погубил все местные рифы, то ли вследствие уменьшения солености морской воды, то ли из-за выноса на рифы большого количества ила. В чистой воде кораллы растут лучше, чем в мутной. Однако они могут оставаться живыми довольно долго в такой мутной воде, в которой дно просматривается лишь на расстоянии фута или меньше. Я знаю это из собственного опыта. Плавая как-то вблизи южного берега острова Молокаи, я исцарапал ноги о живые кораллы, которые не рассмотрел через маску до тех пор, пока на них не наткнулся.

Для роста рифообразующих кораллов, конечно, очень важно питание. Добычей хищных коралловых полипов становятся мельчайшие организмы (зоопланктон), проплывающие мимо. Кораллы захватывают их своими щупальцами, которые выпускают в ночное время. Однако эта охота пассивная, и жизнь кораллов зависит от циркуляции воды. Наиболее интенсивный рост кораллов по этой причине наблюдается с наветренной стороны островов и материков. Ветры гонят воду чаще в сторону наветренных побережий и, таким образом, лучше снабжают кораллы пищей. Местами, однако, на некоторых подветренных побережьях островов рифов больше, чем на наветренных, например на островах Гавайи и Молокаи в группе Гавайских островов, но на островах Оаху и Кауаи рифы на наветренной стороне преобладают. Вероятно, такое различие можно объяснить особенностями местных течений.

ТИПЫ РИФОВ

Существует три наиболее распространенных типа коралловых рифов: окаймляющие, барьерные и атоллы (фиг 101, 102). Окаймляющие рифы протягиваются вдоль побережья многих островов. У Гавайских островов можно пройти вброд по мелководной рифовой платформе около мили. Окаймляющие рифы бедны живыми кораллами и обычно покрыты корками известковых водорослей, обнажающихся при отливе. Кораллы растут

в углублениях или в пустотах этих мелководных платформ¹, но чаще всего на крутом внешнем крае платформы. Барьерные рифы отделены от островов лагунами, хотя местами выступы, окаймляющие рифы, могут соединять их с суши. Лучше других исследован барьерный риф вокруг Таити (см. фиг. 102). На барьерных рифах кораллы растут гораздо интенсивнее, чем на окаймляющих, так как вода здесь меньше загрязнена стоком ила с суши. Барьерные рифы часто растут у внешнего края островного шельфа, но иногда они располагаются и в пределах шельфа.

Атоллы — это рифы, кольцом окружающие лагуны, в которых нет ни вулканического, ни какого-либо иного высокого острова. Распространено мнение, что атоллы имеют форму круга, подобно атоллу Энветок в группе Маршалловых островов. На самом деле форма их неправильная, для атоллов характерны изогнутые очертания и острые выступы.

Не менее интересны столовые рифы — изолированные сооружения с плоской вершиной. Эти рифы весьма опасны для мореплавания в тропиках. Кое-где древние столовые рифы были приподняты и образовали плосковершинные острова, например остров Вашингтон, вблизи экватора, к югу от Гавайских островов.

Столовые рифы обычно расположены достаточно глубоко и для навигации не опасны. Такова банка Маньял западнее Мангалура (Индия) с минимальной глубиной 20 саженей. Однако большинство столовых рифов настолько мелководно, что их даже трудно исследовать: они почти всегда покрыты волнами прибоя.

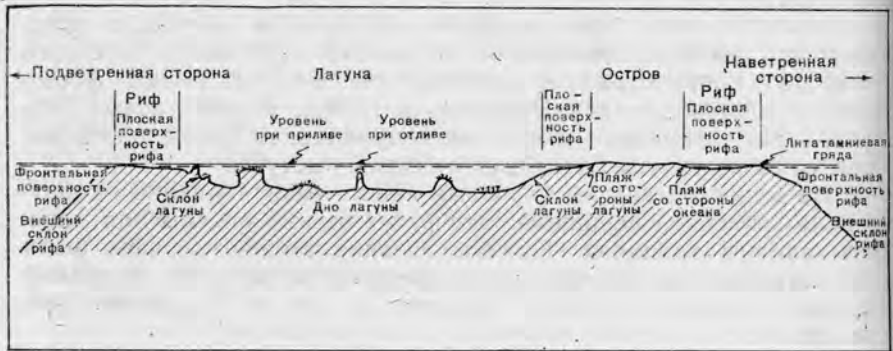
Коралловые рифы иногда имеют овальную форму и растут внутри атоллов, там, где есть хорошая циркуляция из открытого океана. Это так называемые пятнистые рифы, коралловые бугры и скалы. Рифы такого типа широко распространены на дне лагун. Например, в лагуне атолла Энветок насчитывается до 1500 таких рифов с крутыми склонами и довольно небольшой по площади вершиной.

На Мальдивских островах в Индийском океане в шельфе северо-западной Австралии встречаются многочисленные небольшие рифы кольцевидной формы. Жители островов называют их фарос. Одни из них имеют серповидную форму, другие — вид замкнутого кольца, с лагуной внутри, у третьих вся лагуна заполнена постройками кораллов, но край кольца все же слегка приподнят.

¹ Неподалеку от знаменитого пляжа Вайкики (остров Оаху), западнее зоны прибоя, можно найти одиночные кораллы, растущие в таких углублениях. Впрочем, это большая редкость, поскольку за ними охотятся, как за сувенирами.

АТОЛЛЫ

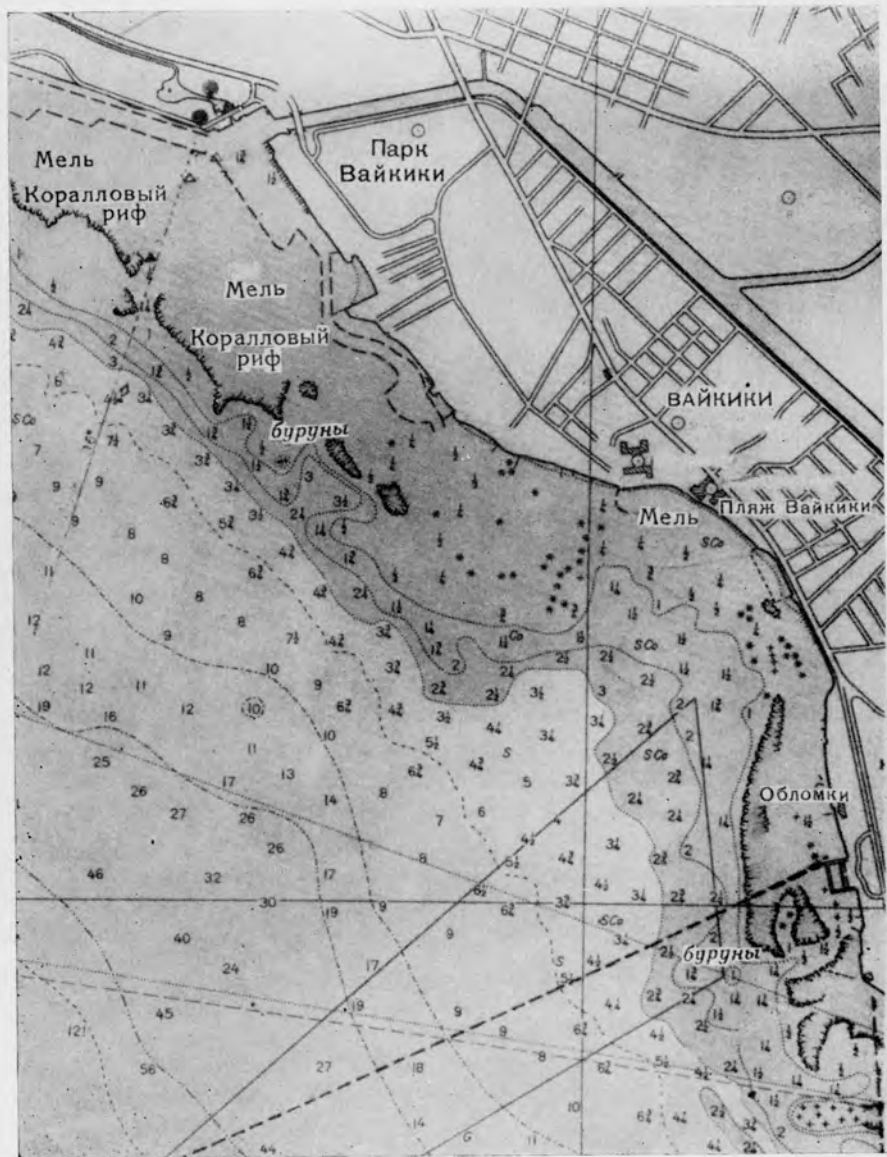
Атоллы — самый распространенный тип коралловых рифов в океанах и, несомненно, самый известный. В экваториальной части Тихого океана сотни атоллов протягиваются от островов Туамоту на востоке до Каролинских на западе (см. фиг. 94). Большой интерес среди ученых вызывает то обстоятельство, что на большинстве из этих островов не встречается никаких признаков вулканических пород ни в центре, ни вдоль края



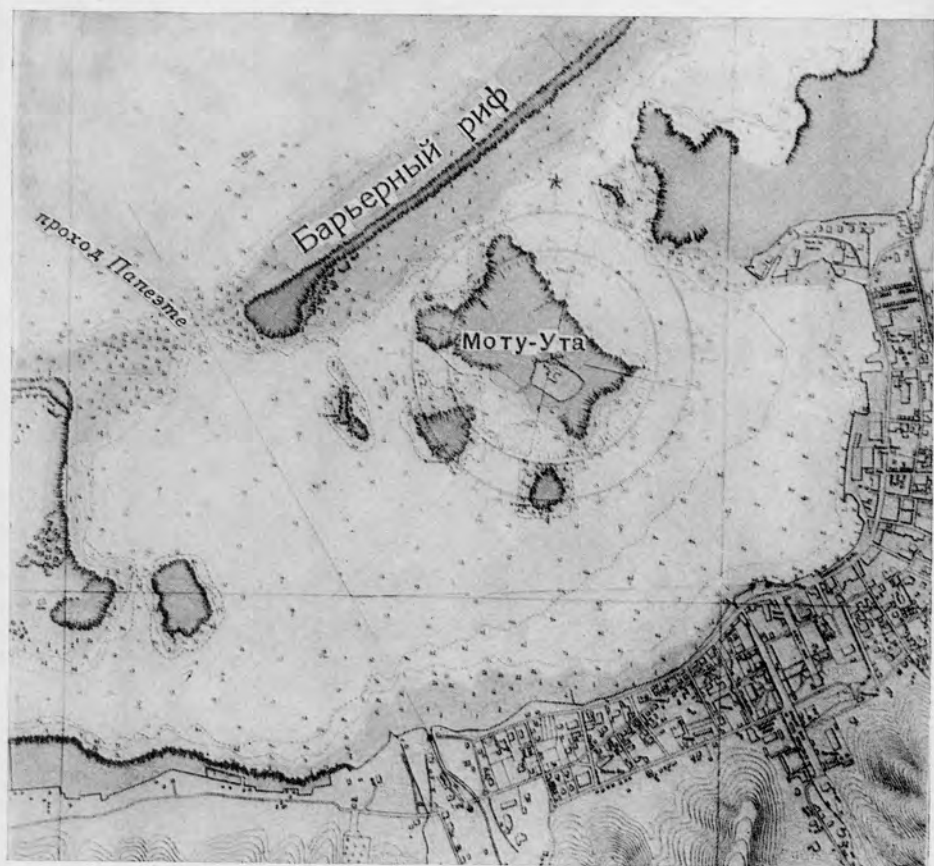
Фиг. 100. Схематический профиль атолла.

кольцевого рифа. А ведь кораллам необходимо какое-то основание, на котором бы они росли! Желание найти такой фундамент и послужило одной из причин изучить эти атоллы, расположенные в достаточно изолированных и малонаселенных районах.

Типичный атолл состоит из гирлянды островков, поднимающихся над кольцевидной отмелью. Проходы пересекают отмель и ведут в центральную лагуну атолла; по ним входят в лагуну корабли. Проходы встречаются главным образом на подветренных сторонах атоллов. На фиг. 100 показан поперечный профиль типичного атолла. Высота атоллов обычно всего лишь несколько футов, но этого достаточно, чтобы на них произрастали кокосовые пальмы и панданусы — растения, жизненно важные для человека, так как они дают и пищу, и тень, и, конечно, защиту от высоких волн при ураганах. Часть атолла, возвышающаяся над водой, сложена преимущественно обломками рифа. Волны намывают из них подобие вала. Как и следовало ожидать, эти островки развиты на наветренной стороне рифов. Кроме них, существуют площадки, представляющие собой приподнятую поверхность прежнего рифа. Высота их над водой не превышает 3—5 футов. Такие атоллы встречаются редко. На некоторых островах видны дюны. Песок дюн не содержит



Фиг. 101. Окаймляющий риф к западу от пляжа Вайики (Говолулу)



Фиг. 102. Типичный барьерный риф (порт Палезте, Танти).

