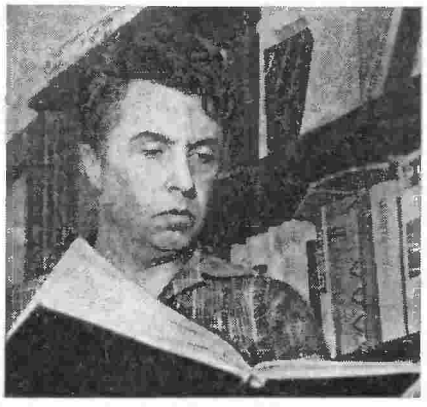
Твердая оболочка Земли и землетрясения

Б. С. Вольвовский
Кандидат геолого-минералогических наук
Б. И. Силкин

Борис Самуилович Вольвовский, заведует сектором международных экспедиционных работ в Советском геофизическом комитете АН СССР. Занимается сейсмическими исследованиями земной коры.



Борис Исаакович Силкин, работает в редакционной группе Советского геофизического комитета АН СССР, принимал участие в исследованиях по программе Международного геофизического года.

Наши знания о том, что происходит в недрах Земли еще далеки от совершенства: глубочайшая скважина в мире едва достигает десятка километров, и мы, можно сказать, только «поскребли» верхний слой краски на нашем земном глобусе. Но каждый день приносит новые сведения, которые пополняют представления о глубинном строении планеты. Многое, в частности, дает нам сейсмология — наука, изучающая распространение упругих волн.

Очаги сильных землетрясений

В последние годы в сейсмологии присходит смещение области преобладающего интереса — от изучения среды, в которой распространяются сейсмические волны, к изучению самих источников таких волн — очагов сильных землетрясений. Сейчас уже недостаточно знать, как те или иные глубинные процессы проявляются на поверхности Земли. Нужно понять, что же происходит в ее недрах. До некоторой степени это можно выяснить на моделях или путем теоретических расчетов и сопоставлений.

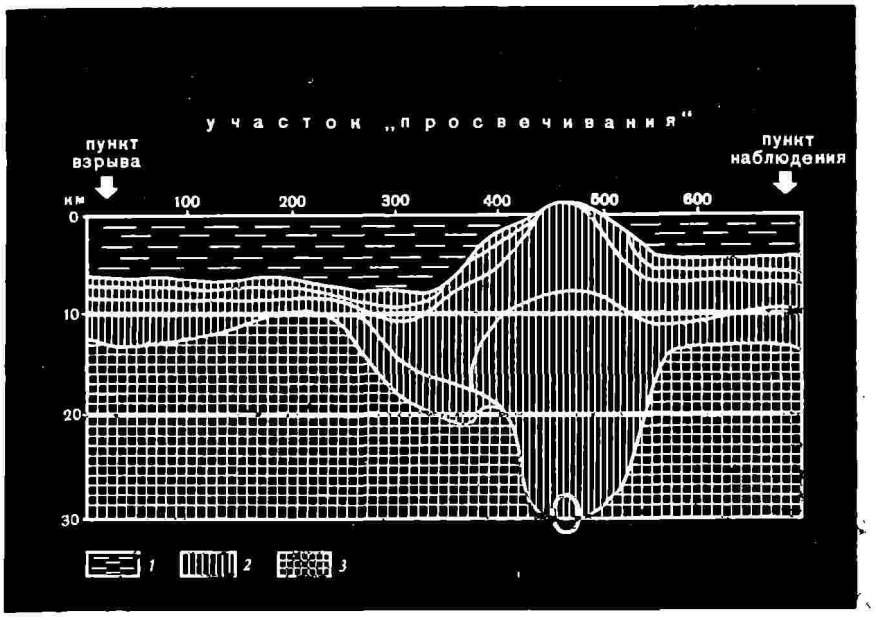
Моделирование как вещественное, так и математическое, позволяет выполнить, например, эксперимент, в котором процессы разлома в земной коре имитируются на двухмерной пластиковой модели, причем мощный лазерный импульс служит источником энергии для «спускового механизма» землетрясения. Удается измерить скорость распространения разлома как функцию напряжения и энергии этого «спускового механизма».

