

GEOLOGY TODAY: PROBLEMS AND PERSPECTIVES

V. E. KHAIN

In this paper, the main problems of geological science are formulated, the crucial events in its history are noted, and its contemporary conditions are evaluated. Main trends in the modern investigations aimed at the creation of a new, improved model of the Earth's dynamic are described. Finally, aspects of the practical application of geological knowledge are briefly mentioned.

В статье рассмотрены задачи геологической науки, кратко описаны основные переломные моменты ее развития, оценивается современное состояние и обрисованы главные направления исследований, нацеленных на создание более совершенной модели динамики Земли. Кратко затронуты также практические аспекты приложения геологических знаний.

СОВРЕМЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. Е. ХАИН

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Геология, как показывает ее название, — наука о Земле, в основном о твердой Земле. Ее ближайшая родственница — география — занимается описанием земной поверхности, ее взаимодействия с океаном и атмосферой. Геология и география в ряду естественных наук располагаются между астрономией и биологией. На стыке астрономии и геологии лежит понимание положения Земли и условий ее существования в рамках Солнечной системы, а также выяснение происхождения этой системы, а вместе с ней и нашей планеты. Геология и биология имеют общую задачу: раскрытие обстановки появления жизни на Земле и условий дальнейшего развития органического мира. Кроме того, пласты земной коры содержат летопись эволюции животных и растений, а остатки этих организмов помогают геологам определить относительный возраст пластов, их заключающих. В общем геологические знания — это необходимое и важное звено научного мировоззрения. Значение геологии в этом смысле возросло после начала изучения других планет Солнечной системы и их спутников; геология стала частью более широкой науки — планетологии, но часто говорят о “геологии” той или иной планеты.

Значение геологической науки для хозяйственной деятельности человека неуклонно возрастало по мере вовлечения в эту деятельность все новых и новых видов полезных ископаемых — от угля до урановой руды и редких элементов, — пока их спектр практически не охватил всю таблицу Менделеева. В двадцатом столетии к этой традиционной прикладной функции геологии добавилась новая: без серьезного геологического обоснования стало невозможным проектирование и строительство крупных инженерных сооружений — гидроэлектростанций, атомных электростанций, каналов и т.п. Позднее определилась еще одна важная роль геологии: предупреждение о проявлении и учет возможных последствий природных катастрофических явлений — землетрясений, вулканических извержений, оползней и т.д. Когда сравнительно недавно человечество осознало необходимость сохранения окружающей природной среды и оценки направленности (так называемого мониторинга) ее естественного изменения, наука об окружающей среде — экология заняла видное место среди других наук, а в ее составе оформился раздел, относящийся к геологической компоненте этой среды, — геоэкология или экогеология. Нетрудно предвидеть, что это

направление геологических исследований будет быстро развиваться в следующем столетии.

Сверхзадачей теоретической геологии со времени ее возникновения (более 200 лет назад) всегда было создание теории, объясняющей происхождение и развитие Земли. Ровно 200 лет назад, в 1796 г., вышла в свет книга шотландца Дж. Хаттона “Теория Земли”. Однако в действительности вплоть до середины двадцатого столетия не было реальных предпосылок для создания такой полноценной теории. Вместо нее появился ряд гипотез, не имевших достаточного фактического основания и противоречащих друг другу. Ситуация резко изменилась в лучшую сторону лишь в середине нашего века.

ПЛИТНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ 60-Х ГОДОВ

В первые же послевоенные годы началось стремительное накопление новых материалов и впервые были получены достоверные данные о строении ложа океанов и процессах, здесь протекающих. Была открыта мировая система срединноокеанских хребтов, пронизывающих все океаны планеты и осложненных в осевой части рифтовыми долинами — щелями, заполненными молодыми базальтами. Было подтверждено коренное отличие океанской коры от континентальной и обнаружено, что океанская кора характеризуется линейными магнитными аномалиями, параллельными осям срединных хребтов и расположенными симметрично по отношению к ним. Открытие того факта, что древние породы нередко сохраняют ориентировку магнитного поля, существовавшего в момент их образования (застывания для магматических, осаждения для осадочных пород), привело к разработке нового научного направления — палеомагнетизма. А данные, полученные этим методом, принесли неожиданный для самих исследователей результат: они подтвердили выводы А. Вегенера о былом соединении материков в единый суперконтинент и его последующем распаде с образованием молодых океанов.

В результате уже в 1962 — 1963 годах было сформулировано представление о новообразовании океанов в процессе их расширения — спрединга, начиная от осей срединных хребтов, и заполнения базальтовой магмой, изливающейся в рифтовых щелях. Вскоре, в 1967 г. началось глубоководное бурение, сразу же подтвердившее идею спрединга; исходя из этой идеи и недавно же установленного явления периодического обращения (инверсии) магнитного поля Земли, получило объяснение и образование линейных магнитных аномалий, столь характерных для океанов. А в 1967 — 1968 годах представление о спрединге, рождающем новую океанскую кору, было дополнено представлением о ее субдукции — поглощении в глубоководных желобах, окаймляющих вулканические островные дуги. Поглощение это происходит вдоль наклонных сейсмоактивных зон, уходящих глубоко в мантию Земли. Уточнение распределения эпицентров землетрясений на поверхности планеты показало, что

земная кора и вся литосфера разделены на сравнительно небольшое число крупных и среднего размера относительно жестких и монолитных плит, в швах между которыми сосредоточена почти вся тектоническая, сейсмическая и вулканическая активность планеты.