ни кварца, ни каких-либо иных минералов, свойственных пескам материковых дюн. Дюны коралловых островов состоят из обломков кораллов, моллюсков, известковых водорослей, мшанок и фораминифер.

Внешний край типичного острова окаймляет пляж из кораллового и ракушечного песка. За пляжем находится мелководная рифовая терраса — собственно риф. Она сложена главным образом отмершими кораллами или известковыми водорослями; большие пятна живых кораллов образуют здесь невысокие холмики или стенки проходов, пересекающих поверхность рифа. На поверхности рифа можно наблюдать, как массивные кораллы поритес у берега сменяются голубой гелиопорой, а затем дальше в море — хрупкой акропорой (см. фиг. 96). За пределами плоскости рифа часто располагается гряда, состоящая из багряных известковых водорослей — литотамний. Эти водоросли в отличие от кораллов могут расти на побережье и выше уровня малой воды, так как получают достаточно влаги в виде брызг и водяной пыли, образующихся в зоне прибоя.

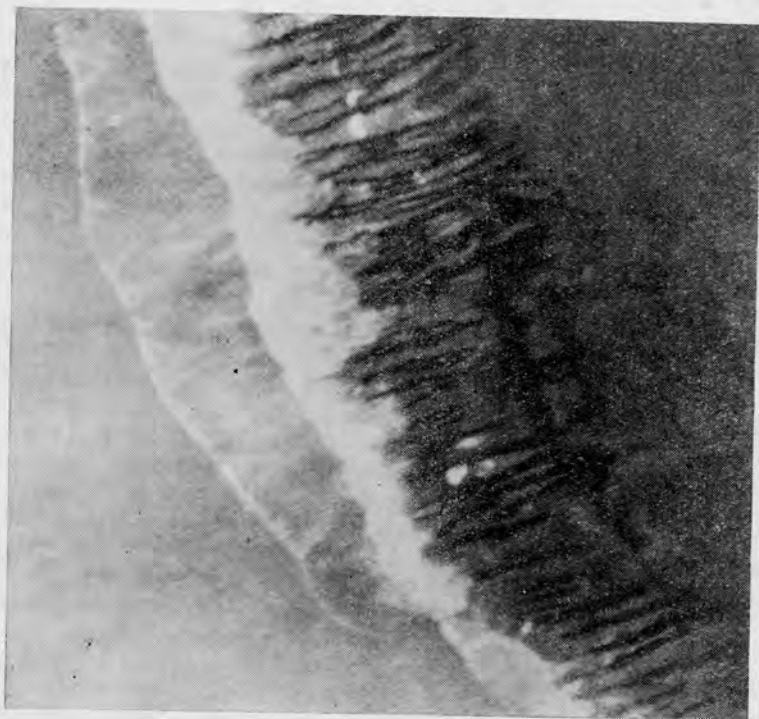
За литотамниевой грядой тянется склон, прорезанный многочисленными желобками, особенно с наветренной стороны островов. Эти желобки хорошо видны с воздуха (фиг. 103). Некоторые из них врезаны довольно глубоко в поверхность рифа и зарастают водорослями и кораллами. Внутренние проходы — отличное место для экскурсий с аквалангом. Здесь обитают яркие рыбки всевозможных форм и размеров, а на стенках буйно растут причудливые кораллы.

У основания первого уступа склона, на глубине около 10 саженей, часто располагаются небольшие террасы. За ними склон падает в глубины океана под углом 25°. Это самый крутой угол наклона, характерный для устойчивых откосов, образуемых коралловым песком и обломками. Однако на подветренной стороне некоторых атоллов верхняя часть склона еще круче и часто бывает вертикальной или даже нависает. Эти уступы изрешечены пещерами, как пчелиные соты. Большие глыбы откалываются от них и остаются лежать на крутом склоне. Внизу по склону атолла характер донных отложений не одинаков: сплошные нагромождения обломков глыб сменяются крупным коралловым песком с небольшим количеством глыб и, наконец, мелкозернистыми коралловыми песками.

На обращенной к лагуне стороне атолла расположена другая мелководная поверхность рифа. Она уже, чем на внешней стороне атолла. Ко дну лагуны ведет пологий склон. Дно лагуны вовсе не ровное, это не «бильярдный стол», как обычно считают. Почти во всех атоллах на дне возвышаются многочисленные коралловые бугры и фарос (атоллоподобные рифы). Да и между ними дно лагуны отнюдь не плоское, а расчленено

многочисленными неглубокими котловинками и небольшими возвышениями. Однако в некоторых местах эхограммы показывают широкие пространства выровненного дна.

Образцы грунта содержат мелкозернистые рифовые обломки вместе с напоминающими виноградные лозы известковыми во-

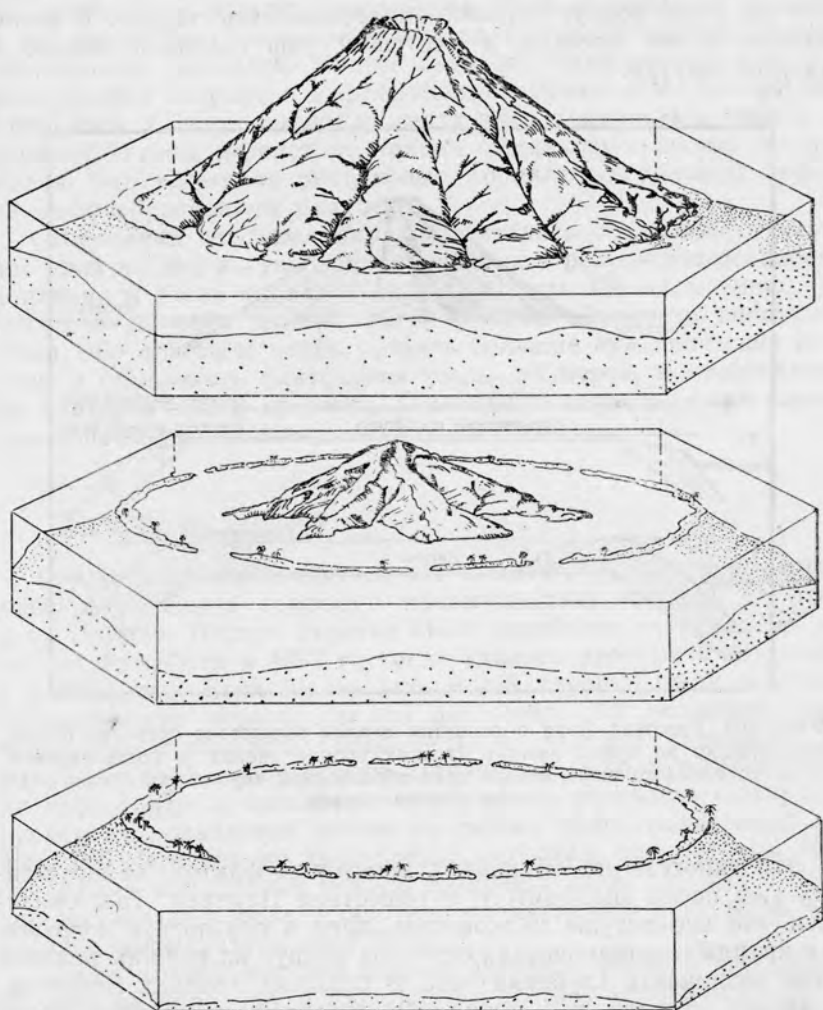


Фиг. 103. Подводные желоба на краю кораллового рифа. Слева расположена мелководная часть рифа, справа — большие глубины.

дорослями *Halimeda* (см. фиг. 99) и многочисленными фораминиферами. Проходы, ведущие в лагуну, обычно так же глубоки, как наиболее глубокие части лагуны.

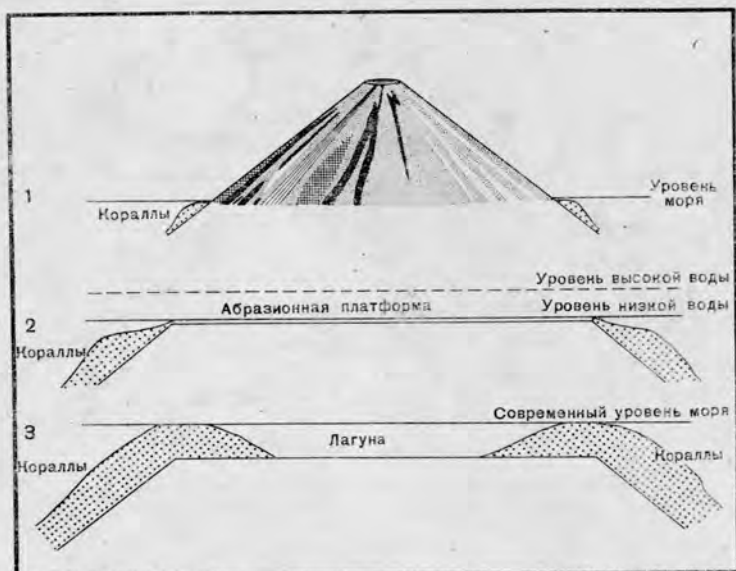
ПРОИСХОЖДЕНИЕ АТОЛЛОВ

Кораллы не могут расти с глубин океанского дна, следовательно, атоллы и столовые рифы в открытом океане, очевидно, зародились на некогда существовавшем мелководном основании. Самое простое объяснение этому предложено Дарвином (фиг. 104); по его мнению, атоллы формировались в ви-



Ф и г. 104. Блок-диаграмма, иллюстрирующая гипотезу Чарльза Дарвина о развитии атоллов вследствие погружения вулканических островов и сопутствующего ему роста коралловых рифов.

де окаймляющих рифов вокруг опускающихся вулканических островов. По мере опускания острова внешняя часть рифа росла вверх с такой же скоростью, с какой происходит погружение. Внутри рифа вокруг острова образовывалась лагуна. В конце концов остров исчезал, а растущий риф создавал кольцо с лагуной внутри.



Фиг. 105. Гипотеза Дэли о развитии атолла вследствие срезания острова волнами во время низкого стояния уровня океана и последующего роста кораллового рифа вокруг края абразионной террасы во время поднятия уровня океана.

Эта гипотеза не объясняла некоторых фактов, обнаруженных уже после знаменитого путешествия Дарвина. Так, оказалось, что все лагуны мелководны, хотя в результате погружения крупных вулканических островов вокруг их вершин должны были возникнуть глубокие рвы. В больших атоллах Эниветок, Ронгелап, Бикини и Кваджалейн (все они диаметром около 20 миль) внутри рифа, по теории, должны были бы существовать рвы, глубина которых уменьшалась бы к центру лагуны. В какой-то мере именно из-за того, что этого не наблюдалось, Р. Дэли принял гипотезу Пенка, предполагавшего, что атоллы возникли в результате роста рифов в течение послеледникового поднятия уровня океана. Дэли развил гипотезу дальше и предположил, что холодные ледниковые периоды сопровождались не только понижением уровня океана, но и охлажде-

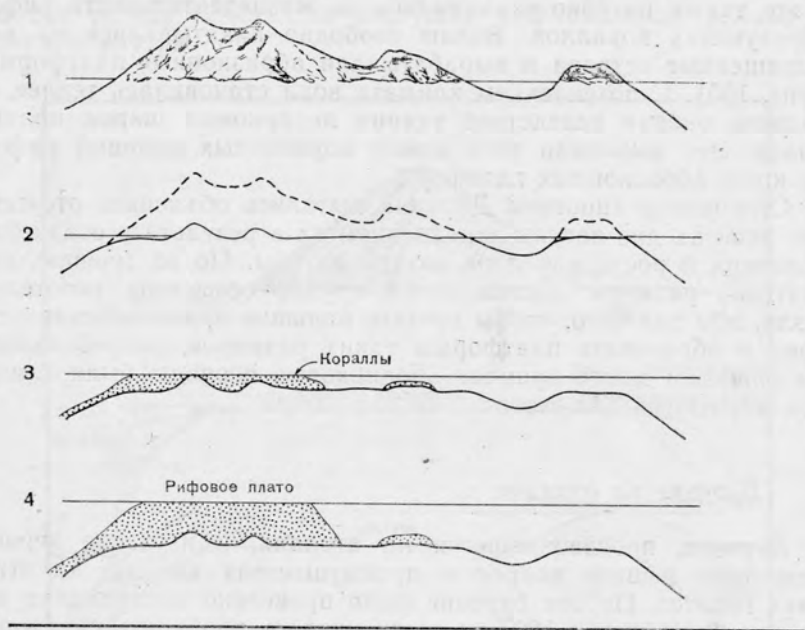
нием вод в районах распространения коралловых рифов, из-за чего колонки кораллов гибли. Он полагал также, что вода в это время из-за размыва коралловых илов становилась мутной, и это также пагубно сказывалось на жизнедеятельности рифообразующих кораллов. Волны свободно накатывались на незащищенные острова и вырабатывали абразионные платформы (фиг. 105). С потеплением климата вода становилась теплее, а уровень океана вследствие таяния ледниковых шапок поднимался. Это вызывало рост новых коралловых колоний рифов на краю абразионных платформ.

