

## ГЛУБОКОВОДНОЕ БУРЕНИЕ В ОКЕАНАХ

И. А. БАСОВ

*Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, Москва*

### DEEP-WATER DRILLING IN OCEANS

I. A. BASOV

*Thousands of deep-water holes have been drilled in the World Ocean during realization of the International Deep-Sea Drilling Project and Ocean Drilling Program. Obtained information allowed geologists to consider the Earth as an integral system of interacting lithosphere, hydrosphere, atmosphere, and biosphere.*

*Тысячи глубоководных скважин пробурены в Мировом океане за время осуществления проекта глубоководного бурения и программы океанского бурения, объединивших ученых многих стран. Полученная информация позволила геологам рассматривать Землю как единую систему взаимодействия литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы.*

### ПРЕДЫСТОРИЯ

Как известно, две трети земной поверхности покрыты океанами и морями и почти недоступны для непосредственного геологического изучения. В это трудно поверить, но еще несколько десятилетий назад геологи практически ничего не знали о строении дна океанов и покрывающих его осадках. Как все неизвестное, океанское дно всегда притягивало к себе внимание исследователей, которые стремились найти способы получения образцов пород и осадков, чтобы попытаться ответить на мучивший их вопрос: что же скрывается в океанской бездне?

Еще в 60-е годы XX века геофизическими исследованиями было установлено, что земная кора под океанами по своему строению принципиально отличается от континентальной коры. Эти отличия, выявленные по изменениям скорости прохождения упругих волн, заключаются главным образом в гораздо меньшей ее общей толщине (в среднем 5–7 против 35–40 км) и отсутствии так называемого гранитного слоя, который характеризуется скоростями около 6 км/с (что соответствует плотности пород 2,7 г/см<sup>3</sup>). Относительно тонкий разрез осадков и подстилающих базальтовых лав перекрывает более плотные породы, которые по своим характеристикам близки к тем, которые подстилают континентальную кору, хотя здесь они значительно тоньше. Относительно тонкая океанская кора и значительно более толстая континентальная кора подстилаются еще более плотными породами верхней мантии.

В те же годы была сформулирована гипотеза тектоники литосферных плит, возродившая на новом уровне знаний почти забытую к тому времени идею Альфреда Вегенера, который еще в начале XX века предположил на основе сравнения конфигурации современных континентов и состава ископаемых органических остатков, что все континенты некогда составляли единый материк, распавшийся затем на “разбежавшиеся” в разные стороны блоки. В рамках этой гипотезы, суммировавшей имевшиеся к тому времени геолого-геофизические материалы по рельефу дна и его строению, был предложен механизм развития океанских бассейнов.

Согласно концепции тектоники плит, океанское дно последовательно расширяется за счет постоянного формирования новой коры в центральных частях океанов в пределах так называемых срединно-океанских хребтов, образующих практически непрерывную планетарную систему. Соответственно возраст коры в океанах должен становиться древнее по направлению к окраинам бассейнов. Исходя из этого, американские геофизики Вайн и Мэтьюз в 1963 году предположили, что установленные ими на дне океана чередующиеся полосы с прямой и обратной намагниченностью пород (базальтов), протягивающиеся параллельно срединно-океанским хребтам, соответствуют периодам формирования очередных порций океанской коры и что их возраст последовательно удревняется при движении к континентам<sup>1</sup>.

Таким образом, к началу глубоководного бурения в океанах геологи имели в своем распоряжении изящную гипотезу, которая была достаточно хорошо увязана с геофизическими материалами, но требовала проверки непосредственными геологическими данными.

На начальном этапе геологических исследований в океане опробование дна вели с помощью дночерпателей, драг и донных тралов. Дночерпатель — это относительно несложное устройство, напоминающее грейфер, которое опускается на стальном тросе на дно в открытом состоянии и затем при подъеме закрывается, сохраняя внутри себя ненарушенный слой поверхностных осадков мощностью первые десятки сантиметров. Драга представляет собой кусок металлической трубы большого диаметра с зубчатым передним и снабженным прочным сетчатым мешком задним краем, который, как и донный трал, тащится на длинном тросе за кораблем, свободно дрейфующим с выключенными двигателями под действием поверхностного течения и ветра, и сдирает поверхностный слой осадков или коренные породы вместе с обитающими на них донными организмами. С помощью этих простых приспособлений, которые до сих пор используются в океанографических исследованиях, были получены тысячи проб донных осадков практически со всех глубин, от нескольких десятков метров в прибрежной зоне до максимальных в глубоководных желобах.