В итоге родилась новая мобилистская концепция, получившая название тектоники плит, быстро завоевавшая широкую популярность (позднее всего, однако, в нашей стране) и подтверждение, принесшее ей впервые в истории геологии статус научной теории. Ее основные положения сводятся к следующему.

1. Литосфера Земли, включающая кору и самую верхнюю часть мантии, подстилается более пластичной, менее вязкой оболочкой — астеносферой.

2. Литосфера разделена на ограниченное число крупных, несколько тысяч километров в поперечнике, и среднего размера (около 1000 км) относительно жестких и монолитных плит.

3. Литосферные плиты перемещаются друг относительно друга в горизонтальном направлении; характер этих перемещений может быть тройким: а) раздвиг (спрединг) с заполнением образующегося зияния новой корой океанского типа; б) подвиг (субдукция) океанской плиты под континентальную или океанскую же с возникновением над зоной субдукции вулканической дуги или окраинно-континентального вулкано-плутонического пояса; в) скольжение одной плиты относительно другой по вертикальной плоскости так называемых трансформных разломов, поперечных к осям срединных хребтов.

4. Перемещение литосферных плит по поверхности астеносферы подчиняется теореме Эйлера, гласящей, что перемещение сопряженных точек на сфере происходит вдоль окружностей, проведенных относительно оси, проходящей через центр Земли; места выхода оси на поверхность получили название полюсов вращения, или раскрытия.

5. В масштабе планеты в целом спрединг автоматически компенсируется субдукцией, т.е. сколько за данный промежуток времени рождается новой океанской коры, столько же более древней океанской коры поглощается в зонах субдукции, благодаря чему объем Земли остается неизменным.

6. Перемещение литосферных плит происходит под действием конвективных течений в мантии, включая астеносферу. Под осями раздвига срединных хребтов образуются восходящие течения; они превращаются в горизонтальные на периферии хребтов и в нисходящие в зонах субдукции на окраинах океанов (рис. 1). Сама конвекция имеет своей причиной накопление тепла в недрах Земли вследствие его выделения при распаде естественно-радиоактивных элементов и изотопов.

Эти сравнительно простые положения позволили логично объяснить широкий круг геологических явлений: не только тектонических движений и деформаций, включая образование складчато-надвиговых

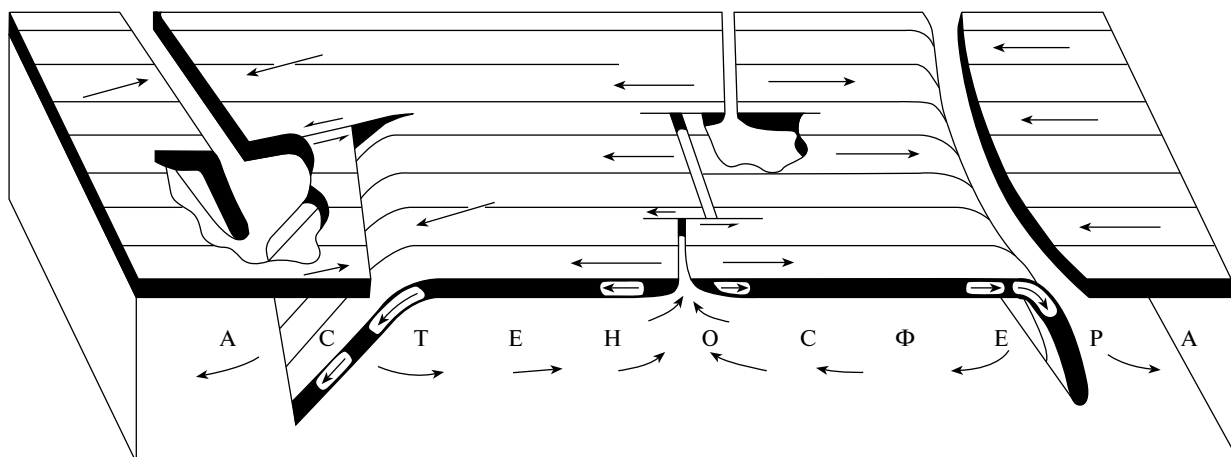


Рис. 1. Блок-диаграмма Б. Изакса, Дж. Оливера и Л. Сайкса (1968), иллюстрирующая относительное движение жестких литосферных плит, формирующихся в зонах спрединга и поглощаемых в зонах субдукции.