Сторонники гипотезы Дарвина пытались объяснить отсутствие рвов на дне лагуны заполнением их в результате осадконакопления и роста кораллов внутри лагуны. По их мнению, гигантские размеры многих лагун трудно объяснить гипотезой Дэли, ибо для того, чтобы срезать большие вулканические острова и образовать платформы таких размеров, потребовалось бы слишком много времени. Ледниковые периоды были слишком короткими для этого.

Бурение на атоллах

Бурение, производившееся на атоллах, и изучение кернов позволило решить вопрос о преимуществах каждой из этих двух гипотез. Первое бурение было проведено англичанами на атолле Фунафути в 1897 г.; тогда удалось пробурить скважину в 1100 футов. Если бы на небольшой глубине были вскрыты вулканические породы, то это послужило бы реальным подтверждением гипотезы Пенка — Дэли. Однако скважина не вышла из коралловой толщи. Дарвинская школа торжествовала победу. Дэли, однако, утверждал, что скважина была пробурена на коралловой осыпи на склоне рифа, показанной на фиг. 105. Бурение на Бермудских островах, при котором был обнаружен коралловый покров толщиной лишь 245 футов, свидетельствовало в пользу гипотезы «ледникового контроля», как названа в литературе идея Дэли.

Перед второй мировой войной японские геологи пробурили на острове Бородино, в 200 милях к востоку от Окинавы, скважину глубиной 1400 футов; голландцы достигли на острове Маратуа вблизи Калимантана глубины 1600 футов. Однако до подошвы кораллов они так и не добрались. Бурение на атолле Бикини в 1947 г. до глубины 2500 футов также не дало результатов. Но Дэли продолжал утверждать, что пробурен не риф, а лишь осыпь обломочного материала на его склоне. Для окончательного решения вопроса необходимы были исследования поистине гигантского масштаба. Они были предприняты в 1952 г. на атолле Эниветок военно-морским флотом и Геоло-



РИФОВОЕ ПЛАТО В БОЛЕЕ КРУПНОМ МАСШТАБЕ



Фиг. 106. Развитие атолла в результате волновой абразии, последующего погружения, сопровождающегося ростом рифа, и растворения коралловых известняков во время низкого стояния уровня океана в ледниковое время.

гической службой США под руководством Г. Ледда. Скважины, расположенные по обеим сторонам атолла, достигли глубины 4600 и 4200 футов; наконец лава была встречена. Теперь можно было согласиться с Дэли, что выбранная для бурения часть острова была просто осыпью. Однако керны из обеих скважин, так же как и при бурении на Бикини, продолжали тщательно изучать. Удалось установить, что мелководные условия существовали здесь все время, пока отлагалась эта мощная коралловая толща. Обломочный материал, попавший сюда случайно, было бы легко опознать, так как он содержал бы много глубоководных фораминифер. Однако было найдено только несколько среднеглубинных форм. К тому же в некоторых местах в кернах были получены большие куски коралла. При бурении часто встречались пещеры. Диаметр одной из них оказался 55 футов. Скважина, несомненно, пересекала риф, а не глубоководный склон осыпи, где, конечно, не могло быть сколько-нибудь значительных пустот. Бурением установлено также непрерывная последовательность отложений от эоценовых (образовавшихся около 60 млн. лет назад) до современных.

При бурении на других атоллах обнаружена аналогичная картина. Даже бурение на Бермудах не подтвердило гипотезы ледникового контроля, так как в кровле вулканических пород вместо следов абразионной платформы обнаружены признаки глубокого (до глубины 455 футов) выветривания — результат длительного периода надводного развития, в течение которого высота острова была значительно больше, чем ныне.

Все эти новые данные свидетельствуют в пользу дарвинской гипотезы погружения, хотя и не доказывают роста рифа вокруг оседающего конуса вулкана. Наиболее вероятное объяснение имеющихся в нашем распоряжении фактических данных приведено на фиг. 106. Когда-то, в далеком геологическом прошлом, возможно в меловом периоде, около 100 млн. лет назад, из моря поднималось множество срезанных волнами абразионных платформ и разрушенных денудацией вулканов (фиг. 106, 2), впоследствии погружившихся. Всюду, где были благоприятные условия для роста кораллов, одновременно с медленным погружением на этих вулканах вырастали коралловые рифы, банки и острова (профиль 3,4). В тех районах, где кораллы росли слишком медленно, срезанные плоские вершины вулканов сохранились в виде гюйо (см. гл. VIII).

Помимо длительного погружения, все рифы в последнюю стадию развития испытали влияние чередующихся подъемов и падений уровня океана, обусловленных сменой ледниковых периодов эпохами потепления климата. Возможно, результатом влияния именно этих колебаний уровня океана является столь

небольшая ширина современного кольца атоллов по сравнению с широкими лагунами. Временно приподнятые рифы подверглись растворению дождевой водой (профиль 5). Такое растворение рифов, растущих под уровнем океана, невозможно, ибо океанская вода насыщена карбонатом кальция. Однако как только риф выходит на поверхность, он подвергается растворению. Возможно, что в ледниковые периоды более эффективным было и влияние волн, поскольку рост рифов, защищающих берега, в то время прекратился. Впрочем, большая часть рифообразующих кораллов, очевидно, выживала. С началом поднятия уровня океана на краю временно сократившихся рифов вырастали новые, образовав современные кольца атоллов. Они располагались на краю рифовых платформ, сложенных коралловым материалом, и не являются срезанными вершинами вулканических островов.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОРАЛЛОВЫХ ОСТРОВОВ

Не только атоллы, но и множество коралловых островов достаточно высоки, чтобы на них могла поселиться наземная фауна и человек. Между тем, как известно, коралловые рифы не растут над уровнем воды. Попробуем объяснить происхождение таких островов. Существование большинства из них связано с деятельностью волн. Штормовые волны могут построить из обломков коралловых рифов валы высотой до 10 и более футов над уровнем моря. Ветер, перевеявая песок пляжей, иногда создает и более высокие дюны. Это действительно самые высокие формы рельефа на многих коралловых островах. И все же одни дюны сами по себе не могли образовать поднятых островов. Видимо, отчасти эти острова обязаны своим поднятием движениям земной коры, вызвавшим временную остановку их опускания. Возможно также, что уровень моря понизился в послеледниковое время. Существует несколько рифов, расположенных над уровнем океана, однако тихоокеанские атоллы в основном подняты над водой всего на 3—5 футов. Если поднятые рифы — результат относительно недавнего понижения уровня океана, то подтверждение этому можно получить радиуглеродным методом. Однако результаты, полученные этим методом, по моему мнению, свидетельствуют не в пользу высокого положения уровня в послеледниковое время. Правда, данные эти пока еще не очень надежны. Вполне возможно, что рифы подняты вследствие изменений направления тектонических движений основания рифа. Признаки таких изменений установлены Леддом по образцам, полученным при бурении на атолле Эниветок. В горизонтах, относящихся к доледниковому времени,

он обнаружил продукты выветривания, раковины наземных моллюсков, пыльцу и споры. Все это свидетельствует о временном поднятии рифа, до этого испытавшего длительное погружение.

БОЛЬШОЙ БАРЬЕРНЫЙ РИФ

Вдоль восточного побережья Австралии, к северу от Брисбена, на материковой отмели расположено множество коралловых рифов и островов, образующих полосу длиной 1500 и шириной около 100 миль. Это, несомненно, самый крупный на земном шаре район сплошного распространения кораллов. Здесь почти все пространство шельфа покрыто коралловыми рифами и островами. Правда, между побережьем материка и рифами, а также среди рифов есть широкие проходы, на дне которых кораллы не обнаружены. Австралийский риф до сих пор изучен плохо; основная часть современных сведений о нем была получена во время второй мировой войны австралийскими геологами Р. Фейрбриджем (Колумбийский университет) и К. Тейчертом (Геологическая служба США). До этого исследованиями рифа занимался специальный комитет. Хорошо известны работы членов этого комитета биологов С. М. Янга (Университет Глазго) и Т. С. Ругхели (Технологический музей, Сидней) и географа Д. А. Стирса (Кембриджский университет). Начало исследований Большого Барьерного рифа относится еще к XVIII в. и связано с плаваниями Кука вдоль побережья Квинсленда. Ему не повезло, и он потерял на рифе один из своих кораблей, который ночью сел на риф и получил большие пробоины.

Австралийские рифы по форме весьма разнообразны. Среди них много так называемых фарос — рифов округлой формы, похожих на миниатюрные атоллы. Говорят, что в море нет прекраснее коралловых зарослей этих рифов. Кораллы необычайно красивы и очень разнообразны по окраске. Они служат прибежищем бесчисленных стай ярких рыбок и других причудливых обитателей моря, например голожаберных моллюсков с их колышущимися пурпурными мантиями, морских анемонов и разноцветных морских звезд.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ БОЛЬШОГО БАРЬЕРНОГО РИФА

Вокруг вопроса о происхождении Большого Барьерного рифа Австралии, так же как и о происхождении атоллов, давно уже ведутся споры. Дарвин и его последователи полагали, что эти рифы выросли на погружающемся побережье материка.

Школа Дэли, с другой стороны, отдавала предпочтение абразионной береговой платформе, сформированной во время понижения уровня океана в ледниковый период, и росту рифов на внешней ее стороне в послеледниковое время. И на этот раз бурение разрешило спор. По настоянию комитета по изучению Большого Барьерного рифа там были пробурены две скважины. Выяснилось, что толща кораллов прослеживается до глубины 400—450 футов. Ниже встречен слой терригенного песка и мелкого гравия мощностью 200 футов. Этот слой представляет собой мелководные отложения и указывает, так же как и сама структура рифа, что этот район испытал погружение. Риф вырос в значительной мере благодаря этому опусканию. Возможно, конечно, что на его росте сказались также колебания уровня океана в ледниковое время. Пока еще не удалось пробурить скважины во внешней части рифа, где толща кораллов должна быть значительно мощнее.

СКАЗОЧНЫЙ МИР КОРАЛЛОВЫХ РИФОВ

Не могу устоять перед искушением отвлечься от основной задачи книги и дать несколько советов. Как насладиться сказочным царством коралловых рифов, не подвергая себя опасности? Знакомство с этим чудесным миром было самым волнующим событием в моей жизни, и хотелось бы, чтобы и мои читатели когда-нибудь испытали подобное. В некоторых местах, посещаемых туристами, уже есть специальные катера со стеклянным дном, позволяющим рассматривать коралловые рифы сверху. К сожалению, такие катера можно встретить лишь в населенных местах, где воды уже сильно загрязнены человеком. Сквозь мутную воду плохо видно, да и кораллы в таких условиях чахлые, и разноцветных рыбок не всегда удастся увидеть. Поэтому самый лучший способ посмотреть коралловые рифы во всей их красе — это отправиться на какой-нибудь отдаленный и малонаселенный остров. Не беда, если нет акванганга. Достаточно будет маски со стеклом-иллюминатором, защищающей глаза. С ней можно прекрасно нырять и плавать на рифах. Неплохо иметь так называемый шнорхель — дыхательную трубку, с ней можно подолгу не всплывать.