Если сопоставить процессы деформации земной коры за последние 30 млн лет с возникновением землетрясений на территории нашей страны, можно сделать важные выводы:

измерения скорости движений земной коры на поверхности позволяют судить о деформациях и напряжениях, существующих в недрах;

сейсмически активные области обычно отличаются большими значениями средней и максимальной скорости движения (до 1000%), и наконец, сезонные изменения обстановки, значительные атмосферные осадки и приливы тесно связаны с деформациями и могут играть роль «спускового крючка» для землетрясений.

Ученые обратили внимание на тот факт, что во многих районах при проходке шахт и других подземных выработок обнаружены сжимающие напряжения, в несколько раз превышающие нормальное гидростатическое давление. Такие «избыточные» напряжения особенно характерны для гранитного слоя земной коры на Балтийском щите, Североамериканской и Африканской платформах и палеозойских складчатых поясах Норвегии, Шпицбергена, Ирландии, Урала, Саян, Казахстана и о. Тасмании. По-видимому, такое избыточное напряжение максимально на глубине от 10 до 40 км, а ведь именно здесь выделяется около 70% всей сейсмической энергии Земли. Очевидно, это напряжение снимается при землетрясении лишь частично, и в энергию упругих сейсмических волн переходит только небольшая высвобождающаяся ее часть. Существующие данные о сол-



Схематический разрез земной коры в районе очага землетрясения (О). Сейсмические волны, «просвечивающие» земные недра, возникают от взрывов, производимых с одной стороны от участка «просвечивания», а регистрируются с другой стороны, 1 — толща воды, 2 — земная кора, 3 — мантия.

нечных затмениях за весь исторический период позволяют предположить, что радиус Земли сокращается на 3 мм/год. Следовательно, растяжение коры в рифтовых зонах, таких как Байкал или Восточно-Африканская система, или срединно-океанические хребты, может быть следствием «выдавливания» наиболее пластичной и легкой массы в обстановке общего сжатия планеты.