горных систем и проявления регионального метаморфизма, но и разнообразие вулканических и интрузивно-магматических, а также осадочных пород и заключенных в них полезных ископаемых. К тому же эти положения получили экспериментальное подтверждение. Одним из наиболее убедительных подтверждений оказались результаты глубоководного бурения, показавшие, что возраст океанской коры систематически возрастает от осей срединных хребтов к окраинам океанов. Их дополнили наблюдения в рифтовых долинах — осях спрединга и вдоль трансформных разломов с подводных обитаемых аппаратов, а в последнее десятилетие прямые измерения методами космической геодезии позволили убедиться в том, что плиты действительно движутся на наших глазах и именно в том направлении и с той скоростью, которые предсказывает данная теория.

В общем, создав научную теорию тектоники плит, геология впервые получила достаточно строго обоснованную теоретическую основу и тем самым поднялась на новую ступень развития, сравнившись в этом отношении с другими естественными науками. В частности, картирование линейных магнитных аномалий с проверкой их возраста по результатам глубоководного бурения и с учетом теоремы Эйлера открыло путь к восстановлению положения материков и очертаний океанов в течение последних 180 млн. лет истории Земли с помощью графических построений на ЭВМ. Установление зависимости между глубиной океана и возрастом коры (чем древнее кора, тем больше глубина) позволило восстанавливать для того же отрезка геологической истории распределение глубин, а это, в свою очередь, дало возможность наметить картину океанских течений. Так возникло новое направление — палеоокеанология. Для более отдаленных, чем юрский период, геологических эпох столь точные построения невозможны, и приходится опираться в основном на палеомагнитные определения и данные палеобиогеографии.

Следующее двадцатилетие после появления тектоники плит — 70 — 80-е годы явились временем ее более широкого применения в глобальном и региональном масштабе. Вся картина развития земной коры и земной поверхности подверглась коренному пересмотру с мобилистских позиций. При этом, естественно, выявилось, что в действительности все процессы, описываемые тектоникой плит, протекают в более сложной форме, чем ею первоначально постулировалось. Но эти поправки все же не затрагивали главной идеи, заложенной в основу данной концепции. Исключение составила необходимость объяснения магматизма, проявляющегося внутри плит, которые рассматривались как внутренне монолитные.

ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ И МАНТИЙНЫЕ СТРУИ

Для объяснения внутриплитного магматизма середине 60-х годов была предложена дополнительная гипотеза горячих точек — мантийных струй. Суть этой гипотезы состоит в том, что внутриплитный магматизм обусловлен подъемом из глубин мантии разогретых струй (“плюмов”), как бы прожигающих, прошивающих литосферу и выраженных на поверхности горячими точками — вулканами. Эти струи, таким образом, не участвуют в конвективном круговороте вещества мантии. Многие полагают, что они поднимаются с огромных глубин — с границы мантии и ядра или нижней и верхней мантий. Исходным примером для данной гипотезы явился Гавайский вулканический архипелаг в Тихом океане и продолжающий его под некоторым углом к северу подводный Императорский хребет, подходящий к берегам Камчатки. Возраст вулканических построек вдоль этой цепи закономерно возрастает к северо-западу и северо-северо-западу от современного до позднемиоценового, а ее простираение отвечает направлению движения Тихоокеанской литосферной плиты. Такая картина

могла возникнуть при перемещении этой плиты над неподвижной мантийной струей. Позже были обнаружены и другие примеры, но оставался открытым вопрос о том, как взаимодействуют в мантии эти две системы — конвективная, ответственная за горизонтальное перемещение плит, и адвективная, ответственная за внутриплитный магматизм.

Тем не менее до конца 80-х годов теория тектоники плит практически полностью удовлетворяла запросы исследователей Земли. И лишь в последние годы все более отчетливым стало понимание того, что тектоника плит не может рассматриваться как полноценная, достаточно всеобъемлющая теория развития нашей планеты. Поэтому начались поиски такой модели этого развития.

ГЕОЛОГИЯ НА НОВОМ ПЕРЕЛОМЕ

Почему же тектоника плит, несмотря на свое экспериментальное подтверждение и успешное применение для расшифровки истории отдельных регионов и планеты в целом, перестала удовлетворять исследователей Земли? Дело в том, что была осознана ее изначальная ограниченность как в пространстве, так и во времени. Когда тектоника плит только создавалась, т.е. в 60-е годы, геологи и геофизики еще были убеждены, что эндогенная активность Земли не распространяется глубже верхов мантии (отсюда разрабатывавшийся в то десятилетие международный проект верхней мантии). Однако в дальнейшем выяснилось, что это было заблуждением, и к настоящему времени стало вполне очевидным, что “корни” тектонических и магматических процессов достигают ядра Земли и даже границы внешнего и внутреннего ядра. Данные сейсмического “просвечивания” Земли — сейсмической томографии — показали, что распределение более разогретых и менее разогретых областей в мантии вполне соответствует картине распределения литосферных плит и континентов и океанов лишь до глубин 300 — 400 км максимум, ниже эта картина существенно другая. А это означает, что названная глубина, отвечающая границе верхней и средней (ее еще называют переходной) мантии, является нижним пределом действия тектоники плит.