Уже первые пробы показали, что осадки, покрывающие дно океана, не являются чем-то однородным, как это считалось ранее, а исключительно разнообразны по составу. Благодаря опробованию поверхностных осадков, которое проводили в многочисленных геоло-

гических экспедициях, удалось изучить их пространственное распределение. Одновременно оно позволило выявить новый тип полезных ископаемых — так называемые железо-марганцевые конкреции, которые покрывают дно Мирового океана и запасы которых значительно превышают разведанные запасы подобных руд на суше. Учитывая, что конкреции содержат кроме Fe и Mn и другие, в том числе редкие, металлы, они представляют собой важный резерв полезных ископаемых для будущих поколений.

Следующим шагом в исследовании океанского дна и его осадочного чехла стало применение в океанографических исследованиях прямоточных грунтовых трубок, которые позволяли в отличие от дночерпателей получать образцы не только поверхностных, как правило, современных, но и более древних осадков. Грунтовая трубка представляет собой обычную стальную трубу, снабженную крышкой на верхнем конце и устройством для удержания осадка (так называемый ерш) на нижнем конце и утяжеленную цилиндрическими чугунными грузами. Трубка на стальном тросе с помощью лебедки с большой скоростью опускается на дно и за счет своего веса проникает в осадки. Со времени первой трубки, сконструированной Б. Кулленбергом в 1927 году, разработаны различные ее модификации, но принцип отбора осадков сохранился прежним: проникновение в осадки за счет силы тяжести. С помощью грунтовых трубок можно получить колонку осадков длиной несколько метров. В последние годы, однако, благодаря усовершенствованной технологии удается достичь значительно большего проникновения в осадки. Так, например, французским ученым удалось получить в Индийском океане с помощью грунтовой трубки колонку осадков длиной более 50 м.

Опробование океанского дна с помощью грунтовых трубок позволило геологам заглянуть несколько глубже в историю развития океана. Тем не менее полученная таким образом информация касалась осадков, возраст которых ограничивался, как правило, первыми десятками и сотнями тысяч лет, и, разумеется, не могла полностью удовлетворить геологов. Стало очевидным, что необходима новая технология изучения дна океана. И такая технология появилась в конце 60-х годов XX века, то есть почти через столетие после знаменитой английской океанографической экспедиции на парусном судне “Челленджер” в 1872–1876 годах, когда впервые были проведены масштабные работы по изучению дна океана с помощью тралов.

## ЭРА ГЛУБОКОВОДНОГО БУРЕНИЯ

В 1968 году буровое судно “Гломар Челленджер”, построенное в США и специально оборудованное для бурения на больших глубинах, начало бурение своей первой

<sup>1</sup> Основные положения тектоники плит и ее движущие механизмы подробно рассмотрены в статьях В.Е. Хаина и М.Г. Ломизе, опубликованных соответственно в № 11 (1998) и № 9 (1999) “Соросовского Образовательного Журнала”.

скважины в Мексиканском заливе, открыв таким образом новую эру в изучения геологии дна океанов, которая продолжается до настоящего времени. Для осуществления этих исследований был создан консорциум, получивший название “Объединение океанографических институтов по глубинному опробованию Земли” (“Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling” – JOIDES), который вначале объединял несколько океанографических институтов США, а в настоящее время включает также многочисленные научные организации из двух десятков стран. Советский Союз был участником этого объединения в общей сложности около десяти лет, но по разным причинам дважды прекращал свое участие. Вначале работы велись в рамках Международного проекта глубоководного бурения (Deep Sea Drilling Project), а с 1985 года и до настоящего времени реализуются в рамках новой программы океанского бурения (Ocean Drilling Program). Она осуществляется с помощью более совершенного бурового судна “ДЖОИДЕС Резолюшн” (“JOIDES Resolution”), названного в честь парусника, на котором Джеймс Кук совершал кругосветные путешествия.