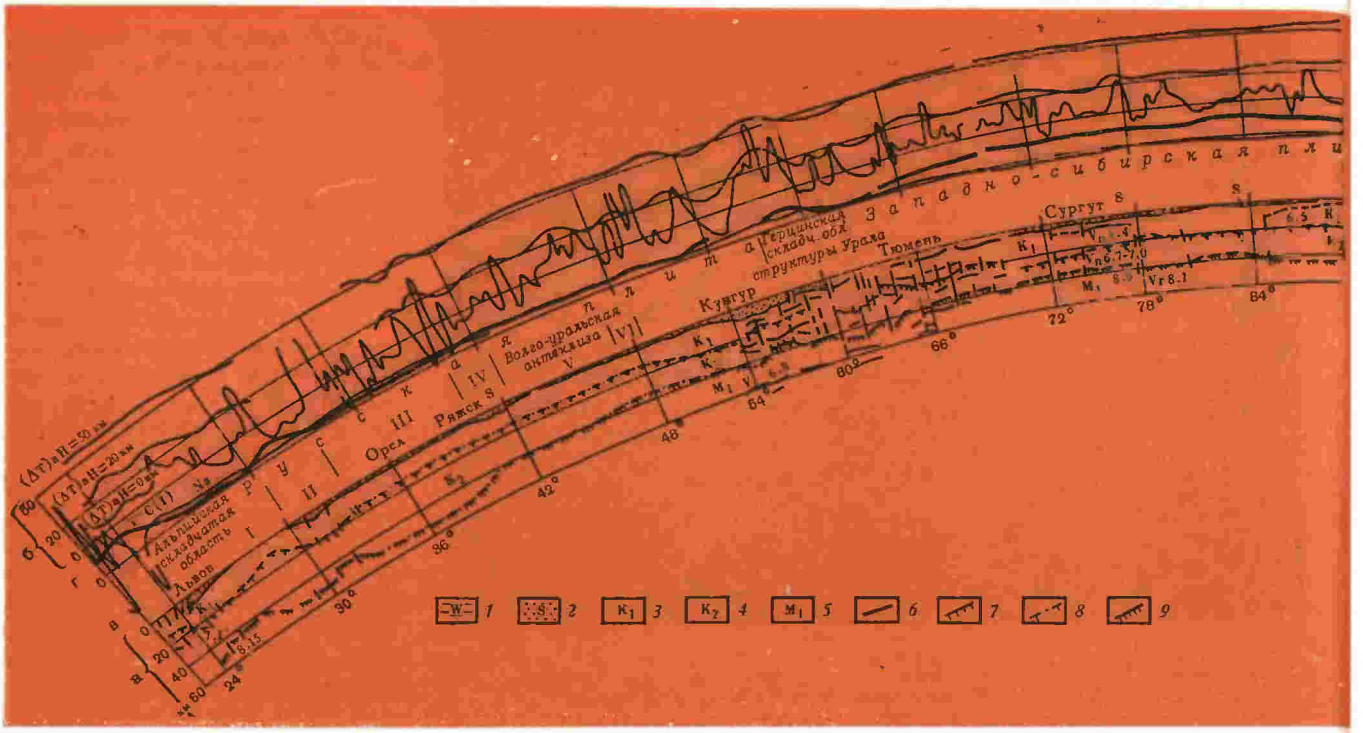
Сейсмический «климат» отдельных областей Земли определяется процессом тектонического, в частности, сейсмического течения горных масс в поле напряжений Земли. К сейсмической погоде, совокупностью которой определяется этот климат, относится чередование периодов относительного покоя с периодами усиления сейсмичности, подготовки и возникновения сильных землетрясений, форшоков (предваряющих) и афтершоков (последующих за землетрясением) толчков. Видимо, сейчас уже назрела необходимость активнее переходить от схем, позволяющих выявлять лишь геометрию направления напряжений и предполагаемых подвижек в очаге, к выяснению особенностей движений в очаге — скорости вспарывания материи, направления истинных подвижек, их величины. Тогда возникнет возможность непосредственно связывать накапливающиеся в очагах деформации с параметрами сейсмического и тектонического течения пород в поле напряжений Земли.

Теоретические расчеты, моделирование, анализ большого описательного материала и его сопоставление, результаты исследования землетрясений, наконец, наблюдения очагов самых сильных землетрясений в натуре позволяют считать установленным, что существуют качественные различия между простыми трещинами в земной коре, порождающими лишь слабые толчки, и очагами больших сейсмических катастроф, протяженностью в десятки и даже сотни километров. Изучение этих различий совершенно необходимо для приближения к прогнозу землетрясений, а в отдаленном будущем — и для предотвращения такого рода стихийных бедствий.

Что же предшествует землетрясению? В последние годы особенно интенсивно изучается физика разрушения материалов. В лабораторных условиях наблюдают процессы разрушения горных пород, уменьшения их прочности, чтобы получить ответ на вопрос — как ведет себя глубинная материя в естественных условиях перед толчком. Исследователи пришли к выводу, что непосредственно перед землетрясением в недрах создается область с аномальными физическими свойствами. Прежде всего, наблюдаются изменения скоростей распространения упругих волн в этой области. Естественно, такую зону предполагаемых аномалий следует подвергнуть «просвечиванию» упругими волнами от взрывов. Эти работы проводятся на Камчатке.

Удалось измерить, как изменяется скорость распространения упругих волн накануне землетрясения. После того как зафиксировали уменьшение скорости на 4% — произошло землетрясение. От момента первого зафиксированного уменьшения скорости упругих волн до землетрясения прошло 3,5 месяца. Очевидно, верна общая гипотеза: перед разрушением горных пород происходит уменьшение их прочности, образуются трещины скольжения, изменяются физические свойства. И, хотя проблемой «просвечивания» области будущего землетрясения занимаются всего несколько лет, удалось добиться относительно малой ошибки метода: изменение скорости упругих волн превосходит ошибку в 5—10 раз. Существуют и другие методы поиска предвестников землетрясений. Можно уже говорить о некоторой зависимости: чем сильнее землетрясение, тем больше временной интервал между ним и существованием предвестника. Идут поиски кратковременных симптомов, которые «предупреждают» о катастрофе за несколько часов.