Ограниченным оказывается действие тектоники плит и в геологическом времени. Полный набор признаков, свидетельствующих о проявлении механизма тектоники плит, известен лишь начиная с границы среднего и позднего протерозоя (рифей), т.е. для последнего миллиарда лет. К этим признакам относится присутствие реликтов океанской коры — офиолитов — показателей спрединга, известково-щелочных магматитов и метаморфических пород низкой температуры — высокого давления — показателей субдукции. И хотя некоторые из этих признаков известны и для среднего — раннего протерозоя (1,0 — 2,5 млрд. лет назад), а отчасти и для архея (2,5 — 4,0 млрд. лет назад), все же довольно очевидно, что полномасштабная и сходная с современной тектоника плит действовала лишь начиная с позднего протерозоя.

Таким образом, тектоника плит — это тектоника самых верхних оболочек твердой Земли в течение последнего миллиарда лет ее существования. А вот тектоника мантийных струй — “плюм-тектоника”, вероятно, действовала уже на заре истории Земли.

ДВА ГЛАВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глубинная геодинамика

В последнее десятилетие определились два главных направления исследований в науках о Земле — глубинная геодинамика и ранняя история Земли. В задачу глубинной геодинамики входит изучение физических и химических процессов, протекающих в недрах Земли ниже уровня 400 км, т.е. границы собственно верхней мантии, образующей вместе с корой тектоносферу — основную область проявления тектоники плит. Для решения этой задачи в настоящее время применяются три метода: сейсмическая томография, экспериментальная минералогия и математическое моделирование. Применение двух из них стало возможным с появлением современных суперкомпьютеров, а эксперименты над минералами в условиях давлений и температур, господствующих в мантийных глубинах, — с созданием аппаратов, воспроизводящих эти термодинамические условия. Дополнительные материалы для суждения о том, что происходит с веществом на соответствующих глубинах, дают алмазоносные кимберлитовые трубки, которые, как недавно выяснилось, выносят минералы с этих глубин.

Основное внимание исследователей в наши дни приковано к двум глубинным уровням: границе на 670 км между нижней мантией и переходной зоной к верхней мантии и к границе на 2900 км между мантией и ядром, к так называемому слою D”, по общепринятой терминологии, впервые предложенной австралийским геофизиком К. Булленом. Некоторое внимание уделяется также границе на 400 (410) км между собственно верхней мантией и переходной к нижней мантии зоной (слой Голицына, названный так в честь основоположника русской сейсмологии). На всех этих границах наблюдается заметный скачок в изменении скорости распространения сейсмических волн, свидетельствующий о соответствующем изменении фазового состояния вещества, о смене одних минеральных видов с глубинной другими. На границе мантия—ядро происходит не только смена твердого состояния, характерного для мантии, жидким, характерным для внешнего ядра, но и замещение силикатов, слагающих мантию, железо-никелевым, с небольшой примесью некоторых других элементов, веществом ядра.

Менее ясно положение с границей на глубине 670 км. Очевидно, что это в основном фазовая граница, но существуют данные, свидетельствующие о том, что здесь может происходить и некоторое изменение химизма, в частности увеличение содержания железа с глубиной. Вопрос этот приобрел кардинальное значение. Дело в том, что в классической

тектонике плит принималось, что конвекция в мантии охватывает ее целиком. Между тем, если сведения об изменении химического состава на данной границе достоверны, конвекция должна протекать раздельно в нижней и верхней (включая переходную зону) мантии. Моделирование, в частности проведенное в нашей стране, показывает, что это вполне возможно, но прямые доказательства в данном случае дает сейсмотомография, которая стала главным инструментом глубинной геодинамики. Конкретно речь идет о том, пересекают ли эту границу погружающиеся вдоль зон субдукции холодные пластины океанской литосферы, которые характеризуются повышенными скоростями распространения сейсмических волн. Исследования, проведенные на нескольких участках таких зон, окружающих Тихий океан, не дали, однако, однозначного результата. Оказалось, что в одних случаях субдуцируемые плиты останавливаются на этой границе, загибаясь вдоль нее в направлении своего наклона; в других случаях пластины ее пересекают, испытывая различные изгибы и как бы встречая сопротивление; в третьих погружаются почти отвесно, достигая границы ядра. Наиболее правдоподобное объяснение этих сложностей, предложенное французскими и японскими исследователями, заключается в том, что данная граница “полупрозрачна”, субдуцируемый материал на ней задерживается на какое-то время (его определяют цифрой примерно в 500 млн. лет, значение которой см. ниже), и когда его накопление достигает некоторой критической массы, проваливается в нижнюю мантию и может достигать ядра.