Обязательно наденьте резиновые ласты, которые помогут плыть без помощи рук, а это очень важно, так как всплески воды пугают рыбу. Они пригодятся также, если вам вдруг захочется походить по рифу. Голые ступни легко поранить об острые выступы кораллов. Эти порезы могут причинить массу неприятностей, так как в ранки попадают частицы живых кораллов, вызывающие тяжелую инфекцию. Перчатки также за-

щитят вас от порезов. В мелководных частях рифа наблюдать гораздо интереснее. Вот здесь вам и пригодятся перчатки. Придерживаясь за кораллы и отталкиваясь от них руками, вы спокойно проплывете мимо них. Идя по рифу, ничего толком не видишь и на каждом шагу проваливаешься в яму, рискуя при этом сломать ногу или сильно исцарапаться. В перчатках легче и безопаснее собирать кораллы, поскольку они предохраняют руки от порезов и яда кораллов, жалящих, словно крапива, но с гораздо более опасными последствиями. Такие жалящие кораллы весьма распространены, например, в Вест-Индии.

Плавая на рифе, берегитесь течений. Очень часто сильные течения бывают в проходах барьерных рифов. Они вызваны нагоном воды волнением, перехлестывающим через риф. Приходится предупреждать об опасности этих течений, так как проходы рифа представляют в то же время исключительно удобное для плавания и наблюдения место. Глубина в них больше, чем на рифе, и здесь не оцарапаешь ноги кораллами. На стенках прохода в изобилии растут причудливые и разнообразные кораллы. Именно там живут бесчисленные разноцветные рыбки. Если вы когда-нибудь познакомитесь с коралловым рифом, вас непременно будет тянуть именно в проходы. Как же избежать опасности попасть в течение? Прежде всего можно попытаться, почувствовав начало такого течения, выбраться на более мелкое место сбоку от прохода. Однако течение может быть таким сильным, что вы не успеете сделать это, и вас вынесет в открытое море. Плыть здесь гораздо труднее. Кроме того, очень опасно попасть в зону прибой. Сильные удары волн на коралловых рифах могут просто убить человека. Вас опять выручат резиновые ласты: они дают возможность плыть с большой скоростью и даже против течения.

Другая опасность купания на рифах связана с хищными рыбами. К счастью, акулы водятся лишь в открытом море. Были, правда, случаи, когда так называемые акулы-людоеды случайно заплывали в лагуну. Однако акулы не могут плыть по мелководью, и поэтому от них всегда можно укрыться на мелководных частях рифа. Вообще акула редко нападает на человека, а если и собирается напасть, то сначала несколько раз проплывет мимо с целью разведки. Зная это, пловец всегда может вовремя удрать на мелководье. Если вдруг вы увидите большую акулу, то лучше всего спокойно плыть к отмели, а не бросаться от акулы в панике, изо всех сил шлепая по воде руками и ногами, потому что это лишь ускорит ее нападение.

Пожалуй, более реальна опасность наступить на рифе на ядовитую рыбу, вроде рыбы-льва, распространенной в западной части Тихого океана и в Индийском океане. Очень легко и очень

опасно также наступить на колючего морского ежа. Обычно они лежат на дне и плохо заметны из-за покрывающего их песка. Опасны угри, прячущиеся в пещерах и дырах кораллового рифа. Они почти никогда не вылезают оттуда и не нападают на человека в воде, но агрессивны в своих норах. Об этом не следует забывать энтузиастам исследований подводных пещер и нор на коралловых рифах.

Я вовсе не хочу запугать вас, а советую быть осторожным. Тогда плавать на коралловых рифах будет не более опасно, чем ездить на автомашине по горным дорогам или переходить улицы в больших городах.

СОВРЕМЕННЫЕ ДОННЫЕ ОСАДКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРОШЛОГО

ИЗ КАБИНЕТА НА КОРАБЛЬ

Из поколения в поколение геологи любят повторять: «Современность — ключ к пониманию прошлого». Однако эти слова так и остаются словами. Еще недавно для оценки существующего в геологии положения можно было бы применить афоризм Марка Твена о погоде: «Каждый говорит об этом, но никто ничего не может сказать». Изучение современных океанов представляет для геологов большой интерес, так как осадочные горные породы образовались в древних водоемах в условиях, сходных с современными. Успех работ огромной армии геологов-практиков зависит от удачного выяснения ими условий накопления осадочных пород в прошлом. Следовательно, им никак нельзя пренебрегать знакомством с современными осадками.

Применявшийся долгое время метод исследования, по существу, был умозрительным. Анализируя результаты обширных полевых работ, геологи довольствовались весьма поверхностными представлениями о морских волнах и течениях. О донных морских отложениях они знали еще меньше. Тем не менее, основываясь на этих скудных представлениях, геологи прежних лет строили смелые предположения об условиях, существовавших в водоемах прошлого и накапливавшихся в них осадках. Этот метод применялся очень широко. Часто его называли «кабинетной геологией». Вероятно, получаемые с его помощью результаты были не так уж плохи, раз он имел столь широкое распространение. С развитием исследований в морях и океанах геологов ожидало много сюрпризов. Однако, несмотря на новые открытия, геологи до сих пор располагают все еще слишком малым количеством данных, которые помогли бы им при выяснении условий накопления осадочных горных пород минувших геологических периодов. Такое положение объясняется отчасти тем, что океанографические исследования ведутся в основном в глубоководных областях океанов. Между тем большая

часть осадочных пород была отложена, по представлениям геологов, в мелководных морях. Исследования мелководных осадков проводились до недавнего времени в сравнительно малых масштабах. Правда, и в этой области были выполнены некоторые интересные работы. Например, П. Траск (Калифорнийский университет) собрал образцы донных осадков из различных частей света в поисках разгадки происхождения нефти.

Геологам часто приходилось плавать на рыболовных судах, которые работали в основном на материковой отмели. При этом удавалось собирать интересные материалы. В последние годы важное значение приобрели исследования берегов. Все это помогло ученым лучше понять условия накопления осадочных пород в прошлом¹. Возможно, одна из наиболее серьезных попыток изучить современные осадки, как ключ к пониманию геологического прошлого, была предпринята в 1951 г. Американским нефтяным институтом. Проект таких исследований был выдвинут сотрудником этого института Ш. Лоуменом, одним из первых геологов-нефтяников, оценивших значение исследований современных осадков. Комитет американских геологов-нефтяников долго изыскивал способ организации таких исследований. Наконец, они были поручены Калифорнийскому университету и стали проводиться учеными Скриппсовского океанографического института. Первоначально районом исследования были мелководья северо-западной части Мексиканского залива. Полученные при этом результаты оказались полезными для анализа древних осадков, поэтому работы в таком направлении продолжают и сейчас.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПЕСЧАНИКОВ

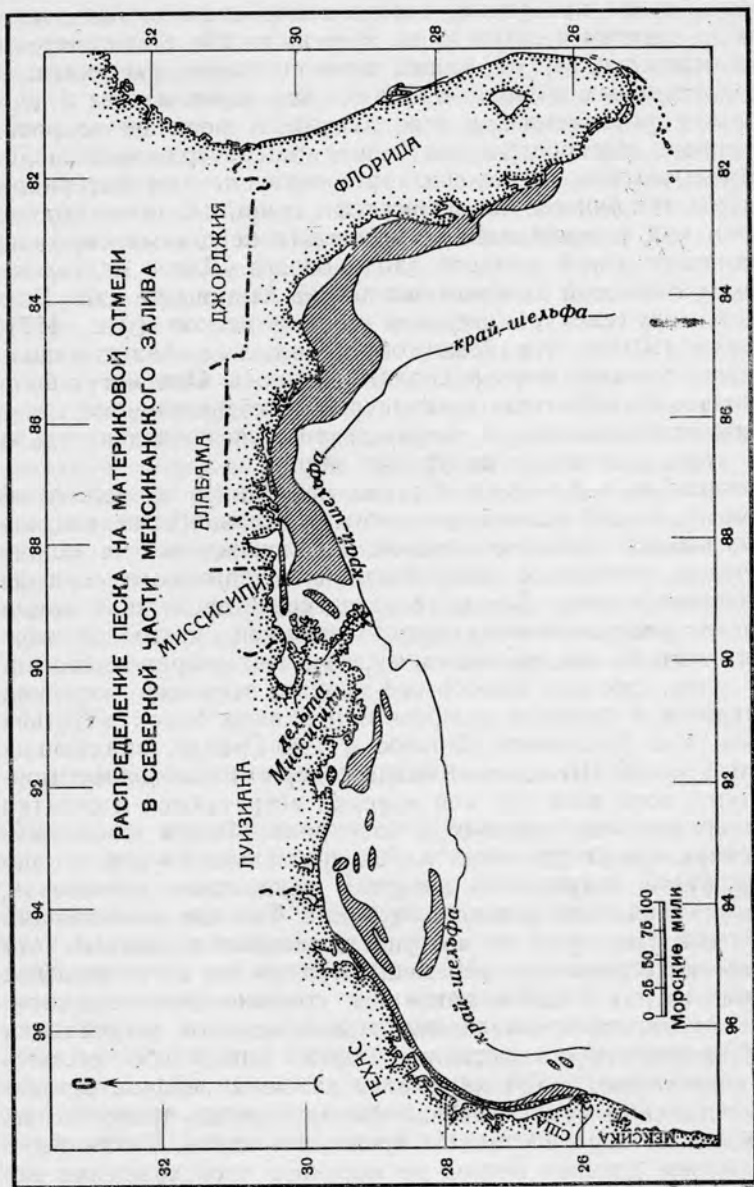
Приведем некоторые примеры, как на основании данных о современном осадконакоплении можно судить об этих условиях в далеком прошлом. Начнем с песчаников. Песчаники состоят из зерен, видимых невооруженным глазом; диаметр их меняется в пределах от $\frac{1}{16}$ до 2 мм. Эти осадочные породы образовались либо на суше, либо в море. Зачастую невозможно уверенно сказать, каково их происхождение. Особенно это трудно, когда ископаемые остатки фауны и флоры редки или вообще отсутствуют. Несколько типов песчаников представляют нам либо морскими осадками, либо отложениями барьерных островов, находящихся на границе морских и материковых осадков. Об этих морских и пограничных осадках и пойдет речь.

¹ Прекрасный обзор этих исследований дан в книге К. Данбара и Дж. Роджерса. См. русский перевод: «Основы стратиграфии», М., ИЛ, 1962.

Пластовые покровные песчаники

Имеются такие песчаники, пласты которых могут быть прослежены на десятки и сотни миль. Многие из них были сочтены речными отложениями, образованными потоками, растекающимися по предгорным равнинам. Однако некоторые из них содержат морские ископаемые, и это затрудняет решение вопроса. Пески широко распространены сейчас на материковых шельфах, однако обычно это не связано с поступлением материала с суши. Там, где они все же выносятся с суши, например вблизи устьев рек или у оснований размываемых береговых обрывов, пески залегают узкой полосой вдоль берега. Далее в сторону моря за этой полосой прибрежных песков лежат уже илы. Еще дальше в море следует широкая полоса песков (фиг. 107). Можно думать, что эти пески образовались в более раннее время, когда уровень моря располагался ниже. Они могут быть отложениями потоков, еще не перекрытых современными осадками, или древних пляжей, наращивавшихся последовательно в глубь суши при поднятии уровня моря.

Некоторые из покровных морских песчаников не являются, по-видимому, ни пляжевыми, ни речными отложениями, так как их фауна весьма сходна с морской. Происхождение их можно объяснить на материале исследований материкового шельфа Мексиканского залива. Здесь пески встречаются в виде широких поясов, расположенных вдоль внешней части шельфа. Большая часть из них, по-видимому, не имеет современного питания с суши, так как выносимый реками песчаный материал откладывается в глубине заливов или в виде баров в устьях таких рек, как Миссисипи, Бразос и Рио-Гранде, впадающих в открытый залив. Шельфовые пески содержат в основном морскую фауну, хотя вместе с ней изредка встречаются и остатки древних организмов, живших в эстуариях. Фауна фораминифер, в современных условиях характерная для глубин до нескольких футов, встречается вместе с раковинами моллюсков, обитающих сейчас на меньших глубинах. Так как в настоящий момент песок сюда уже не поступает, кажется вероятным, что древние пески и раковины перемещаются по дну современными течениями; сверху падают раковины современных фораминифер. В речных отложениях ископаемые остатки встречаются редко. Поэтому при затоплении морем какой-либо области обычно единственно сохраняющимися затем в осадках органическими остатками будет морская фауна периода трансгрессии. Она вымыта из переработанных прежних осадков. Такая переработка морем древних песков не морского происхождения может объяснить нам происхождение многих морских песчаников, особенно там, где песчаники широко распространены, но мощность их небольшая. Многочисленные трансгрессии моря, про-



Ф и г. 107. Распределение песчаных осадков на материковом шельфе северной части Мексиканского залива. Остальное пространство дна занято илами.