Судно “ДЖОИДЕС Резолюшн” было спущено на воду в Галифаксе (Новая Скотия) в 1978 году как буровое нефтеразведочное судно SEDCO/VP 471 длиной 143 м, шириной 21 м и водоизмещением 18 600 т, а в 1984 году переоборудовано в плавучий научно-исследовательский центр для ведения в научных целях буровых работ в океанах (рис. 1). Судно оснащено совре-



Рис. 1. Буровое судно “ДЖОИДЕС Резолюшн”

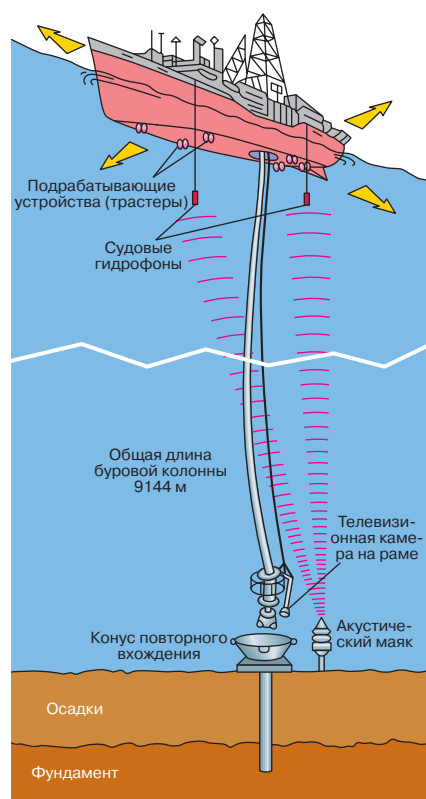
менным буровым, навигационным и лабораторным оборудованием, позволяющим вести бурение на глубинах до 8235 м в любом районе Мирового океана и непосредственно на борту проводить обработку и первичное изучение керна (проб рыхлых осадков и твердых горных пород), а также производить измерение почти всех необходимых химических и физических характеристик вещества, поднятого со дна океана.

Для удержания судна в стабильном положении над точкой бурения оно оборудовано системой динамического позиционирования, включающей в дополнение к главному двигателю подрабатывающие устройства (трастеры). Акустический маяк, установленный на дне вблизи устья скважины, сообщает бортовому компьютеру о любом смещении судна относительно заданной точки. Компьютер передает команду на главный двигатель и трастеры, и они, включаясь, возвращают судно на исходную позицию.

Технология бурения скважины в целом аналогична той, которая применяется при наземном бурении. Буровая колонна собирается из секций труб длиной 28,5 м, каждая из которых состоит из трех секций длиной по 9,5 м. Процесс сборки занимает 12 ч при глубине 5500 м. Внутри колонны на тросе свободно перемещается керноотборник с пластиковым вкладышем. После очередного проникновения бурового снаряда на глубину 9,5 м, соответствующую длине керноотборника, последний с помощью троса поднимается на борт судна. Здесь из него извлекается пластиковый вкладыш с керном, и после этого он снова возвращается в скважину за очередной порцией керна. На получение одной порции керна мягких осадков при глубине 5500 м уходит 1 ч 40 мин.

В зависимости от типа осадков (или пород) технология бурения и оборудование меняются. В мягких осадках, которые при вращении бурового снаряда могут быть частично или полностью разрушены, используется гидравлический керноотборник, проникающий через долото в осадки под давлением нагнетаемой сверху воды. Это позволяет получать непрерывный и ненарушенный разрез слабоуплотненных осадков. В твердых породах фундамента бурение производится вращательным способом. Для бурения переслаивающихся мягких осадков и твердых пород разработаны буровые снаряды, которые позволяют менять способ бурения и отбора проб в процессе прохождения скважины без подъема наверх инструмента и демонтажа буровой колонны и таким образом существенно сократить потери времени и стоимость работ.

При длительном бурении твердых пород или очень глубоких скважин, когда необходима замена бурового инструмента, применяется уникальная система повторного (многократного) вхождения в скважину (рис. 2). Эта система позволяет с помощью бортовых



**Рис. 2.** Система повторного вхождения в скважину

компьютеров и акустического излучателя на конце бурового снаряда обнаруживать специальную воронку, которая расположена над устьем скважины и устанавливается на дне до начала бурения, и опускать через нее снаряд в уже пробуренную скважину требуемое число раз. Телевизионная камера, установленная на конце снаряда, обеспечивает дополнительный контроль над операцией. Именно благодаря этой системе в восточной экваториальной части Тихого океана в нескольких рейсах была пробурена самая глубокая в океане скважина (в настоящее время глубина забоя 2105 м ниже дна). При этом она прошла около 1900 м по вулканическим породам (базальтам) и достигла их подводящих каналов.