Границе мантия—ядро придается исключительно важное значение: она рассматривается как базальный уровень зарождения мантийных струй — плюмов. Как показывают опять же данные сейсмотомографии, это справедливо на крайней мере для наиболее крупных из них, так называемых суперплюмов, проявляющихся на поверхности Земли не в виде горячих точек, а целых горячих полей, как их назвали Л.П. Зоненшайн и М.И. Кузьмин. Наиболее типичное такое поле известно в юго-западной части Тихого океана; сейсмотомография установила под ним область разуплотнения мантии вплоть до ее границы с ядром. Однако другие мантийные струи могут подниматься и с меньших глубин, в частности с границы 670 км, и питаться за счет накапливающегося здесь субдуцируемого материала, как предположил австралийский геохимик А. Рингвуд.

Происходящие в слое D” процессы некоторые исследователи привлекают для объяснения такого замечательного явления, как периодические инверсии магнитного поля Земли, выражающиеся в быстрой смене магнитных полюсов на полюсы противоположного знака. Обнаружена определенная корреляция между частотой таких инверсий и активностью мантийных струй — эпохи появления суперплюмов отвечают эпохам спокойного магнитного поля, т.е. отсутствия инверсий, подобно середине мелового периода.

Ранняя история Земли

На втором главном направлении современных исследований — изучении ранней истории Земли — в последние годы также достигнуты существенные успехи, хотя далеко не все вопросы могут считаться решенными. Эти успехи выражаются прежде всего в охвате геологическими исследованиями практически всех основных регионов распространения раннедокембрийских пород, так называемых щитов древних платформ. В этих исследованиях основное внимание уделено определению абсолютного возраста горных пород радиоизотопными методами. В настоящее время достигнута поразительная точность — первые миллионы лет для пород с возрастом более трех миллиардов лет.

Однако возраст древнейших пород, сохранившихся на поверхности Земли, не превышает 4,0 млрд. лет, а возраст переотложенных в более молодых породах зерен циркона, обнаруженных в Австралии, составляет 4,2 — 4,3 млрд. лет. Иначе говоря, первые 300 и даже 600 миллионов лет существования Земли остаются недокументированными. Тем не менее высказываются предположения, что первоначально, когда Земля еще была сильно разогрета, на или близ ее поверхности существовал “магматический океан”, в результате застывания которого образовалась первичная базальтовая или близкая по составу кора Земли. Примерно одновременно за счет конденсации водяных паров, окутывавших Землю, образовалась ее водная оболочка — гидросфера. Повторное плавление этой коры либо под влиянием мантийных струй, либо в первых зонах субдукции привело к возникновению островов континентальной, вернее, протоконтинентальной коры, сложенной натровыми гранитоидами, превращенными в гнейсы. Это так называемые “серые гнейсы”, распространенные на всех древних щитах. Именно по ним получены самые древние возрастные определения — 4,0 — 3,2 млрд. лет. В среднем и вполне определенно в позднем архее, т.е. после 3,5 млрд. лет активно развивались вулканические дуги, сформированные на первичной, остаточной или вторичной, новообразованной при растяжении океанской коре над зонами субдукции. Эти дуги последовательно примыкали к древним “серогнейсовым” ядрам, наращивая их. Таким образом, к концу архея, т.е. 2,7 — 2,5 млрд. лет назад, возникли уже значительные площади континентальной коры, которые, вероятно, слились в единый суперконтинент, первую Пангею в истории Земли. Мощность этой коры достигла нормальной для современных континентов мощности в 35 — 40 км, низы ее под влиянием высоких давления и температуры испытали значительный метаморфизм, а на средних уровнях произошло выплавление больших масс гранитов, теперь уже содержащих больше окисла калия, чем натрия.

В начале протерозоя (2,5 млрд. лет назад) произошла крупная перестройка структурного плана Земли. Возникший в конце архея суперконтинент — первая Пангея — претерпел деструкцию и

к 2,3 – 2,2 млрд. лет распался на отдельные, относительно небольшие континенты, разделенные бассейнами с новообразованной океанской корой. Соответственно раннепротерозойская тектоника может быть названа, вслед за канадским геологом А. Гудвином, тектоникой малых плит, в то время как позднеархейская тектоника – эмбриональной тектоникой плит. К концу раннего протерозоя (около 1,7 млрд. лет) континенты вновь спаялись в единый суперконтинент; образовалась новая Пангея. Распад этой Пангеи начался после 1,0 млрд. лет, хотя частичная ее деструкция и восстановление могли иметь место и в промежутке между 1,7 и 1,0 млрд. лет. В интервале 1,0 – 0,6 млрд. лет структурный план земной коры претерпел радикальные изменения и существенно приблизился к современному; с этого времени, как отмечалось, вступила в действие полномасштабная тектоника плит. Возник Тихий океан, наместились прообразы современных Северной Атлантики и будущего широтного океана Тетис, разделившего континенты на северную и южную группы. Но к концу палеозойской эры все континенты вновь спаялись в единый суперматерик; это и есть вегенеровская Пангея.