Статистический анализ полного каталога слабых (с магнитудой, не превышающей 2,5) землетрясений Камчатки за 1965—1969 гг. обнаружил ряд предваряющих такие события параметров. Возникла возможность за 5—10 суток предсказывать, в какой период вероятность землетрясе-



Геолого-геофизический разрез земной коры по линии Карпаты — Курилы. Составили Н. А. Беляевский, А. А. Борисов, Б. С. Вольвовский, Ю. К. Щукин. Масштабы: горизонтальный 1 см = 50 км, вертикальные: а) на разрезе: 1 см = 10 км; б) на графиках аномального магнитного поля: 1 см = 200 гамм; в) на графике амплитуды неотектонических движений: 1 см = 500 м; г) на графике удельной сейсмической энергии: 1 см = $10^{-2} \times 10^{-12}$ эрг/см³ сек. 1 — вода; 2 — осадочный покров платформ и глубоких впадин, рыхлые осадки океанических и морских бассейнов; 3 — кристаллические и метаморфизованные породы преимущественно кислого состава (условно «гранитный» слой); 4 — кристаллические и метаморфизованные породы преимущественно основного состава (условно «базальтовый» слой); 5 — породы верхней мантии (предположительно ультраосновного состава); 6 — поверхность консолидированной коры (слоя K_1), по данным бурения КМПВ и ГСЗ; 7 — поверхность слоя K_2 «базальтовый»), по данным ГСЗ.

ния с магнитудой от 5 до 6 возрастает в 1,5—2 раза по сравнению со средней вероятностью.

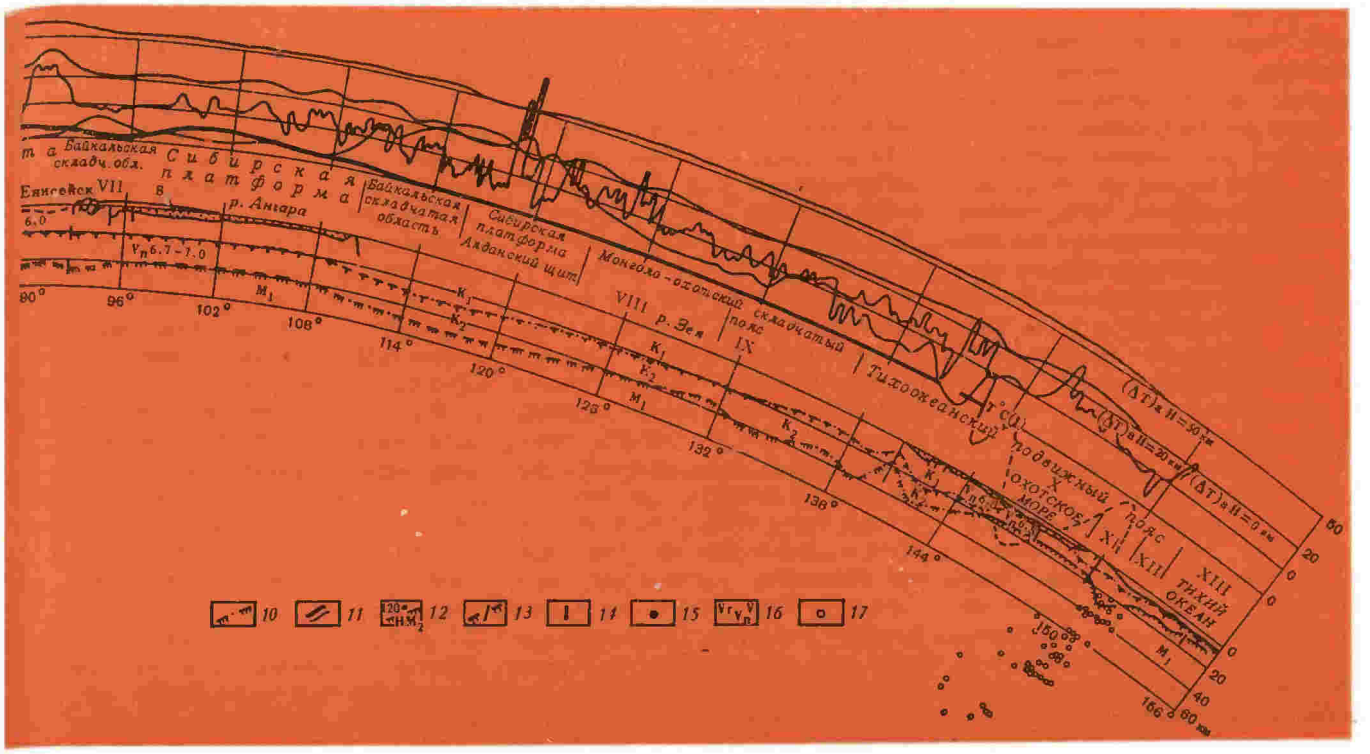
В океане, у южных берегов Камчатки, регулярно производились взрывы. Оказалось, что скорость возбуждаемых ими сейсмических волн изменяется до 1% своей величины, однако землетрясений с магнитудой более 6 при этом не возникало. Зато другая методика оказалась более обнадеживающей: перед девятью землетрясениями в районе мыса Шипунского с магнитудой от 5 до 7¾ в радиусе 150 км от них наблюдались аномальные изменения электротеллурического поля; сохранялись они в течение 2—16 суток.