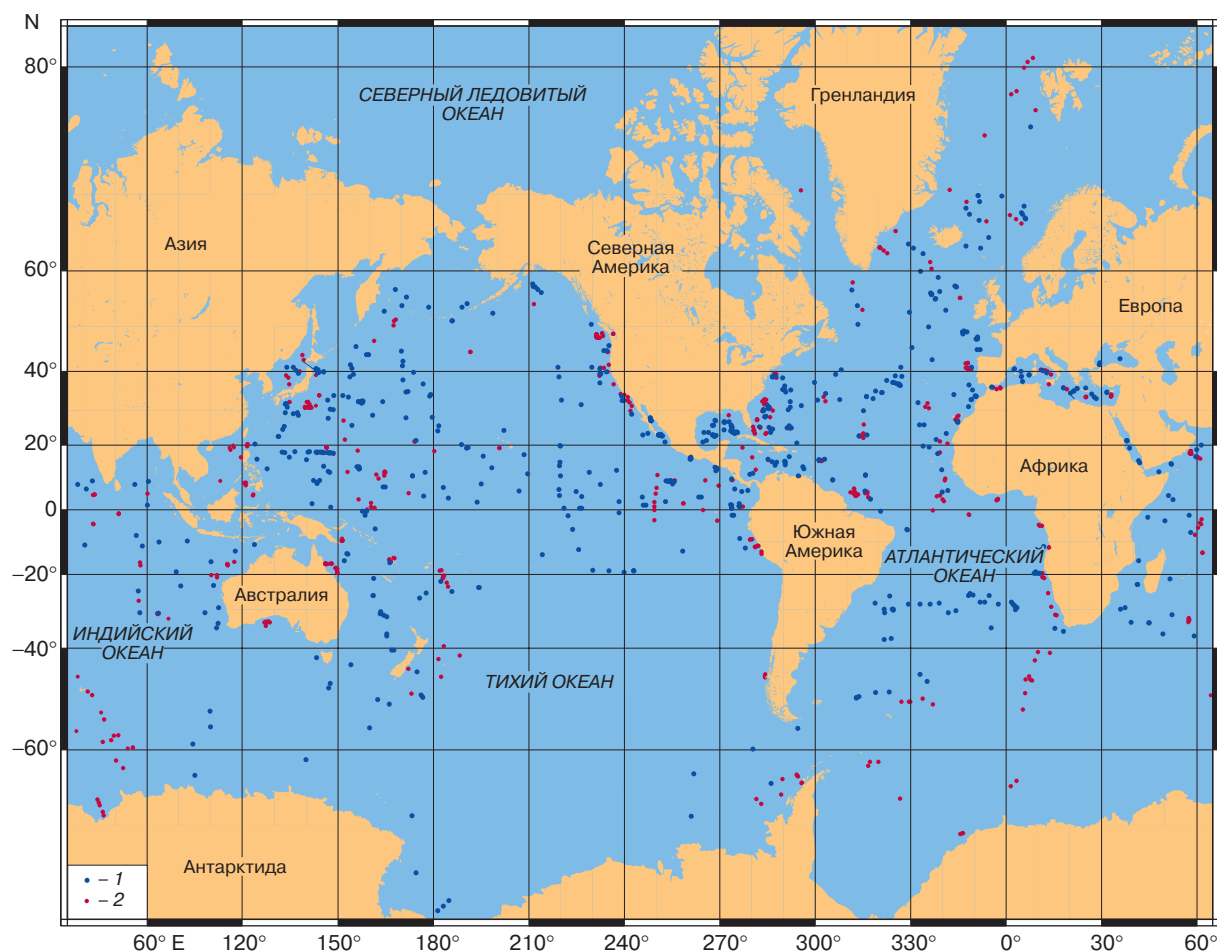
За прошедшие тридцать с лишним лет в Мировом океане, а также во многих краевых и внутренних морях пробурены скважины, расположенные более чем в тысяче точек в районах приблизительно от 80° с.ш. до 70° ю.ш. (рис. 3). В результате получены многие километры керн — проб осадочных и магматических пород, всестороннее изучение которых позволило выяснить геологическое строение дна океана и проследить историю его развития.

В течение первой фазы бурения, которая была нацелена в первую очередь на проверку правильности основных постулатов тектоники плит, главной задачей было достижение твердого фундамента как можно в большем числе районов. Опробование осадков в скважинах при этом проводили с большими перерывами, что, естественно, во многих случаях приводило к существенной потере информации, касающейся состава, строения и истории формирования осадочного чехла.