Таким образом, в истории Земли, как теперь выяснилось, неоднократно происходило формирование и затем распад Пангеи. Длительность таких циклов составляет 500 – 600 млн. лет, т.е. отвечает времени смены двухъярусной конвекции общемантийной (см. выше). Но на эту крупномасштабную периодичность изменения конвективного режима земных недр накладывается периодичность меньших порядков, проявляющаяся в усилении или ослаблении противоположно направленных тенденций: растяжения коры – рифтогенеза и ее сжатия – орогенеза. Связано это, очевидно, с периодическим усилением и ослаблением тепловыделения из недр Земли, что, в свою очередь, должно было отражаться на некотором изменении радиуса Земли. Следовательно, постулат классической тектоники плит о неизменности объема Земли вследствие автоматической компенсации спрединга субдукцией может быть принят лишь в самой общей форме, а в действительности Земля может претерпевать некоторую пульсацию своего объема. Мало того, поскольку наша планета несомненно испытывает вековое охлаждение, растрачивая запасенное при своем образовании и выделяемое естественно радиоактивными элементами тепло, должна проявляться общая тенденция уменьшения ее радиуса.

В ПОИСКАХ НОВОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

Итак, тектоника плит, сохраняя свое значение в качестве основного инструмента анализа истории тектонических движений, деформаций и магматизма, становится лишь частным элементом более общей теории Земли, глобальной геодинамической модели, контуры которой начинают все более явственно намечаться. Эта модель должна учитывать многооблачное строение Земли и, с одной стороны, автономность протекающих в каждой из обо-

лочек процессов, а с другой стороны, их взаимодействие, которое может носить переменный характер. Должно быть признано равноправие, в объеме всей Земли, конвективного и адвективного (плюм-тектоника) тепломассопереноса. Модель должна также учитывать существование многопорядковой периодичности в изменении эндогенной активности Земли наряду с проявлением общей тенденции снижения этой активности в связи с исчерпанием запасов внутреннего тепла. Иначе говоря, модель должна иметь временную, историческую компоненту, а не только отражать сиюминутную динамику. Наконец Земля в ней должна рассматриваться как открытая система, подверженная влиянию процессов, протекающих в околоземном космическом пространстве.

Работа над созданием глобальной геодинамической модели, отвечающей перечисленным критериям, уже активно ведется как в нашей стране, так и за рубежом. На данный момент в этом направлении больше всего преуспели наши японские коллеги, судя по опубликованной ими серии статей в юбилейном, сотом номере Журнала Японского Геологического Общества за 1994 год. Основные положения предложенной ими геодинамической модели таковы.

В Земле выделяется по характеру господствующих геодинамических процессов три главных области (рис. 2): тектоносфера, охватывающая кору и верхнюю мантию с переходной зоной, нижняя мантия и ядро. В тектоносфере господствует тектоника плит, в нижней мантии – плюм-тектоника мантийных струй и в ядре – “тектоника роста”, выражающаяся в разрастании внутреннего ядра за счет внешнего. В связи с тем, что Земля, находясь в холодном космическом пространстве, охлаждается сверху, первотолчком в геодинамических процессах служит погружение в зонах субдукции пластин охлажденной океанской литосферы. Достигнув границы на глубине 670 км, эти пластины здесь задерживаются, пока материала не накопится столько, что он начнет “проваливаться” в нижнюю мантию, достигая в конечном счете поверхности ядра. Внедрение этого материала в ядро нарушает проявляющийся в нем режим конвекции и вызывает подъем мантийных струй – плюмов от границы ядра. Достигнув уровня 670 км, эти плюмы расщепляются (рис. 3), проникая далее в верхнюю мантию и порождая здесь восходящие течения, над которыми образуются оси спрединга срединноокеанских хребтов (в дальнейшем они могут отклоняться от породивших их плюмов). Так совершается, согласно японской модели, переход от плюм-тектоники к тектонике плит (плейт-тектонике).

В историческом аспекте, в соответствии с той же моделью, развитие Земли, как и других планет, началось с “тектоники роста”, т.е. с образования ядра (рис. 4). Оно продолжалось временем господства плюм-тектоники, которая уже в архее начала сменяться в верхних оболочках Земли плейт-тектоникой. Подобная смена, вероятно, наблюдается в настоящее время на Венере. Марс, по мнению