исходившие в прошлом, создавали благоприятные условия для такой переработки.

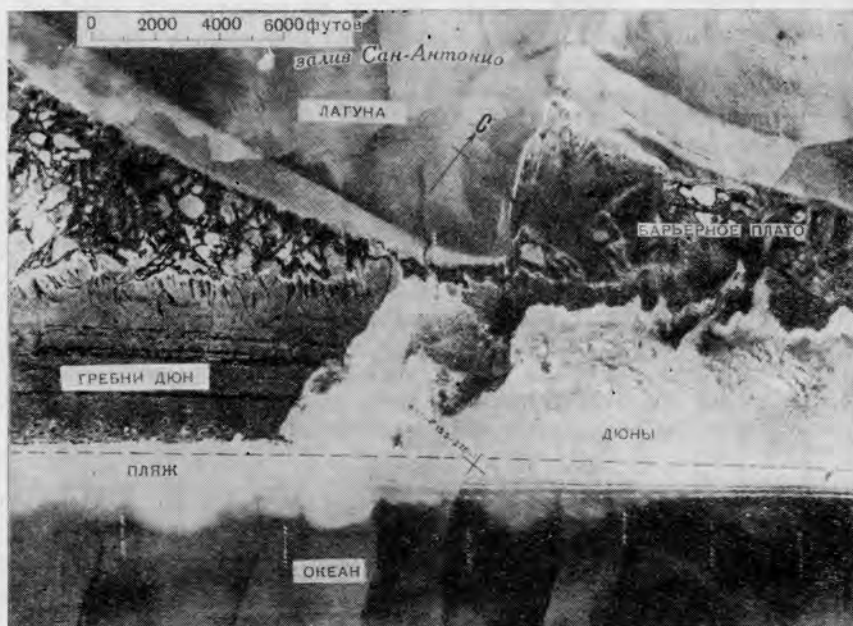
Другой причиной образования морских покровных песчаников могли быть мощные приливные течения. Например, сильные течения вдоль внешнего выступа мыса Код несут пески, смытые с береговых обрывов к северу и югу от него. Наиболее значительные накопления таких песков образуются на Нантакетской отмели к югу от мыса. Эти отмельные пространства перемещающихся песков легко могут сохраниться в дальнейшем в виде довольно неровного покрова песчаников. Подобным образом южная часть Северного моря является областью распространения песков, источником поступления которых преимущественно служат сильные приливные течения, проходящие через узкий пролив Ла-Манш. И здесь пески также имеют неровную поверхность и легко перемещаются. В процессе общего поднятия и осушения этой области возможно образование морских песчаников, содержащих редкие «следы» суши и береговых отложений, подобных Доггер-Банке, где драгированием были получены орудия ископаемого человека. Песчаная равнина шириной около 7 миль вблизи залива Мон-Сен-Мишель на побережье Нормандии представлена в основном береговыми отложениями. Эта равнина то осушается, то заливается приливом. Если бы эти отложения сохранились в виде горной породы, то они были бы похожи на покровные песчаники.

Нефтеносные линзы песчаника

Один тип песчаников встречается в виде вытянутых линз и полос, а не покровов. Эти линзы и полосы представляют большой интерес, так как в них содержится большая часть мировых запасов нефти. Одни из них, очевидно, являются речными песками, образовавшимися в результате заполнения русел речных потоков, другие рассматриваются как древние барьерные острова, подобные огромным песчаным островам, протягивающимся вдоль побережья Техаса. Когда в линзах обнаруживается нефть, геологам-нефтяникам необходимо знать их происхождение, чтобы предсказать направление простирания и размеры линз песчаника. Изучение современных осадков сыграет известную роль при распознавании этих двух типов песчаниковых образований.

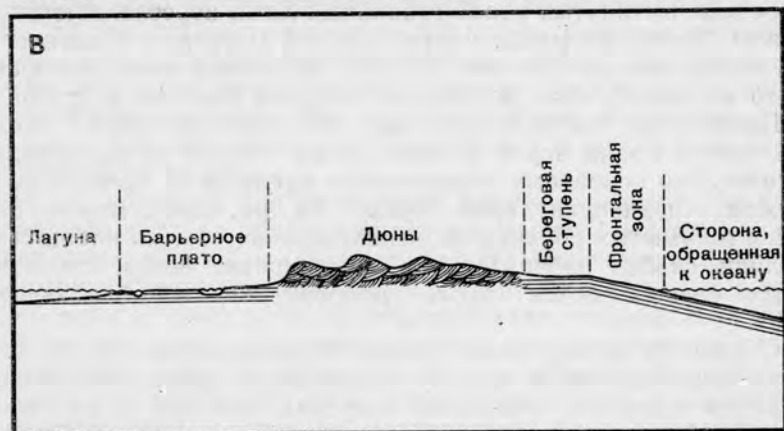
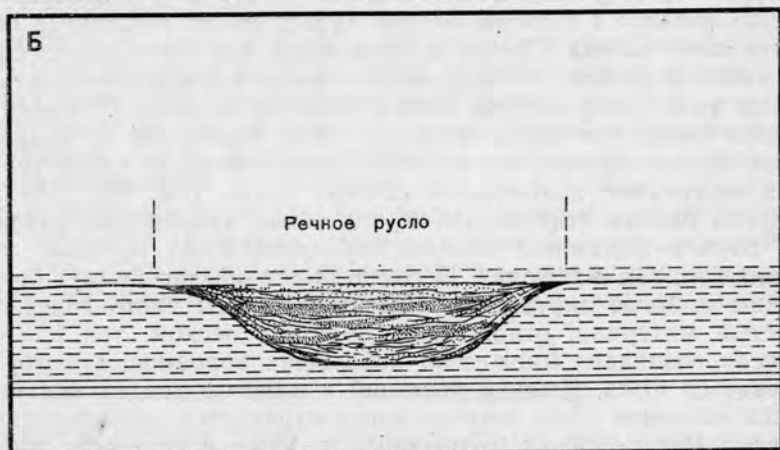
Американским геологам легко изучать общую географию барьерных островов, поскольку такие барьеры простираются почти непрерывно от гавани Нью-Йорка на юг вдоль восточного побережья США и вокруг побережья Мексиканского залива вплоть до мексиканской границы. Они сопряжены с восточной береговой низменностью Соединенных Штатов совершенно так же, как окаймляют подобные низменности в других частях све-

та. Очертания их прямолинейны или слегка выпуклы в сторону океана, со стороны лагуны или маршей они обычно изрезаны в виде фестонов (фиг. 108). Подобно дюнам и барханам в пустыне, океанские волны спрямляют сторону, обращенную к океану, а на внутренней образуются конусы под действием волн, перекатывающихся через барьер, или вследствие роста приливных дельт внутри мигрирующих заливчиков.



Фиг. 108. Аэрофотоснимок типичного барьерного острова. Обратите внимание, что растительность произрастает только на гребнях дюн, в других местах дюны расползаются по всему острову и растительностью не покрыты. На равнине барьерного острова чрезвычайно много озер. Пунктирной линией обозначен внутренний край пляжа.

Песчаные русла речных потоков, напротив, обычно имеют извилистые очертания, и само русло в целом следует общей извилистости реки, пересекающей низменность. Русло реки обычно направлено примерно под прямым углом к побережью, а барьерные острова в общем параллельны побережью. Учитывая это, можно определить направление простираения нефтеносных песчаных пластов такого типа, если для периода их образования известно относительное расположение суши и моря.



Фиг. 109. А — осадки, слагающие барьерный остров, в разрезе осадочных пород. Б — поперечный разрез типичного заполнения речного канала русла потока линзами грубозернистых осадков, соответствующих мигрирующим рукавам реки. В — поперечный разрез барьерного острова, показывающий наклоны поверхностей напластований и косую слоистость дюн.

В поперечном профиле барьер чаще шире в подошве и уже в кровле (фиг. 109, А), но возможны случаи, когда кровля смещалась относительно подошвы, так что барьер оказался несимметричным. Наши исследования показали, что барьеры могут передвигаться как в сторону суши, так и в сторону моря. В штормовой период они перемещаются в сторону суши, тогда как при штилевом море — в обратном направлении. Песчаные толщи, заполняющие речные русла (фиг. 109, Б), отличаются тем, что имеют в поперечном профиле узкую подошву и широкую относительно плоскую кровлю в противоположность округлой кровле барьеров.

Детали структуры, показанной на поперечном профиле барьера (фиг. 109, В), совершенно отличны от структуры отложений речных русел. Со стороны океана барьер имеет наклонные песчаные слои пляжа. Далее расположены горизонтальные слои пляжевых ступеней, а еще дальше — дюны с косой слоистостью. Пляжи со стороны лагуны имеют обратное падение. Отложения речных русел, наоборот, содержат слои, падающие от краев с обеих сторон наружу, что вызвано оползаниями, а также серии линз посередине поперечного сечения русла (см. фиг. 109, Б).

Сами осадки этих песчаных тел также совершенно различны. Барьер образован хорошо сортированными песками, как на пляжах, так и в дюнах. Песок в дюнах обычно бывает более тонким и более окатанным. Намытые конусы часто содержат илистый материал, отложенный вместе с песком, так как на конусах возникает множество небольших водоемов, в которые наваевается пыль. Пыльца растений и илистые осадки испарившихся водоемов очень широко распространены в таких песчаных толщах. Речные пески отсортированы хуже и содержат много полос ила, вытянутых вдоль гравийных линз, переиславляющихся с ними. Такой же плохо сортированный материал заполняет и всю долину потока (см. фиг. 109, Б), поскольку меандрирующее русло мигрирует вниз по долине от одной стороны к другой.

Посмотрим, что дает изучение ориентировки граней песчаных зерен. Грани зерен речного песка обычно ориентированы параллельно основному направлению русла, в то время как на пляжах — перпендикулярно берегу. То же самое можно сказать и о намытых конусах. В дюнах, однако, обычно наблюдается лишь слабая избирательная ориентировка зерен, грани которых располагаются вдоль направления преобладающего ветра.

О разнице между отложениями барьеров и речных потоков часто свидетельствует также ископаемая фауна. Отложения барьеров содержат множество морских раковин с океанской стороны. Многие раковины вынесены также и в дюны. Раковины лагун могут быть обнаружены с внутренней стороны барьера, где они смешиваются с единичными океанскими раковинами.

ми. Отложения речных русел обычно включают мало ископаемых, и при этом они пресноводного типа. Исключение представляют места, где река переработала древние морские отложения и переотложила их вместе с речными остатками.

Значение барьерных островов как «ловушек» для нефти раньше часто не принималось во внимание. Большинство геологов старой школы считали, что эти острова являются эфемерными формами, образованными на поднимающихся побережьях и неминуемо разрушаемыми затем деятельностью рек. Предполагалось, что на устойчивых берегах песчаные барьерные острова смещаются волнами к берегу, заполняют лагуну, а затем разрушаются. Однако современные исследования показали, что песчаные барьерные острова вдоль побережья Мексиканского залива образовались в основном при поднятии уровня моря в послеледниковое время, то есть в условиях погружения, а не поднятия суши. Барьеры образовывались также и по краям дельт, где отложение осадков приостановилось, а ранее отложенная толща уплотнялась и оседала. Продолжительное погружение вдоль многих побережий, связанное с тектоническими движениями, также приводило к образованию и затоплению песчаных барьеров. Так было, например, вдоль побережий Техаса и Луизианы. Песчаные тела барьерных островов при этом сохранились и стали играть роль резервуаров для нефти, мигрировавшей в них из окружающих илистых морских отложений.

Глубоководные пески и их распознавание

Если в мощных слоях сланцев с признаками накопления в спокойной воде обнаруживали тонкие четкие прослои песчаников, то геологи часто не могли объяснить внезапных изменений обстановки, обусловивших отложение песка. Большая часть этих песков сейчас рассматривается как результат деятельности суспензионных потоков. Эти отложения были образованы, по видимому, в сравнительно глубоких водах и даже, возможно, в абиссальных глубинах.