Тем не менее такая тактика проведения буровых работ полностью себя оправдала. В течение нескольких лет в разных районах Мирового океана были пробурены сотни скважин, которые вошли в магматические породы фундамента. Изучение осадочных и магматических пород показало, что возраст океанской коры действительно становится древнее по мере удаления от срединно-океанских хребтов в сторону окраинных частей океана, что подтвердило плит-тектоническую модель развития дна океанов и Земли в целом. Это было продемонстрировано прежде всего с помощью изучения ископаемых микроорганизмов, что позволило в большинстве случаев с большой степенью надежности определить возраст самых нижних слоев осадочного чехла. Было установлено, что наиболее древние осадки (среднеюрские, более 150 млн лет), залегающие на базальтах фундамента и вскрытые в Атлантическом и Тихом океанах, развиты в их окраинных районах. По направлению к срединным хребтам они становятся моложе и в их осевой части океанских бассейнов имеют современный возраст. Кроме того, было показано, что в глубоководных котловинах окраинных частей океанов нижние слои осадочного чехла являются относительно мелководными по сравнению со слоями, залегающими вверх по разрезу. Это означает, что океанская кора, которая формировалась в срединно-океанских хребтах, по мере удаления от них остывала и постепенно погружалась. Все это свидетельствует в пользу справедливости основных положений тектоники плит.

Океанские базальты, вскрытые скважинами, так же как и осадки, оказались в значительной мере разнообразными по химическому составу. Стало очевидным, что формирование дна океана происходило по более сложному сценарию, чем это предполагалось ранее, глядя на океан с суши. В частности, были установлены систематические вариации изотопного состава Rb, Sr, Nd и некоторых других химических элементов, которые свидетельствуют о неоднородности источников базальтовых магм, расположенных в верхней мантии.

Эти сведения несомненно представляют значительный интерес, но все же наиболее значительными достижениями глубоководного бурения отмечено изучение осадочного чехла океана. Одним из них явилась разработка детальных стратиграфических шкал — точно



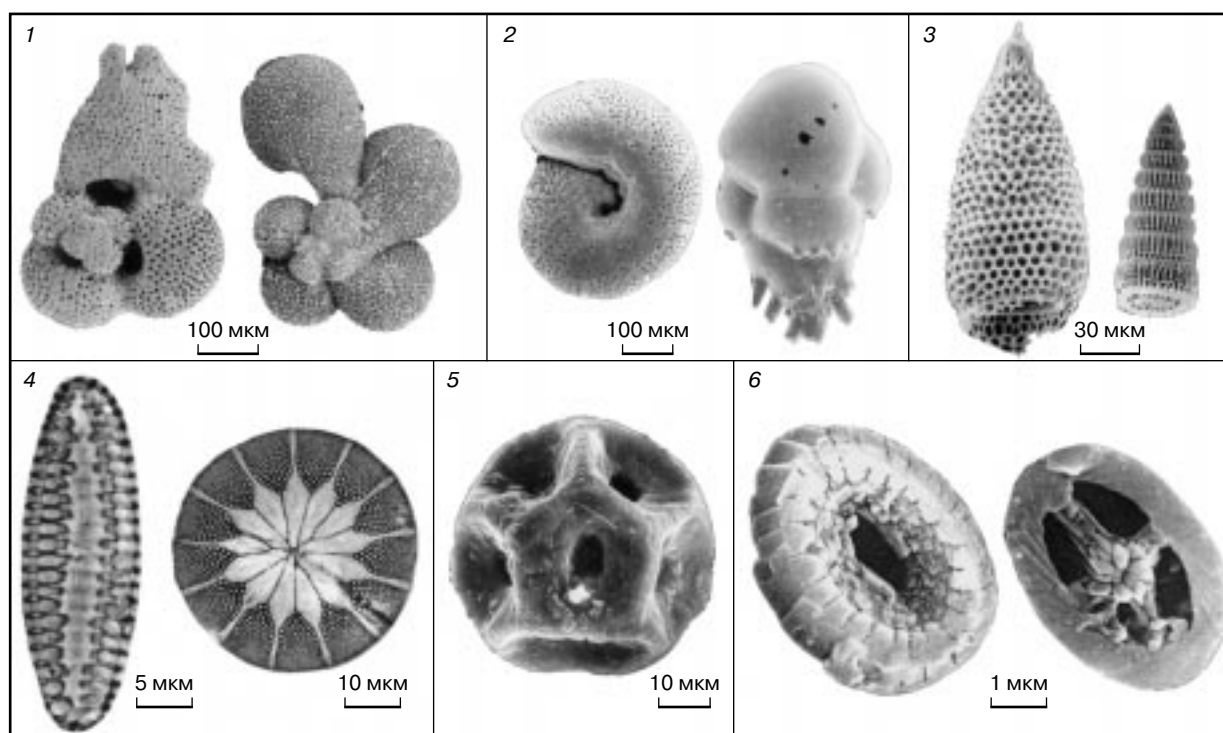
**Рис. 3.** Карта точек бурения в океанах: 1 – скважины, пробуренные с судна “Гломар Челленджер” в 1968–1985 годах; 2 – скважины, пробуренные с судна “ДЖОИДЕС Резолюшн” начиная с 1985 года