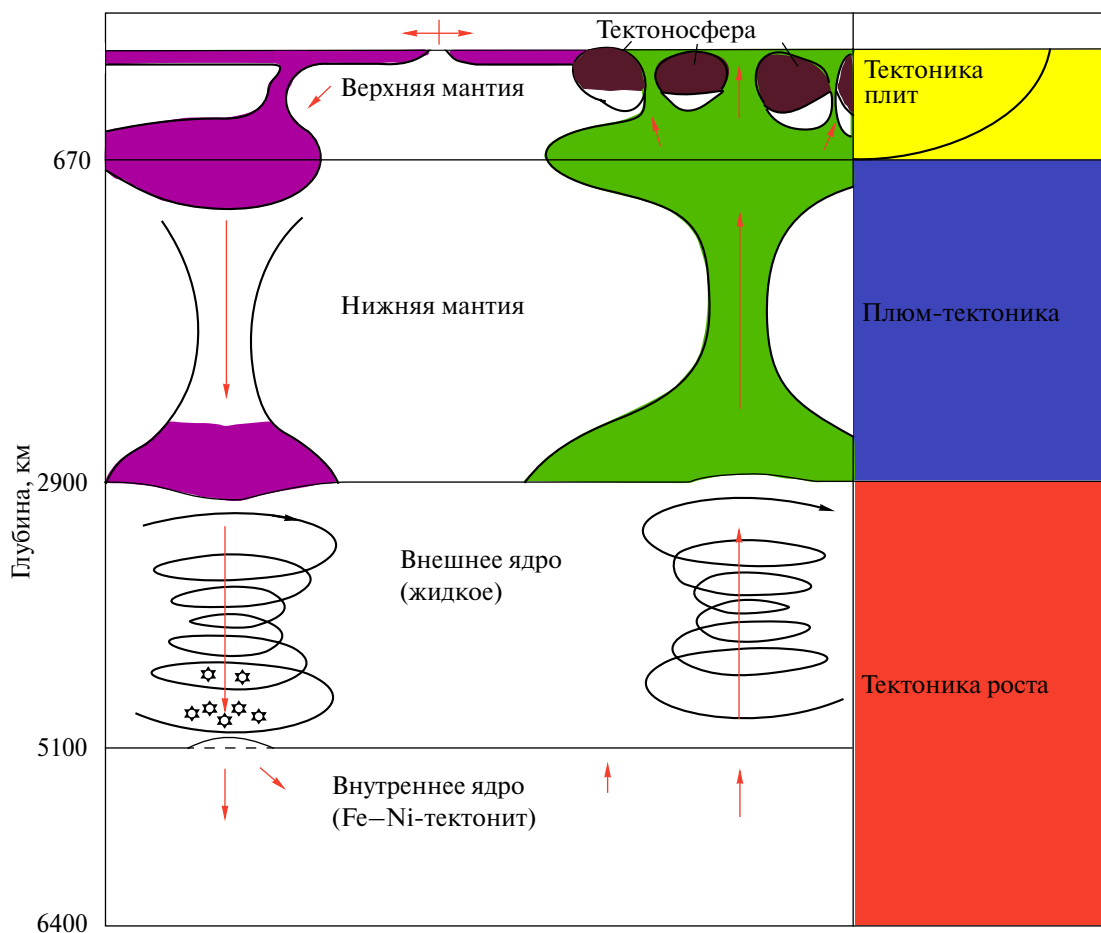


Рис. 2. Схема глобальной тектоники (по С. Маруяма и др., 1994). Выделяются три главные геосферы с различно протекающими в них процессами: ядро, нижняя мантия и верхняя мантия с корой, объединяемая в тектоносферу. Стрелками показано движение вещества.

японских исследователей, уже миновал стадию плейт-тектоники и вступил в стадию общего сжатия литосферы, а Меркурий и Луна почти полностью утратили глубинную активность и на них господствуют экзогенные, вызванные внешними воздействиями процессы.

Кратко пересказанная выше концепция японских ученых о развитии Земли несомненно является сегодня наиболее прогрессивной, учитывающей новейшие достижения наук о Земле и сравнительной планетологии. Естественно, однако, что она не лишена недостатков. Главным из них, имеющим методологическое значение, представляется недооценка влияния на земные, не только поверхностные, но и глубинные процессы, космического фактора, обусловленного перемещением Земли и всей Солнечной системы по галактической орбите и ее периодическим пересечением скоплений космической пыли. Попытки учесть этот фактор уже предприняты в отечественной науке.