Расчеты и лабораторные опыты показывают, что эти изменения, возможно, имеют пьезоэлектрическую природу.

С этим отчетливо перекликаются другие наблюдения. Так, в 1930 г. крупному землетрясению на п-ве Северный Идзу (о. Хонсю, Япония) предшествовала совершенно необычная (в отсутствие грозовых облаков) грозовая деятельность, которая продолжалась во время землетрясения и после него. Видимо, большая роль в создании электрического потенциала принадлежит пьезоэлектричеству, порождаемому напряжениями в земной коре, содержащей здесь большое количество кристаллов кварца. Если пьезоэлектрические породы покрыты слоем почвы, обладающим свойством электропроводности, возникают лишь теллурические токи, а не грозовые разряды. В противном же случае атмосфера получает из почвы значительный заряд, вероятно, и питающий столь необычную грозовую активность. Примеры ее можно почерпнуть из самых различных источников, начиная с летописей, датируемых еще 373 г. до н. э., и кончая недавними землетрясениями в Лос-Анджелесе и Сан-Фернандо (штат Калифорния), которые также сопровождались грозой при ясном небе.

Не забывает наука и других, пожалуй, еще более «экзотических» способов возможного предсказания сейсмических катастроф. Так, перспективы могут скрываться в таких малоисследованных, но известных с древнейших времен факторах, как поведение животных в момент надвигающегося землетрясения.

Известны случаи, когда в Новой Зеландии перед подземным толчком наблюдалось беспокойное поведение фазанов и лошадей, а в Ташкенте — муравьев. Многочисленны сви-



8 — то же по расчетным данным; 9 — поверхность Мохоровичича, по данным ГСЗ; 10 — то же по расчетным данным; 11 — другие промежуточные границы в земной коре и верхней мантии, по данным ГСЗ; 12 — точки магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и глубина залегания поверхности проводящего слоя; 13 — разрывные нарушения в слоях S и K_1, по геологическим данным; 14 — зоны аномальной сейсмической записи, возможно связанные с глубинными разломами; 15 — глубины до сейсмических границ на пересекающихся профилях; 16 — сейсмические скорости в км/сек; $V_г$ — граничная, V — средняя, $V_п$ — пластовая; 17 — гипоцентры землетрясений. I — Украинский массив; II — Днепрово-Донецкая впадина; III — Воронежский массив; IV — Пачелмский прогиб; V — Токмовский свод; VI — Татарский свод; VII — Енисейский мегантиклинорий; VIII — Сводовое поднятие Станового хребта; IX — Буреинский массив; X — Южно-Охотская впадина; XI — Курильская дуга; XII — Курильский желоб; XIII — Тихоокеанский талассократон.