датированных последовательностей осадков в разрезе, которые позволяют восстановить ход геологических событий и коррелировать их между собой на больших расстояниях, то есть помогают составить своего рода календарь событий прошедших эпох. От степени детальности и надежности стратиграфических шкал напрямую зависит адекватность интерпретации прошлых геологических процессов и событий, следы которых записаны в осадочных разрезах. Наибольшую детальность расчленения разрезов обеспечивают биостратиграфические шкалы, которые строятся на основании изменений в составе и структуре ассоциаций различных ископаемых организмов.

В настоящее время разработаны детальные, так называемые зональные шкалы по многим группам микроорганизмов с известковым, кремневым и органическим скелетом: планктонные и бентосные фораминиферы,

радиолярии, диатомеи, силикофлагелляты, динофлагелляты, споры и пыльца (рис. 4). Эти шкалы датированы различными методами, достаточно надежно сопоставлены между собой и позволяют расчленять осадочный чехол на отрезки, отвечающие в некоторых случаях временным интервалам продолжительностью в несколько сот тысяч лет, что по геологическим меркам соответствует весьма высокой точности.

Применение стратиграфических шкал выявило исключительно сложное строение осадочных разрезов океана. Оказалось, что непрерывные разрезы осадков в океане представляют собой скорее исключение, а не правило, как это представлялось до начала глубоководного бурения. В большинстве случаев осадочные разрезы Мирового океана содержат перерывы в накоплении осадков, порой многочисленные и часто внешне незаметные в составе осадков. Особенно часты перерывы в



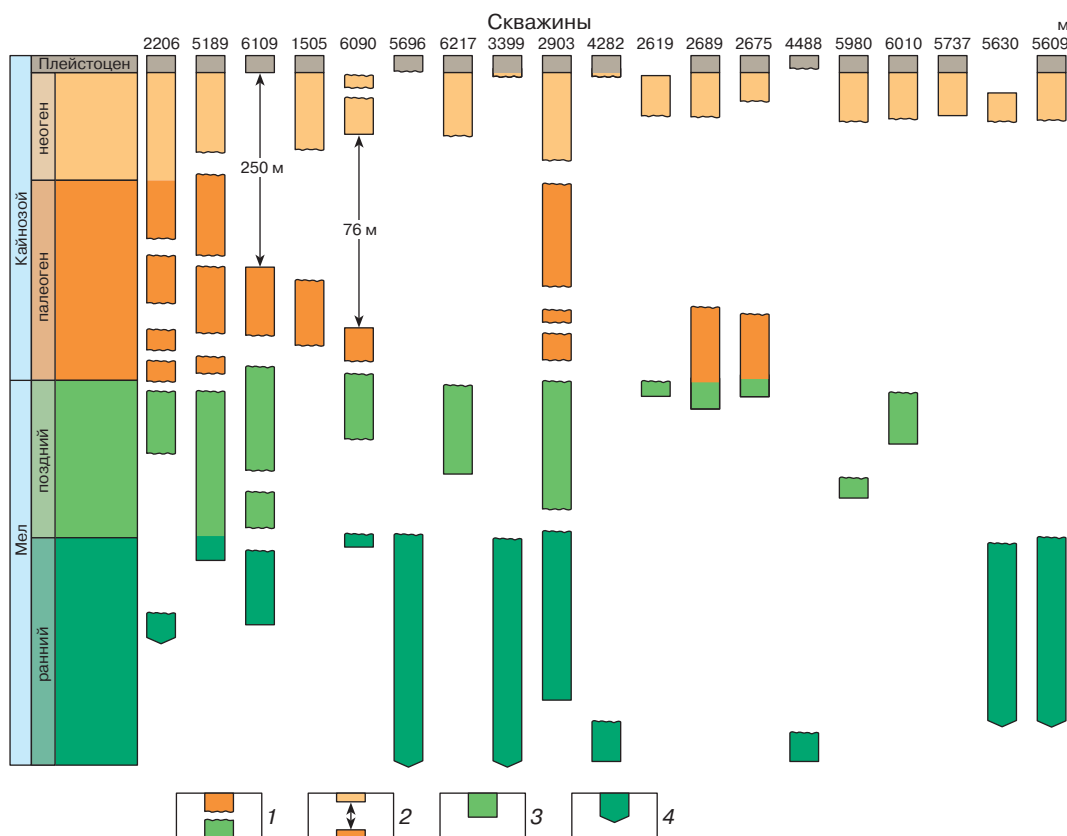
**Рис. 4.** Некоторые ископаемые микроорганизмы, используемые в стратиграфических исследованиях: 1 – планктонные фораминиферы; 2 – бентосные фораминиферы; 3 – радиолярии; 4 – диатомовые водоросли; 5 – кальцисфера; 6 – кокколиты