До тех пор пока для объяснения происхождения слоев глубоководных песков, обнаруженных во многих местах вокруг материковых окраин, не была выдвинута гипотеза суспензионных потоков (впервые установленных экспериментальным путем, как об этом сказано в гл. 1), все песчаники считали мелководными отложениями. Геологам казалось, что накопление песка должно происходить в области активных течений. Кроме того, они полагали, что знаки ряби и косая слоистость этих песков могли образоваться лишь на мелководных. Сейчас совершенно ясно, что суспензионные потоки способны обусловить все эти эффекты даже на абиссальных глубинах.

Интересное событие произошло в геологической науке в результате работы Натленда¹, выполненной им еще в студенческие годы. Натленд решил, что уже наступило время исследовать фораминиферы в глубоких котловинах вдоль калифорнийского побережья. На маленькой шлюпке с очень примитивным самодельным оборудованием он собрал образцы в проливе между побережьем Лонг-Бич и островом Каталина. Изучая фораминиферы, он обнаружил присутствие несомненно глубоководных родов. Интерпретируя позднее под этим углом зрения наземный разрез вблизи Вентуры в Калифорнии, он установил на основании анализа фораминифер, что некоторые слои были отложены в воде на глубине в несколько тысяч футов.

Отчет Натленда вызвал насмешки калифорнийских геологов, так как они уже знали, что предполагаемые глубоководные формации содержат песчаники и даже конгломераты и что песчаники имеют знаки ряби и другие признаки сильных течений. В Скриппсовском институте решили проверить правильность выделения Натлендом фаунистических зон. Мы давали ему для определения наши глубоководные и среднеглубинные пробы и спрашивали о глубине отложения. Его безошибочные ответы поразили нас. Несмотря на очень сильное сопротивление наземных геологов, Натленд отстаивал свою позицию. Однако он никак не мог объяснить присутствие в глубоководных осадках грубозернистого материала. Наконец на помощь пришел Кюнэн с его экспериментами с суспензионными потоками в опытном бассейне. И вот тогда и океанографические институты начали обнаруживать глубоководные пески! Сражение было выиграно, и только немногие ультраконсерваторы еще продолжают придерживаться идеи о мелководном происхождении грубозернистых осадков.

Открытие суспензионных потоков получило широкую огласку. Это привело к тому, что некоторые геологи ухватились за них как за универсальное объяснение всех трудных случаев. Можно было слышать о все новых находках отложений суспензионных потоков в осадочных горных породах. В самом деле, эта гипотеза дает возможность объяснить почти все аномальные случаи. Однако знаний о глубоководных песках все еще недостаточно, чтобы с уверенностью находить их в древних осадочных породах. Обычным критерием здесь служит градационная слоистость — грубозернистые осадки в нижней части слоя постепенно сменяются тонкими в верхней. Такая градационная слоистость обнаружена в отложениях, полученных при экспериментах Кюнэна. Однако она же встречается и в некоторых отложениях речных потоков, а также в море, если

¹ В настоящее время он является главным палеонтологом нефтяной компании «Ричфилд».

шторм взмутит донные осадки и они после этого снова осели на дно. Первыми в этом случае выпадают более крупнозернистые фракции. Кроме того, насколько нам известно, во многих древних морях, вероятно, не было благоприятных условий для развития суспензионных потоков, для чего необходимы относительно длинные склоны. На этих склонах возможны оползни, дающие начало суспензионным потокам, по мере того как они захватывают водную массу. Это значит, что для накопления отложений суспензионных потоков бассейн должен быть достаточно глубоким.

Нормальные осадки глубоких котловин, соответствующие отложению в периоды между суспензионными потоками, должны были бы иметь характерные признаки глубоководного происхождения, включая фауну. Если фораминиферы отсутствуют или осадки слишком древние и не поддаются изучению на основе современных глубинно-зональных группировок фораминифер, то приходится обращаться к другим данным. Например, о мелководном происхождении песков, заключенных между слоями глинистых сланцев, судят по находкам в них мелководной ископаемой фауны¹. Многим из этих ископаемых форм необходим свет для фотосинтеза, а проникновение света ограничено мелководьями. Отсутствие мелководных форм еще ничего не означает, если только оно не подкрепляется также присутствием остатков глубоководных организмов. Для распознавания типа осадков весьма полезны ископаемые остатки рыб, так как рыбы типа сестоноядных² обитают только на больших глубинах. Стекланные губки, криноидеи, головоногие наутилусы и многие голотурии (морские огурцы) — достаточно надежные индикаторы современных глубоководных условий, но они не могут быть использованы для реконструкции условий осадконакопления в периоды более древние, чем третичный. Признаком осадконакопления в условиях значительных глубин является также фауна, состоящая главным образом из морских звезд. Как мы знаем, многие типы моллюсков ограничены в своем распространении мелководьями. Их раковины могут быть с успехом использованы в качестве признака мелководья, если только они не были снесены вниз суспензионными потоками или оползнями и не находятся вследствие этого в песчаных слоях или сразу же над ними.

ГЛИНИСТЫЕ СЛАНЦЫ И ГЛИНЫ

Осадочные породы, состоящие преимущественно из мельчайших зерен (фракция алеврита и глинистого ила), называются

¹ Предположение не совсем верное, так как именно суспензионные потоки могут выносить на большие глубины мелководную фауну. — *Прим. ред.*

² Рыбы, питающиеся микропланктоном. — *Прим. ред.*

глинистыми сланцами, если они сланцеватые, или глинами, если слой редкие и мощность их не менее нескольких дюймов.

Глинистые сланцы составляют, вероятно, более половины всех известных осадочных пород, тогда как песчаники — лишь около 20%. Вместе с тем более половины современных осадков на материковых шельфах представлены песками и только 30% — илами. Однако предполагают, что большая часть известных нам глинистых сланцев образовалась на мелководьях, глубины которых соответствуют глубинам современных шельфов.

Несоответствие между количественным соотношением разных типов осадков в грунте осадочных горных пород и современных отложениях шельфов, вероятно, может быть объяснено отчасти тем, что в современных условиях мало внутренних морей, отчасти тем, что теперь уровень океана ниже, чем был в прошлом. Если бы льды Антарктиды и Гренландии растаяли и вода вернулась в океан, уровень моря повысился бы на 200 футов. Такое повышение уровня океана вызвало бы затопление долин и низменностей и создало бы множество закрытых заливов и морей, где в силу малого воздействия волн и течений условия были бы благоприятными для отложения илстых осадков.

Илстые отложения шельфов

Насколько нам известно, области активного осадконакопления на материковых шельфах покрыты главным образом илами, которые, будучи погребенными, обычно превращаются в горную породу типа глинистых сланцев. На хорошо изученном шельфе Техаса и Луизианы довольно обширные пространства заняты илстыми осадками, накапливающимися с огромной скоростью. Они выносятся преимущественно Миссисипи и другими большими реками, впадающими в океан. На внешней части шельфа толща таких осадков, накопившаяся за прошедшие 10—15 тысяч лет после затопления этой территории, имеет мощность около 15 футов. Осадки плохо слоисты благодаря жизнедеятельности донных организмов. Ближе к берегу тонкие прерывистые прослойки песка переслаиваются с илом. Фораминиферы во внешней части шельфа в основном планктонные. Ближе к берегу они большей частью бентические, или донные. Это различие фораминифер, обитающих во внутренних и внешних частях шельфа, помогает установить место их отложения. Многие третичные глины, обнаруженные в нефтяных скважинах вдоль побережья Мексиканского залива, по-видимому, шельфового происхождения, как это было показано впервые Ш. Лоуменом на основании данных анализа фораминифер.

В больших лагунах или заливах за барьерными островами накапливаются илы, отличные от илов открытого шельфа. В большинстве случаев удается хорошо различать глинистые сланцы этих двух фаций. Это важно знать для поисков нефти. Как установить нефтеносные отложения барьерных островов? Барьер должен находиться со стороны моря, если формация глинистых сланцев была лагунной, и со стороны материка, если сланцы образовались на открытом шельфе.

Фаунистические различия между сланцами, образовавшимися в лагуне или на открытом пространстве шельфа, выражены четко. Переменная соленость в типичных лагунах заставляет животный и растительный мир приспосабливаться к большим колебаниям солености. Температура воды в лагунах также подвержена значительным годовым колебаниям: летом она теплее, зимой — холоднее.

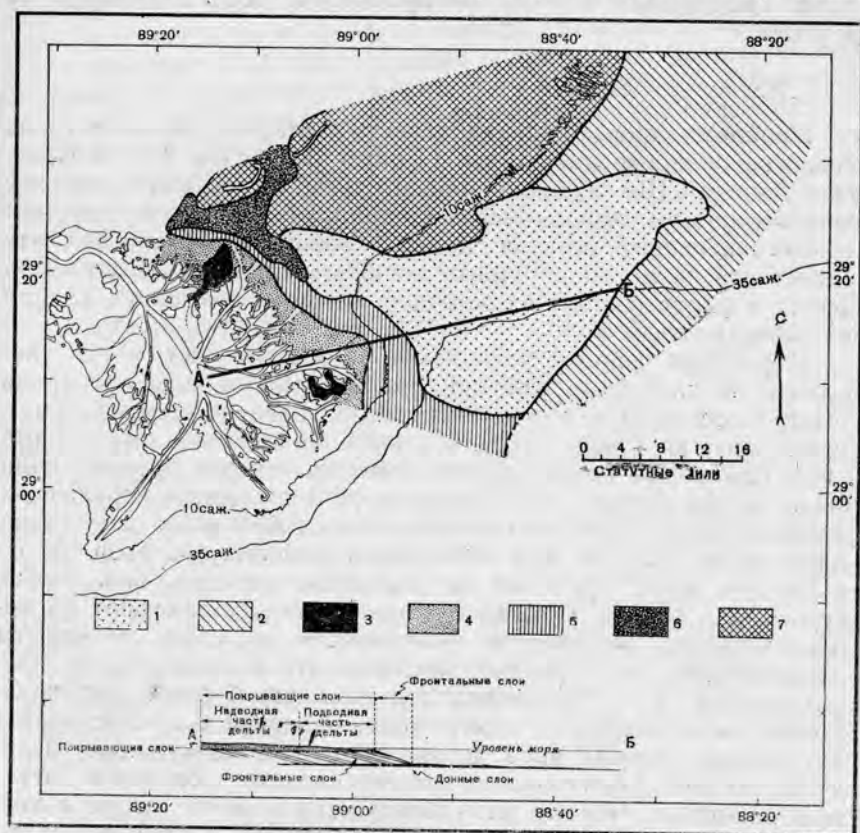
Лишь немногие виды способны перенести подобные изменения. Однако те виды, которые населяют лагуны, чрезвычайно обильны по количеству особей; в открытом же море общее число особей может быть меньше, но зато самих видов значительно больше. Некоторые группы, например эхиноиды, обычные для материкового шельфа, в лагуны вообще не проникают. С другой стороны, устрицы, населяющие лагуны средней или низкой солености, образуют мощные устричные банки и рифы. Там, где банки срезают толщу глинистых сланцев, имеется резкое несогласие. Отложения лагун редко содержат глауконит, тогда как он очень распространен на материковом шельфе, особенно при медленном осадконакоплении. Зато фекальные шарики чаще наблюдаются в илах лагун, чем в илах открытого шельфа.

Слоистость, по-видимому, более характерна для отложений заливов, чем для осадков внешней зоны. Организмы, живущие на дне как в тех, так и в других условиях, одинаково активны. Исключения возможны там, где речные потоки образуют дельты, но это также может быть как в лагунах, так и на шельфе. Другое исключение составляют некоторые мелководные лагуны полусухих районов. Высокая соленость и застойные условия ограничивают здесь развитие сверлящих донных организмов, и благодаря этому слоистость осадков сохраняется лучше. Лагуны засушливых областей благоприятны и для накопления песков, зерна которых покрываются карбонатом кальция. Иногда при этом образуются округлые зерна, называемые оолитами. Оолиты широко распространены в известняках. Кое-где в таких засушливых районах встречается гипс, а если испарение велико и поддерживается ограниченный приток воды со стороны открытого моря, то могут образоваться отложения соли.