детельства о том, что комнатные животные чувствуют землетрясение за минуту до толчка, а дикие — за несколько часов, иногда даже до четырех. Существует древняя японская традиция приписывать такую чувствительность некоторым породам рыб, якобы покидающим обычные места обитания или изменяющим характер поведения в бассейне и аквариуме. Безусловно, это чисто эмоциональная категория, и некоторые склонны считать ее всего лишь предрассудком. Но категорически отрицать этого не следует. Напротив, необходимо объединить усилия представителей самых различных специальностей, вооружить их оборудованием для широкой постановки экспериментов, чтобы затем или отбросить подобные идеи, или использовать их для практических целей прогноза землетрясений.

Выдающийся успех

Десять лет прошло с тех пор, как советский ученый В. В. Белоусов, выступая на VIII Генеральной ассамблее МГГС в Хельсинки, внес предложение о проведении международного проекта Верхняя мантия и ее влияние на развитие земной коры. Идея была поддержана широкой научной общественностью; около 50 стран участвовало в ее осуществлении.

На XV Генеральной ассамблее МГГС, проходившей в Москве в августе 1971 г., ученые единодушно оценили эти работы как выдающийся успех науки о Земле. Именно благодаря этому проекту мы сегодня знаем о состоянии вещества в недрах нашей планеты значительно больше, чем десятилетие назад.

В частности, советские ученые провели оригинальные эксперименты с ударным сжатием горных пород. В результате определенный вес получила гипотеза о том, что верхняя мантия состоит из окислов, а ядро — из сплава железа и кремния. Впервые нашим специалистам удалось успешно применить в физике Земли уравнения состояния вещества при высоких давлениях, что позволяет яснее представить, как именно и из чего «сделан» земной шар.

В США в лабораторных условиях проведены эксперименты по ударному сжатию материалов, по-видимому, подобных мантийным. Доказано существование в условиях температур и давлений, присущих нижней мантии, не только окислов, но и более сложных соединений в специальных, «плотно упакованных фор-

«мах». Теперь уже экспериментально доказано, что в верхней мантии имеется слой с пониженными скоростями распространения сейсмических волн (его именуют астеносферой), тогда как до сих пор существование такого слоя было предположением, обоснованным лишь теоретически. Такие пониженные скорости распространения сейсмических волн охватывают глубины между 50 и 200 км, где материя представляет собой нечто вроде частичного расплава с меньшей прочностью и вязкостью пород.

Наши японские коллеги провели серию опытов, в которых исследовались механические неупругие свойства горных пород при тех давлениях, что существуют в недрах. Отсюда возникло лучшее понимание законов пластичности, хода появления трещин и разрушения глубинной материи, а это, в свою очередь, очень важно для осознания природы и механизма землетрясений.

Минералогия земных глубин

Последние полтора десятка лет ознаменовались появлением новой дисциплины — минералогии земных глубин. По существу, это изучение поведения минералов при высоких температурах и давлениях.

Среди важнейших достижений этой молодой отрасли знания уже можно назвать полученные лабораторным путем новые, ранее не известные виды минералов с необычными свойствами (повышенная плотность, большая твердость, а нередко и высокая теплопроводность). Подтвердилось, что многие привычные минеральные вещества под действием высокого давления приобретают свойства металлов. Так, фосфор при давлении 40 тыс. атм преобретает свойства металла; водород при тех условиях, что царят в земном ядре, также превращается в металлический водород[1]. Кстати, здесь таятся большие перспективы для ряда областей техники. Например, металлический бензин будет обладать огромной плотностью, малым объемом и сможет быть размещен чрезвычайно компактно в незначительных емкостях на борту самолета с увеличенным радиусом действия. Если же удастся получить металлический водород в реально достижимых в широкой практике условиях, его свойства сверхпроводимости приведут к подлинной революции в ряде областей техники. Так проблемы, над которыми сегодня трудятся геофизики, переплетаются с практическими задачами завтрашнего дня.