осадочном чехле Тихого океана (рис. 5). Их продолжительность колеблется от нескольких сот тысяч до нескольких миллионов и даже десятков миллионов лет. Такое широкое распространение перерывов в осадочном чехле океанов указывает на его активный размыв придонными течениями и широкое развитие гравитационных склоновых процессов.

Вместе с тем анализ осадочных разрезов показывает, что придонная циркуляция в Мировом океане не всегда была столь интенсивной, чтобы препятствовать отложению новых осадков или приводить к размыву уже накопленных. В его истории были периоды, когда циркуляция придонных вод в некоторых частях почти полностью прекращалась. Это приводило к появлению в придонном слое воды анаэробных (бескислородных) условий и формированию на дне специфических черных сланцев с повышенным содержанием органического вещества, поскольку падающие сверху отмершие планктонные организмы и растительные остатки, приносимые реками с суши, при отсутствии кислорода захоронялись в осадках, не разлагаясь. Бурением было установлено, что особенно широко такие условия были развиты в Атлантическом океане в меловое время – в аптском веке и на рубеже сеноманского и туронского

веков, то есть приблизительно 110–115 и 90–95 млн лет назад. Позднее следы этих событий, которые получили название “бескислородные события в океане” (Oceanic Anoxic Events или OAE-1 и OAE-2), были обнаружены также во многих разрезах морских отложений на континентах. В некоторых районах, как, например, на Фолклендском плато в Южной Атлантике, черносланцевые отложения, накапливавшиеся в течение гораздо более длительного времени и имеющие большую мощность, содержат жидкие и газообразные углеводороды, которые могут представлять промышленный интерес.

Впечатляющие результаты получены также при реконструкции палеоклимата. В отличие от континентальных разрезов, где климатические колебания часто отражены в составе осадков, в океанах их, как правило, можно восстановить лишь на основе изменений в составе микропланктона по разрезу и в разных широтных зонах. В современном океане распределение микропланктона в поверхностных водах подчинено широтной климатической зональности, в соответствии с которой различные его ассоциации приурочены к зонам (поясам), протягивающимся параллельно экватору и характеризующимся определенными температурами вод. Аналогичные, хотя иногда в той или иной мере



**Рис. 5.** Стратиграфические перерывы в осадочном чехле Тихого океана: 1 – перерывы; 2 – непроверенный интервал; 3 – скважины, не достигшие фундамента; 4 – скважины, достигшие фундамента

искаженные в силу местных причин пояса прослеживаются также и на дне океана, куда раковины микроорганизмов падают после их отмирания. При изучении керны глубоководных скважин выяснилось, что такая широтная зональность распространения была также присуща и древним организмам. Это особенно хорошо заметно в распределении планктонных фораминифер – простейших микроорганизмов с известковой раковиной, исключительно чутких к колебаниям температуры поверхностных вод. Благодаря этому свойству они превратились в важный инструмент при реконструкциях климата прошлого. Более того, оказалось, что в момент роста раковин фораминифер изотопный состав кислорода в них находится в равновесии с изотопным составом морской воды, то есть при потеплениях и таяниях ледников раковины обогащаются легким изотопом кислорода и, наоборот, при похолоданиях и росте ледников на континентах – тяжелым изотопом. Это позволило разработать надежный метод оценки климата прошлых геологических эпох. Особенно эффективен

изотопный метод при реконструкции изменений климата на протяжении последних 700 тыс. лет. Для этого периода получена исключительно детальная палеоклиматическая кривая, которая повторяется в почти неизменном виде в разных районах океана, что свидетельствует о ее надежности.