Любопытная загадка связана с дельтами. Нет сомнений, что основная масса осадков, выносимых реками в открытый океан и в заливы, откладывается в виде ила, образующего подводные части дельт. Скорость шельфового осадконакопления по мере удаления от устьев рек меняется необыкновенно сильно. Нет оснований предполагать, что в прошлом это было иначе. Однако в литературе по осадочным горным породам имеется лишь несколько упоминаний о древних дельтах. Выделяемые геологами ископаемые дельты сложены главным образом не глинистыми сланцами, а песчаниками (например, песчаники гор Кетскилл). Эти песчаники считают осадками древней дельты, образованной у Аппалачии — массива суши, находившегося ранее на востоке США, теперь исчезнувшего. Так как отложения больших современных рек состоят преимущественно из илов, возникает вопрос: где же илы фронтальных частей дельт среди древних осадков и почему не обнаружены многочисленные древние дельты среди осадочных горных пород? Возможно, что геологи пропустили их при работах, так как ожидали найти крутопадающие слои перед фронтом дельт (фиг. 110). На самом деле дельты Миссисипи и других больших рек выдвигаются вперед с образованием очень пологих склонов, с наклоном поверхности менее 1°. Древние дельты со свойственными им очень слабыми, но все же заметными изменениями угла наклона слоев, покрывающих их верхнюю и фронтальную поверхности, легко могли быть интерпретированы ошибочно, пока не были привлечены и другие критерии.

Одним из признаков, используемых для разделения осадков фронтальных частей дельт от других осадков шельфа и заливов, является четкая слоистость, не нарушаемая обычно в отложениях дельт, потому что пресные воды исключают развитие донных животных, нарушающих слоистость. Кроме того, осадконакопление вокруг большинства дельт происходит такими быстрыми темпами, что, даже если бы организмы здесь и существовали, все равно слоистость, очевидно, не была бы уничтожена ими, прежде чем осадки оказались бы глубоко погребенными. Дельтовые осадки обычно содержат большое количество обломков деревьев, выносимых речными потоками. Слюда в дельтовых отложениях встречается значительно чаще, чем в других шельфовых осадках. Кроме обломков древесины, другие ископаемые остатки здесь очень редки, поскольку число видов животных обычно ограничено (как и в лагунах) из-за переменных условий солености и температуры. Так как устья рек смещаются, а другие отмершие лопасти дельт погружаются вследствие уплотнения слагающих их илов, осадки дельт отражают многочисленные смены морских и наземных условий. Эти

смены могут быть циклическими, что установлено во многих районах в отложениях каменноугольного периода — в осадках пенсильванского периода (верхний карбон) и миссисипия (нижний



Фиг. 110. Распределение типов донных осадков, накапливающихся за восточным фронтом дельты Миссисипи. Разрез внизу рисунка показывает, как эти осадки интерпретируются в геологической концепции покровного, фронтального и донного пластов. Этот разрез отличается от истинного разреза дельты Миссисипи только тем, что наклон пластов в дельте Миссисипи всего лишь $1/2^\circ$. Донный пласт перекрывается в восточной части дельты древними осадками шельфа и в северной — переотложенными осадками древней дельты Миссисипи.

1 — донные слои; 2 — древние шельфовые отложения; покрывающие слои; 3 — внутридельтовый залив; 4 — фронтальная часть подводной дельты; 5 — фронтальные слои; 6 — открытая долина; 7 — переработанная часть дельты Миссисипи.

карбон). Циклические осадки образовывались и в плейстоцене в результате колебаний уровня моря. Возможно, что аналогичные колебания уровня моря происходили и в каменноугольном периоде. Условия, подобные существовавшим в тех болотах, в

которых образовывался каменный уголь, в наши дни установлены вокруг многих дельт, в том числе в нижней части дельты Миссисипи, с ее обширными маршами, в которых накапливается торф. Оказавшись глубоко захороненным, торф превращается в уголь.

Углистые сланцы

Проблема происхождения углистых сланцев вызвала среди геологов большую дискуссию. Сланцы Чаттануга Юга и Среднего Запада США особенно поразительны. Они характеризуются темным цветом, хорошо выраженной слоистостью и содержат немногочисленные остатки донных животных. Очевидно, эту слоистость не могли нарушить донные организмы. Ископаемая фауна и флора состоит из остатков, которые, возможно, падали из поверхностных вод.

Отсутствие донных организмов и черный цвет могут указывать на застойные условия, при которых запасы кислорода быстро истощаются и остатки растений превращаются в гумус, пронизывающий всю массу осадка и придающий ему черный цвет. Некоторые исследователи считали, что эти древние моря были так же глубоки, как Черное море и котловины норвежских фьордов, придонные воды в которых застойны из-за отсутствия циркуляции. Черные илы образуются в некоторых фьордах, но в Черном море, несмотря на застойные условия, илы скорее серые, чем черные. Однако сланцы Чаттануга залегают на непосредственно эрозионной поверхности и сами перекрыты известняками, что позволяет предполагать их мелководное происхождение. У. Г. Твенхофел допускал, что бурный рост водорослей на мелководьях может гасить волнение и способствовать накоплению черных илов, приостанавливая циркуляцию, необходимую для существования многочисленных морских и лагуновых животных. Черные илы обнаружены в лагуне Мадре в южном Техасе, где кислорода под покровом водорослей недостает.

По-видимому, черный цвет сланцев не всегда означает застойность вод, иногда он обусловлен такой концентрацией органического вещества, которая превосходит скорость его разложения на дне и поглощения другими организмами. В таких случаях организмов должно быть огромное количество и слоистость будет сильно нарушена. Это справедливо для некоторых сланцев Рейнской области, а аналогичные современные условия обнаружены в Гданьской бухте и кое-где в Балтийском море.

Илы глубоких котловин

Отложения глубоких котловин и желобов вблизи Калифорнии в основном представлены илами, хотя они и перемежаются

песчаными прослоями, образованными, вероятно, суспензионными потоками. Цвет этих илов в общем темно-зеленый, хотя содержание органического вещества в них довольно высокое. Слабая циркуляция предотвращает образование здесь застойных условий, и илы не очень хорошо слоисты. Аналоги илов глубоководных котловин найдены в третичных толщах южной Калифорнии, в частности в районах Лос-Анжелеса и Вентуры, где тысячи футов осадков накопились в условиях ранее существовавших глубоких котловин. Прежняя первоначальная их глубина определяется по фораминиферам и ископаемым рыбам. Эти древние котловины изучены достаточно хорошо благодаря тому, что их отложения содержат большую часть нефтяных богатств Калифорнии.

ИЗВЕСТНЯКИ И ДОЛОМИТЫ

Осадочные породы, состоящие более чем на 50% из минералов кальцита и доломита, называют известняками, если преобладает кальцит, и доломитами, если преобладает доломит. Если мелкозернистые и мало консолидированные известковые породы легко истираются, их называют мелом. Если же при этом порода содержит значительное количество глинистых частиц, ее называют мергелем. Эти известковые породы распространены почти столь же широко, как и песчаники, но меньше глинистых сланцев. Происхождение их установлено сопоставлением с современными известковыми осадками, большая часть которых встречается в тропических областях. Широкое распространение известняков в областях умеренного и даже холодного климата указывает, по-видимому, на более теплые условия, существовавшие в этих областях в прошлом.

Обломочные известняки

На многих материковых шельфах в тропических и даже субтропических областях осадки сложены главным образом обломками раковин, кораллов или твердых частей других живых организмов. Исследования Г. Гоулда и Р. Стюарта, выполненные ими для Геологической службы США, показали, что такие осадки, состоящие из обломочного материала, широко распространены на шельфе вблизи западной Флориды. Обширная банка вблизи Юкатана, по имеющимся сведениям, покрыта осадками такого же типа. Вокруг многих тропических островов (например, Самоа) и в Яванском море подобные известковые отложения покрывают большую часть дна. Материал этих осадков принесен течениями и волнением, перемещающим обломки скелетов организмов вдоль дна. Отсюда и название — обломоч-

ные известняки. Во всех тропических морях, где отсутствует сколько-нибудь значительное поступление терригенного осадочного материала, известковые осадки образуют основной тип донных отложений. После цементации они становятся известняками.

Тщательные исследования известняков Европы показали, что они в основном обломочные. Известняки Северной Америки изучены недостаточно подробно, но создается впечатление, что они также большей частью обломочного типа. Обломочные известняки можно распознать по наличию рассеянных обломков раковин, встречающихся в пределах толщи в большом количестве. Если известняк превращен в доломит¹, структура раковин оказывается часто разрушенной, так что распознать обломочные доломиты очень трудно.

Рифовые известняки

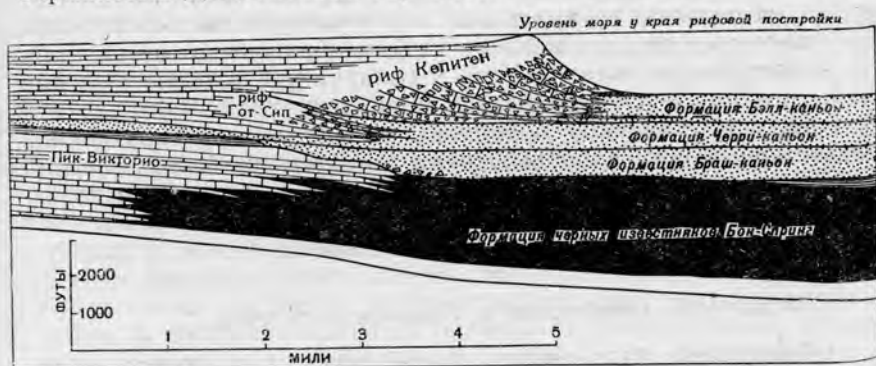
Современные рифы описаны в главе, посвященной коралловым рифам. Подобные рифы были обнаружены в отложениях морей прошлого, и многие из них сохранились в виде осадочных горных пород. Эти древние рифы, так же как и песчаные линзы, являются аккумуляторами нефти. Кавернозная структура коралловых рифов делает их особенно хорошими коллекторами нефти, мигрирующей в них из окружающих толщ.

Древние рифы не всегда легко распознать отчасти из-за того, что многие из них превращены в доломит и в процессе доломитизации структура кораллов и других рифообразующих организмов была уничтожена. Рифы зачастую распознаются по обломкам кораллов, обламывающимся у края рифа и накапливающимся на склоне вблизи него. Часто среди обломков встречаются кораллы, сохранившиеся лучше, чем сам риф. Интересный пример древнего рифа был найден в породах западного Техаса (фиг. III). Описание этого участка, составленное Кингом (Геологическая служба США), рисует картину большого рифа (часть которого образует сейчас высочайшую вершину Техаса — Эль-Кепитен), окаймленного широким аккумулятивным шлейфом из обломков кораллов, сцементированных в твердую породу. К востоку от рифа находится глубокая котловина, частично заполненная смытым с рифа коралловым песком. К западу от рифа была мелководная лагуна, окаймленная сушей, характеризовавшейся засушливыми условиями. Вследствие интенсивного испарения в лагуне образовывались гипсоносные отложения. Исключение представляли участки, расположенные

¹ Насколько известно, доломиты никогда не образовывались в виде осадка, но были первоначально известняками, превратившимися затем в доломиты.

вблизи рифа, где был приток свежей воды в лагуну. Риф, очевидно, состоял главным образом из известняковых водорослей и губок.

Другой пример древнего рифа мы знаем в Альпах: массив обрывистых Доломитовых гор в Италии и Австрии с их множе-



Фиг. 111. Схематический разрез Кепитен в западном Техасе. Этот древний риф имеет склон, подобный современным рифам.

ством пиков сложен в основном бесструктурными доломитовыми породами, образовавшимися первоначально также в виде коралловых рифов. Отдельные кораллы еще сохранились.

Писчий мел и мелкозернистые известняки

Писчий мел — мягкая известковая порода, используемая многими поколениями людей для писания на доске¹. Микроскопическое исследование показало, что мел содержит большое количество планктонных фораминифер, преобладают среди них глобигерины. Долгое время мел считали глубоководным осадком, сопоставимым с глобигериновым илом, образцы которого были собраны в прошлом столетии экспедицией на «Челленджер». Однако более тщательное изучение меловых толщ, например в скалах у Дувра, показало, что одновременно с фораминиферами в этих породах существуют многие другие организмы, характерные для мелководий. Глубоководное происхождение мела было поэтому отвергнуто. Брамлетт и другие исследователи показали, что отложения писчего мела в южных штатах США содержат большое количество одноклеточных морских водорослей, выделяющих карбонат кальция и известных под названием кокколитофорид. Брамлетт считает, что писчий мел и в других местах, например в Англии, также перво-

¹ Используемый сейчас искусственный мел состоит в основном из гипса.

начально состоял из скоплений кокколитофорид, но в результате давления вышележащих пород кокколитофориды большей частью разрушились, превратившись в маленькие частицы кальцита.