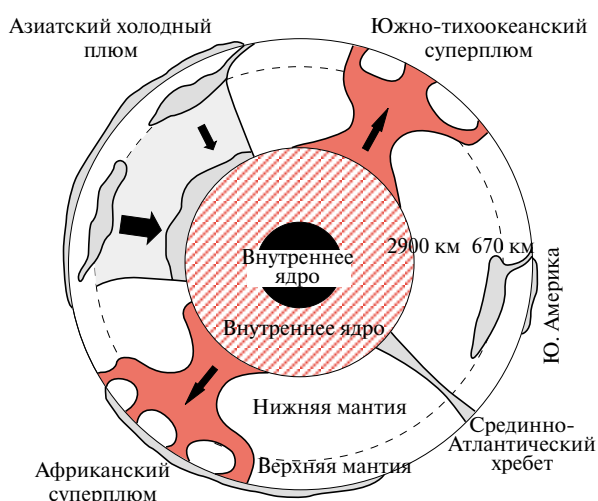
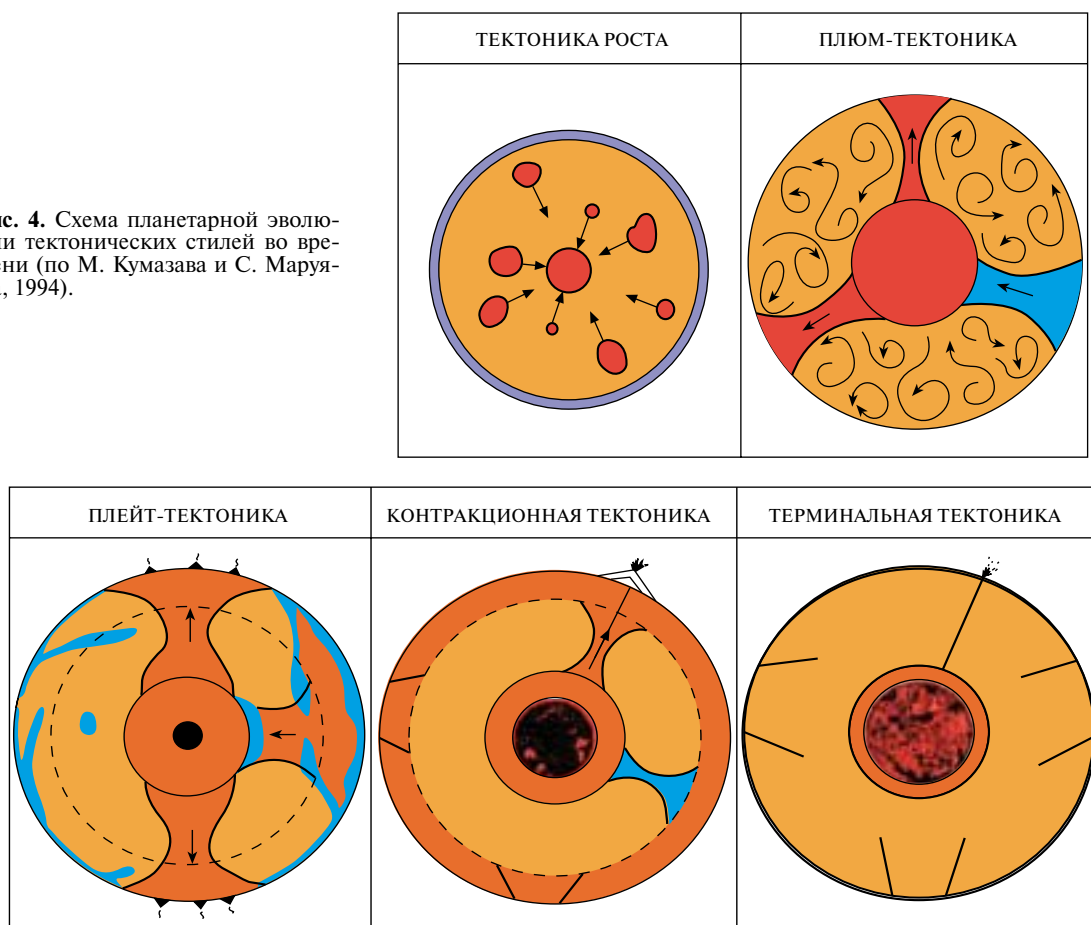


Рис. 3. Модель основного теплопереноса в современной Земле (по С. Маруяма и др., 1994)

Рис. 4. Схема планетарной эволюции тектонических стилей во времени (по М. Кумазава и С. Маруяма, 1994).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная геология, поставившая целью выяснение закономерностей строения и развития нашей планеты, возникла в конце 18-го – начале 19-го века и с тех пор прошла большой и сложный путь. Первые объяснения движений и деформаций земной коры отдавали предпочтение ее вертикальным перемещениям; это направление получило название фиксизма. Попытки его пересмотреть в десятилетия – двадцатые годы нашего века и заменить мобилизмом – признанием возможности крупных, тысячекилометровых перемещений пластин и блоков коры, т.е. мобилизмом, потерпели неудачу. Однако получение новых данных геофизики и изучения океанов привели в 60-е годы к торжеству мобилизма и появлению в геологии первой научной теории – тектоники литосферных плит. На ее основе геоло-

гия успешно развивалась в 70-е – 80-е годы, но затем была осознана ограниченность этой теории и начались поиски новой, более универсальной модели. Такая модель недавно предложена японскими учеными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуцаровский Ю.М. Парадигмы в геологии. // Природа. 1995. № 1. С. 33 – 42.
2. Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. М.: Наука, 1994.
3. Хаин В.Е. Два главных направления в современных науках о Земле: ранняя история Земли и глубинная геодинамика. // Вестн. Моск. ун-та, геол. 1993. № 6. С 3 – 20.
4. Хаин В.Е. От тектоники плит к глубинной геодинамике. // Природа. 1995. № 1. С. 45 – 51.