Геофизики же, опираясь на методы современной математики, имеют теперь возможность вычислить, какие условия должны существовать в земном ядре, чтобы там могли возникнуть металлические модификации минералов, аналогичные полученным в эксперименте. На основе накопленных за последние годы данных ныне обосновывается мнение, что именно фазовые переходы минералов, связанные с изменением их объема, и есть один из возможных источников глубоких землетрясений. Ведь при смене температуры или нагрузки внезапное изменение объема может носить характер взрыва. Гипотеза, согласно которой землетрясения с очагом, залегающим между 400 и 700 км, вызываются именно таким образом, основана на изложенном механизме фазового перехода минералов.

Изменения же температуры и давления на глубинах, в свою очередь, связаны с существованием в теле Земли термических градиентов, которые приводят к оттоку тепла из одной области в другую. Вблизи поверхности термический градиент составляет 20—30° на километр глубины, а на стокилометровой глубине он близок к 1,5° на километр.

Сами эти градиенты более или менее постоянны, но при достижении критических условий начинается цепной процесс изменения кристаллической решетки; возможен и взрыв. Здесь уместна аналогия с водой, нагревание которой происходит медленно, а закипание — внезапно, только после накопления известных количественных изменений, лишь по достижении вполне определенной температуры.

Итак, можно резюмировать: строение мантии не такое простое, как представлялось ранее. На глубинах 400 и 700 км наблюдаются довольно резкие скачки физических характеристик. Такие границы в мантии не менее важны, чем известная из сейсмологических наблюдений граница Мохоровичича. Эти скачки физических свойств ныне хорошо увязаны с кристаллографическими данными о структуре минералов, полученных в лабораторных условиях путем приложения высоких давлений и температур. Нам пришлось отказаться от привычного представления об однородности верхней мантии. По-видимому, процессы, порождающие такую неоднородность, «спрятаны» достаточно глубоко и не доступны имеющимся сейчас методам исследования.

Однако общий оптимизм ученых неплохо характеризуется словами профессора Л. Кнопова (США), бывшего все эти годы секретарем международного Комитета по проекту Верхняя мантия. Он говорил, что когда мы начинали работы по нашему проекту, мы были представителями самых различных дисциплин: сейсмологами, математиками, физиками, геологами, геодезистами. А теперь мы каким-то волшебным образом стали представителями единой науки о Земле... Это и рождает надежду на дальнейшее успешное продвижение наших знаний в глубины планеты.

Выдающийся успех проекта Верхней мантии побудил ученых принять решение о дальнейшем развитии заложенных в нем идей, организовав новый международный Геодинамический проект. Цели его состоят в том, чтобы продолжать изучение причин, вызывающих геологические процессы в глубине Земли. Особое значение в его программе будет уделено объединению методов, присущих всем наукам о Земле; сбалансированию наших знаний с тем, чтобы сведения о земной коре под океанами «догнали» куда более изученные в этом отношении континенты; исследованию тех геологических структур, которые прослеживаются не только на дне акваторий, но и выходят затем на сушу.

Общие наметки плана, по которо-

[1] См. «Природа», 1971, № 10, стр. 8.

му будет развертываться новый международный Геодинамический проект, включают изучение интереснейших тектонических процессов, происходящих в Исландии, на дне западной части Тихого океана и в пределах Альпийско-Гималайского горного пояса, изучение необъясненных распространенной ныне гипотезой «расширения морского дна» причин вертикальных движений в зонах разлома земной коры или асейсмичности подводных хребтов Вальвис, Карнеги, Кокосового, Техуантепек, Наска и др. Привлекают внимание попытки сторонников этой гипотезы обнаружить свидетельства существования в мезозое подводного поднятия Дарвина (Тихий океан). Результаты таких поисков должны пролить свет на многие неясности этой гипотезы в целом.

Очередное слово, раскрывающее историю и взаимосвязь магматических, метаморфических и тектонических процессов за Геодинамическим проектом. Он позволит провести глобальный анализ свидетельств, ведущих к реконструкции во времени положений континентов и океанов.