Некоторые толщи писчего мела, будучи глубоко захороненными, возможно, превратились в мелкозернистые известняки. В Тунисе слои писчего мела могут быть прослежены из области, не подвергшейся складчатости, в складчатую область, мел при этом превращается в мелкозернистый известняк. Частично эти пласты представляют, возможно, скопленные кокколитофорид. Известковый ил, подобный илам Багамской банки, весьма вероятно, произошел вследствие химического осаждения из пересыщенной карбонатом кальция воды. Этот ил также мог превратиться в мелкозернистые известняки.

Оолитовые известняки и Багамские острова

Обнаружено, что многие древние известняки содержат небольшие округлые зерна, напоминающие по виду рыбью икру. Отсюда и название — оолиты, образованное от греческого корня *оо*, сокращенного слова *онион*, что значит *яйцо*. В поперечном сечении этих круглых зерен видны концентрические кольца. Юрские породы были первоначально названы оолитовой серией из-за высокого содержания в них оолитовых известняков. Название это, предложенное Смитом примерно в 1800 г., применяется теперь лишь для отдельных свит.

Современные оолиты образуются в мелководных теплых морях с высокой или относительно высокой соленостью. Оолиты были изучены, в частности, на Багамах, где они образуют эффектные подводные дюны, по-местному борес. Они хорошо видны с воздуха при полете над мелководными банками. Форма этих дюн зависит от волнения и течений, и они служат прекрасным индикатором преобладающих течений в различных частях этой области. Превращаясь затем в горные породы, эти илы образуют косослонистые оолитовые известняки.

Исследования английского геолога Л. В. Иллинга и сотрудника Американского музея естественной истории и Колумбийского университета Н. Ньюелла были особенно плодотворными в объяснении происхождения багамских оолитов. Оолиты, по-видимому, образуются при осаждении химического осадка из холодных глубинных вод, нагревающихся при поднятии над банками и оказывающихся при этом пересыщенными кальцием. Подобные отложения чаще всего встречаются у края отмелей и по краям ложбин, промываемых приливными течениями. Крупинки различного состава облекаются слоями карбоната кальция, представляющего минерал арагонит. Крупинки округлы вследствие равномерного осаждения карбоната кальция, а так-

же благодаря истиранию при перекачивании их на мелководье. В районах распространения подводных дюн из оолита донные животные, за исключением эхиноидей, немногочисленны. Возможно, что это объясняется отчасти неустойчивым состоянием дна. Поднятые над уровнем моря плейстоценовые известняки обычно также оолитовые; их можно видеть повсюду вдоль горных хребтов острова Эльютера — самого живописного из Багамских островов.

Оолиты обнаружены в широком поясе внешнего шельфа вблизи западной Флориды. Полагают, что это древние отложения ледникового периода во время низкого стояния уровня океана. Они образуются и сейчас в обладающей высокой соленостью лагуне Мадре вдоль южного побережья Техаса, но только в непосредственной близости к берегу, в полосе разрушения небольших волн лагуны. Эти отложения лагун представляют собой покрытые карбонатом кальция зерна кварцевого песка, в противоположность оолитам Багамской банки, состоящим из фекальных шариков или карбоната кальция. Оолиты не всегда морского происхождения. Они встречаются также в различных соленых озерах, в частности в Большом Соленом озере, где были изучены Ардли из университета штата Юта.

ЗАГАДОЧНЫЕ КОНГЛОМЕРАТЫ

Конгломераты — это породы, состоящие из множества гальки и валунов, сцементированных тонкозернистым материалом. Большинство конгломератов отложено потоками на суше. Однако возможны случаи, когда река выносит гальку в море. Галька от разрушаемых волнами берегов разносится потоками вдоль берегов. Обычно полоски таких морских конгломератов приурочены к узкой прибрежной зоне, и они легко распознаются по линейным очертаниям.

Конгломераты, в которых галька рассеяна в цементе морского происхождения, озадачили многих геологов и вызвали появление самых различных гипотез. Цемент таких конгломератов обычно не обнаруживает генетической связи с галькой и состоит из очень тонкого ила или даже известковых осадков.

Изучение современных осадков помогло понять происхождение таких конгломератов. При изучении колонок, взятых Ч. Пиго в 1936 г. в Атлантическом океане, М. Брамлетт и У. Бредли из Геологической службы США были поражены слоями с высоким содержанием гальки, перемежавшимися с обычными глубоководными отложениями. Они заключили, что эти галечные слои состоят из материала, который переносили многочисленные айсберги, отделявшиеся от огромных материковых ледников и дрейфовавшие по Северной Атлантике в ледниковую

эпоху. Подобные прослой гальки обнаружены в отложениях морей, окружающих Антарктиду и изобилующих айсбергами и в наши дни. Пожалуй, более загадочны рассеянные гальки в таких районах, как заливы Мэн и Св. Лаврентия. Распространение этих галечников не ограничивается слоями в толще донных осадков. Их находили и в пробах, взятых прямо с поверхности дна. Они могут представлять собой отложения айсбергов, не покрытые еще более поздними осадками со времени отступления ледников, происшедшего примерно 10 тысяч лет назад. Происхождение гальки в донных осадках вблизи берегов северной Аляски связывают с переносом ее льдинами, отрывающимися летом от берегового припая. Этот лед, окаймляющий берега суши, захватывает гальку с берега. Лед дрейфует в море от берегов, и по мере его таяния галька падает на дно. Образовавшиеся таким образом конгломераты встречаются в породах древнее плейстоценовых, по-видимому, не очень часто. Это объясняется, вероятно, тем, что климаты более древних эпох редко бывали достаточно холодными, чтобы могли образоваться ледники или береговой ледовый припай. Однако примерно 200 млн. лет назад, в пермском периоде, существовали большие ледники, они были также и в предшествовавшем каменноугольном периоде. Для более ранних периодов, включая докембрий, то есть более 500 млн. лет назад, признаки существования оледенений менее надежны, но некоторые конгломераты этих эпох также могут быть проще всего объяснены ледовым переносом во время холодных периодов.

Таким образом, не всегда можно сказать, каковы были условия отложения той или иной осадочной породы. Это особенно трудно, когда породы впоследствии подверглись значительному нагреву и давлению, в результате чего потеряли признаки тех условий, в которых происходило их отложение. По мере ознакомления с современными осадками перед нами все яснее будут открываться пути к пониманию происхождения древних осадочных пород.

ЛИТЕРАТУРА

- Bigelow H. B., Edmondson W. T., 1947. Wind Waves at Sea, Breakers and Surf. U. S. Navy Hydrographic Office Pub. No. 602. Washington D. C., U. S. Govt. Printing Office, 177.
- Carson, Rachel L., 1951. The Sea Around Us. New York, Oxford Univ. Press, 230.
- Kuenen P. H., 1950. Marine Geology, New York, John Wiley & Sons, Inc., 568.
- Marmier H. A., 1930. The Sea. New York, D. Appleton and Co., 312.
- Pettersson Hans, 1954. The Ocean Floor. New Haven, Yale Univ. Press, 181.
- Romanovsky V., Bourcart Jacques, Francis-Boeuf C., 1953. La Mer. Paris, Librairie Larousse, 503.
- Russell R. C. H., Macmillan D. H., 1953. Waves and Tides. New York, Philosophical Library, 348.
- Shepard F. P., 1948. Submarine Geology. New York, Harper & Brothers, 348.
- Sverdrup H. U., Fleming Richard, Johnson M. W., 1942. The Oceans. New York, Prentice Hall, Inc., 1087.
- Trask P. D. (editor), 1955. Recent Marine Sediments. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, 1939, reprinted, 736.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редакции	5
Предисловие к американскому изданию	7
Введение	9
Глава I. Как волны и течения преобразуют дно океана	19
Глава II. Катастрофические морские волны	42
Глава III. Блуждающие острова	54
Глава IV. Шельфы — подводная окраина суши	74
Глава V. Происхождение материковых шельфов	98
Глава VI. Величайшие склоны Земли	112
Глава VII. Подводные каньоны	132
Глава VIII. Глубоководное дно океана	158
Глава IX. Под дном океана	191
Глава X. Чудесный мир коралловых рифов	207
Глава XI. Современные донные осадки и интерпретация геологического прошлого	229
Литература	251

Ф. ШЕПАРД
ЗЕМЛЯ ПОД МОРЕМ

Редактор *В. И. Попова*
Художник *И. Ф. Федорова*
Художественный редактор *Е. И. Подмарькова*
Технический редактор *Т. Л. Сухорукова*
Корректор *Е. Г. Литвак*

Сдано в производство 10/III — 1964 г.
Подписано к печати 19/VI — 1964 г.
Бумага 60×90^{1/16}—8,4 бум. л.
16,9 печ. л., в т/ч вкл. 7
Уч.-изд. л. 15,8. Изд. № 5/1474
Цена 1 р. 28 к. Зак. 196
(Темплан 1964 г. Изд-ва ИЛ пор. № 136)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская типография № 20
Главполиграфпрома Государственного комитета
Совета Министров СССР по печати
Москва, 1-й Рижский пер., 2

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

выпускает в 1964 г. следующие книги

ПО ГЕОЛОГИИ

Вопросы геологии и минералогии бокситов. Перевод с английского, 25 изд. л., цена в переплете 1 р. 95 к.

Бокситы — важнейший источник алюминиевого сырья, и обобщение мирового опыта их поисков и исследований имеет большое народнохозяйственное значение. В сборник вошли статьи из американских журналов, в которых освещаются вопросы минералогии бокситов, изучается их генезис и — что особенно существенно — публикуются данные экспериментальных исследований, основанных на новых методах и на новой технике. Материалы сборника имеют большое прикладное значение и насущно необходимы всем геологам, изучающим месторождения бокситов. В сборник вошли статьи, опубликованные в 1959—1963 гг.

Книга рассчитана на геологов, работающих в области разведки и поисков минерального сырья, петрографов и минералогов, а также на студентов и преподавателей геологических вузов.

Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов. Под ред. Г. Брауна, Лондон, 1961 г., перевод с английского, 30 изд. л., цена в переплете 2 р. 30 к.

Методика рентгеновского исследования, позволяющая проводить эффективное изучение минералогического состава глинистых минералов, весьма быстро совершенствуется и все шире и шире применяется на практике. Настоящая книга, подготовленная выдающимся английским минералогом Г. Брауном, дает отчетливое представление о новейших методах рентгеноструктурного анализа. В книге обобщен опыт английских, американских, канадских и французских минералогов.

Книга рассчитана на минералогов, физиков, изучающих структуру минералов, петрографов, работников лабораторий, студентов и преподавателей геологических вузов и техникумов.

Проблемы инженерной геологии. Перевод с английского и французского, 22 изд. л., цена в переплете 1 р. 74 к.

В настоящую книгу, посвященную вопросам инженерной геологии, входят статьи из американских и французских журналов по физико-химиче-

ским свойствам грунтов, оползням и исследованиям геологических условий оснований под гидротехнические сооружения, опубликованные в 1959—1962 гг.

Материалы сборника, отражающие зарубежный опыт в области инженерных изысканий при строительстве зданий, промышленных предприятий и плотин, имеют большое практическое значение.

Книга рассчитана на инженеров-геологов, инженеров-строителей, гидрогеологов и гидротехников, а также специалистов по механике грунтов.

Хокс Х. К., Узбб Дж. С. Геохимические методы поисков минеральных месторождений. Нью-Йорк, 1962 г., перевод с английского, 25 изд. л., цена в переплете 1 р. 95 к.

Книга представляет собой новейшее учебное руководство и практический справочник, в котором систематизированы основные материалы прикладной геохимии, относящиеся к принципам и методам геохимических поисков. В работе дается характеристика первичных и вторичных ореолов рассеяния рудообразующих элементов, методы их полевого и лабораторного изучения, выявления геохимических и ботанических аномалий и использования их для поисков глубоко залегающих минеральных месторождений. Очень ценны списки растений-индикаторов разнообразных горных пород и месторождений различных металлов.

Книга рассчитана на широкие круги геологов, физико-географов, археологов, ботаников и геоботаников, преподавателей и студентов геологических вузов и биологических факультетов университетов, это ценнейшее учебное и справочное руководство.

Вниманию покупателей!

Цель настоящей информации состоит в том, чтобы заблаговременно оповестить покупателей о книгах издательства «Мир», выходящих из печати.

Напишите на открытке название нужной вам книги и свой адрес и передайте ее в местный магазин. О поступлении книги вас известят. Открытка одновременно будет служить предварительным заказом на книгу.