Таким образом, открытия и достижения в морской геологии и палеоокеанологии, которые стали возможны благодаря глубоководному бурению, позволяют считать, что огромные финансовые затраты и усилия сотен и тысяч ученых не пропали даром. За последние три десятилетия, когда осуществляется программа бурения в океанах, геология превратилась в науку, которая изучает Землю как единую систему со сложным взаимодействием ее различных оболочек: литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Следует подчеркнуть, что осуществление такой грандиозной программы стало возможно благодаря тесной международной кооперации научных организаций и ученых из многих стран.

## ГЛУБОКОВОДНОЕ БУРЕНИЕ В XXI ВЕКЕ

Несмотря на очевидные достижения в изучении океана, полученная информация об истории его развития еще во многом остается приблизительной и несопоставимой с нашими знаниями геологической эволюции континентов. Это вполне объяснимо, если учесть, что на 2/3 земной поверхности приходится немногим более тысячи точек наблюдения, в то время как на суше почти не осталось мест, где не побывал геолог. Более того, при взгляде на карту расположения скважин глубоководного бурения (см. рис. 3) хорошо видно, что большая их часть сконцентрирована в низких и умеренных широтах и вблизи континентов. В то же время удаленные районы океана и его высокие широты охвачены глубоководным бурением совершенно недостаточно.

Можно предполагать, что в будущем программа глубоководного бурения будет концентрировать свои усилия как на решении конкретных проблем геологии океана, так и на расширении географии и детализации этих работ. В первую очередь это должно коснуться приантарктических и арктических областей.

В последнее время специалисты, занимающиеся проблемами палеоклиматической эволюции Земли единодушны в том, что гидрологические и атмосферные процессы в Арктическом бассейне определяют климат планеты сейчас и имели первостепенное значение для его формирования в прошлом. Нет сомнения, что они будут определять его и в будущем. Поэтому без знания основных закономерностей эволюции климата прошлого, особенно не столь отдаленного, невозможна разработка надежных климатических моделей, которые необходимы в связи с угрозой глобального потепления и возможной экологической катастрофы.

В настоящее время в дополнение к программе океанского бурения создана специальная Международная программа научного бурения в Арктике (Nansen Arctic

Drilling Program), которая объединила ученых из России, Норвегии, Дании, Великобритании, Голландии, Германии, Канады, США и Японии. В рамках этой программы будут исследоваться две основные проблемы: эволюция литосферы Арктического бассейна и эволюция палеосреды в кайнозое, то есть в период, охватывающий последние десятки миллионов лет геологической истории. С этой целью уже выбраны приоритетные районы бурения в Арктике, а также рассмотрены и оценены с точки зрения их потенциальных возможностей различные технологии и средства бурения.

Начало осуществления программы бурения в Арктике можно ожидать уже в ближайшие годы. Нет сомнения, что ее реализация и продолжение глубоководного бурения в океанах будут столь же успешными, как и предыдущие исследования, и впереди нас ждут новые открытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов Ю.А., Каплин П.А., Николаев С.Д. Происхождение и развитие океана. М.: Мысль, 1978.
2. Пейве А.В., Богданов Н.А., Торчигина Л.А. Некоторые аспекты глубоководного бурения в океанах. М.: Знание, 1983.
3. Кеннет Дж.П. Морская геология: В 2 т. М.: Мир, 1984.
4. Богданов Н.А., Басов И.А. Программа научного бурения в Арктике // Природа. 1998. № 2.
5. Басов И.А. Океаническая и климатическая эволюция в миоцене: Сб. конкурс. ст. РФФИ. М.: Academia, 1999.

Рецензент статьи В.С. Попов

\* \* \*

Иван Алексеевич Басов, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией биостратиграфии Института литосферы окраинных и внутренних морей РАН. Область научных интересов – микропалеонтология, стратиграфия, морская геология. Автор более 160 научных работ.