В тесном содружестве наук

Изучению процессов, происходящих в недрах Земли, помогают и новейшие данные о физике, химии и фигуре Луны, полученные благодаря работе нашего «Лунохода» и американских кораблей «Аполлон». В результате мы теперь отчетливее представляем себе, как переносится тепловая энергия из глубин Луны к поверхности и каковы механизмы вулканической деятельности на этом ближайшем космическом теле, еще недавно представлявшемся совершенно мертвым в физическом смысле слова. Методы изучения магнетизма горных пород позволили недавно обнаружить, что 3—3,5 млрд лет назад на Луне существовало магнитное поле. Оно было примерно в 40 раз слабее современного магнитного поля Земли. Можно полагать, что у Луны в ее древний период развития было жидкое ядро, обусловившее появление такого магнитного поля. Все это позволяет сказать, что совсем еще молодая наука — сравнительная планетология — делает свои первые, но вполне решительные шаги.

Не уступает ей и значительно более древняя наука — геодезия. Направление, исследующее современные движения земной коры, оказалось весьма плодотворным. Наши ученые возглавили международные работы по составлению карты таких движений, охватывающей всю Восточную Европу. Такая карта сразу выдвигает нас далеко вперед в этой области, важной как для теории, так и для практических целей строительства крупных сооружений, требующих точного знания масштабов перемещения больших участков земной коры.

Разработанный в СССР метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ)[1] стал за последние годы буквально всеобщим достоянием. Огромные пространства на всех континентах теперь охвачены этими исследованиями. «Прозвучивание» земной коры уже позволило создать довольно четкую картину недр столь удаленных друг от друга территорий, как Аляска и Австралия, Новая Гвинея и Антарктида. Мы же можем с гордостью сказать, что теперь строение земной коры в нашей стране принадлежит к числу наиболее изученных в мире.

За рубежом развитие теоретических исследований в области взрывной сейсмологии идет примерно в том же направлении, что и в СССР. Однако вопросу определения природы зарегистрированных волн зарубежными учеными уделяется меньше внимания, чем это делается в СССР. Тем не менее значение работ по изучению земной коры сейсмическими методами в Западной Европе и Северной Америке в познании глубинного строения континентов весьма существенно. Они вскрывают те же особенности глубинного строения, какие установлены для различных геологических структур на территории СССР.

Чрезвычайно успешными оказались и работы по глубинному сейсмическому зондированию, выполненные в сотрудничестве учеными СССР, ГДР, Польши, Болгарии, Венгрии, Румынии и Югославии в областях Восточной Европы, коллективом французских, испанских, западногерманских и швейцарских геофизиков в Альпах, а учеными скандинавских стран — на севере Европы. Планы дальнейших таких исследований, вероятно, включат использование в научных целях тех мощных взрывов, которые время от времени производятся строителями крупных сооружений. Такие взрывы и распространяющиеся от них волны в твердом теле планеты позволят, подобно молнии в темной ночи, «осветить» строение земных недр.

*

Проблемы, о которых шла речь, служили предметом горячих дискуссий во время проходившей в Москве в августе 1971 г. XV Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза. Работы отечественных ученых, участвовавших в Ассамблее, находились в центре внимания всех собравшихся. И определенным признаком высокой оценки нашей науки был тот факт, что в результате состоявшихся выборов четыре из семи международных Ассоциаций, а также ряд комитетов и комиссий, входящих в состав МГГС, будут теперь возглавляться советскими специалистами.

Трудно перечислить все научные аспекты столь большой и всеохватывающей конференции, какой была XV Генеральная ассамблея МГГС. Существенным является тот вывод, что на ней подтвердился давно отстаиваемый советскими учеными тезис:

Наука о Земле неделима, как неделим ее объект — наша планета, и лишь при комплексном ее изучении возможно добиться существенных успехов. С новой силой подтвердился также тезис о том, что только усилиями ученых всех стран, сосредоточенными на выполнении общих проектов, согласованных в международном порядке, можно плодотворнее изучать Землю.

[1] См. «Природа», 1972, № 4.

УДК 550, 3; 550.34.