

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# **ОБЩАЯ ГЕОДИНАМИКА**

Учебное пособие

Составители:  
В. М. Ненахов,  
С. В. Бондаренко,  
Г. С. Золотарева

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. КАТЕГОРИИ ГЕОДИНАМИКИ (основные термины и понятия)....	5
2. ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ: ВЗАИМОУСЛОВЛЕННОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СЛЕДСТВИЯ .....	8
3. ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ ..	15
3.1. Тектоника раннего докембрия, механизм возникновения гранит-зеленокаменных областей (ГЗКО) .....	15
3.2. Тессеры Венеры как прообраз архейских протоконтинентов ..	20
3.3. Модель формирования гранит-зеленокаменных областей .....	25
3.4. Эволюция геодинамических процессов .....	30
4. ЦИКЛ УИЛСОНА КАК МОДЕЛЬ ПЛИТНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА...	36
4.1. Обстановки горячих точек .....	36
4.2. Обстановки континентальных рифтов .....	38
4.3. Межконтинентальный рифтогенез .....	41
4.4. Стадия зрелого океана .....	41
4.4.1. Обстановки океанских рифтов (срединно-океанических хребтов) .....	42
4.4.2. Обстановки пассивных континентальных окраин.....	45
4.4.3. Обстановки зон трансформных разломов.....	46
4.5. Стадия субдукции.....	47
4.5.1. Механизм корово-мантийного взаимодействия .....	53
4.6. Обстановки зон коллизии.....	56
4.6.1. Геодинамические обстановки орогенных областей.....	60
5. РЕПЕРНЫЕ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ....	62
5.1. Обстановки осадконакопления и важнейшие индекс-осадки...	62
5.2. Магматические породы.....	70
5.2.1. Вулканогенные образования.....	71
5.2.2. Интрузивные образования.....	75
5.2.3. Офиолиты.....	80
5.3. Структурные ансамбли.....	86
5.3.1. Микститы.....	87
5.4. Метаморфические комплексы.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
ЛИТЕРАТУРА.....	96

ханизмами плюмового и плитного тектогенеза, охватывающего длительный период времени от хадия до неоархея и менее интенсивно продолжающегося по настоящее время.

*Недеплетированной (примитивной)* мантией называется мантия, в которой содержание некогерентных элементов отвечает первичному их распределению, так как сепарации не подвергалась.

*Обогащенная мантия* — содержание некогерентных элементов аномально высокое. Следует подчеркнуть, что в зарубежной и отечественной литературе часто эти понятия (обогащенная и недеплетированная) используются как синонимы, что в корне не верно, так как в обогащенной — уровень некогерентных элементов в разы, а иногда на порядок выше. Области аномального обогащения встречаются среди деплетированного мантийного субстрата и связываются с «отмершими» зонами субдукции.

*Некогерентные элементы* — это элементы, которые не изоморфируют или ограниченно изоморфируют с ведущими пороодообразующими элементами: Si, Mg, Al, Fe, K, Na, Ca.

Выделяются две группы некогерентных элементов: первая включает элементы, которые отличаются от пороодообразующих очень большим или очень малым ионным радиусом (Li, Be, Rb, Cs), а вторая характеризуется большим количеством элементов на верхней оболочке (такие как большезарядные ионы — Ta, Nb, Te, Re и др.).

Некогерентные элементы в процессе дифференциации магматического расплава всегда накапливаются в остаточном расплаве (пегматиты), а при частичном плавлении первыми переходят в фазу ликвидуса. Это их свойство используется для модельных петрогенетических и геодинамических построений.

*Частичное (селективное) плавление* — переход из твердой фазы в жидкую определенной части исходного субстрата, подвергшегося плавлению, измеряемой в процентах (чем выше селективность, тем меньше процент плавления), тем сильнее отличается состав выплавки от состава исходного материала, как правило, эти выплавки более кислые, с увеличением объема плавления выплавки становятся более основными (антидромный магматизм).

### Понятие о магматических сериях

*Магматические серии* — закономерные ассоциации горных пород, сформированные в различных геодинамических обстановках.

*Магматический комплекс* — это региональное выражение магматической серии, или геологические тела, сложенные горными породами одной магматической серии, проявленной в регионе в результате одного геодинамического процесса.

Серии делятся по характеру распределения ведущих разновидностей горных пород на бимодальные и унимодальные, по петрохимической принадлежности — на щелочные, субщелочные, щелочно-известковые, известковые.

Унимодальные магматические серии характерны для конвергентных границ, охватывают широкий диапазон пород (от основных до кислых),

характеризуются однопиковым типом их распространения, с пиком, приходящимся на средние разновидности.

Бимодальные серии характерны для дивергентных границ и внутриплитных обстановок. Это ассоциации горных пород, характеризующиеся двухпиковым типом распределения, один из которых соответствует основным, а второй — кислым породам, при этом средние породы не характерны.

### **Магматизм и типы термальных режимов**

Эволюция магматизма всегда носит направленный характер, и в этом плане выделяют:

- 1) гомодромный (смена более основных пород более кислыми),
- 2) антидромный (обратная последовательность),
- 3) мультиплетный (многократная смена векторов теплового режима)

тренды. Перечисленные тренды четко увязывают с определенными этапами плюмового режима большинства геодинамических обстановок. Гомодромный магматический тренд увязывается с деградацией теплового режима, антидромный — с прогрессирующим тепловым потоком, а мультиплетный — с пульсационным. В природе все три тренда проявляются достаточно широко, но на практике наиболее представительным является гомодромный, так как на завершающей стадии любого тектонического процесса характерна деградация теплового потока, а ранее проявленные тренды затушевываются.

### **Понятие о диапирах**

*Диапиры* — это тела разуплотненных горных пород, протыкающих (или прорывающих) снизу и деформирующих вышележащие слои: холодные диапиры — солевые, глинистые; горячие характерны для мантии, могут иметь разную принадлежность, с одной стороны, как форма проявления мантийных плюмов, с другой — как всплывающие гигантские каплеобразные восходящие структуры над зоной субдукции. Часто мантийные диапиры и плюмы неправильно отождествляются!

### **Понятие о простых и сложных геодинамических обстановках**

Деление обстановок на простые и сложные достаточно условное. Под простыми обстановками следует понимать обстановки, отвечающие определенному этапу цикла Уилсона, хотя в любой из них можно выделить сосуществующие более локальные обстановки с различными геодинамическими режимами. Например, в субдукционной обстановке могут сосуществовать условия сжатия (аккреции) и растяжения (тыловые части энсиалических дуг), магмагенерация чисто мантийного происхождения (задуговой бассейн) и корово-мантийного взаимодействия (магматическая дуга).

Простые возникают либо на границах конвергенции, либо дивергенции, но встречаются случаи, когда совмещены процессы дивергенции и конвергенции (Калифорнийский залив, где СОХ накладывается на субдукцию), дивергенции и плюма (Исландия), конвергенции и плюма (Йеллоустон).

## 2. ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ: ВЗАИМООБУСЛОВЛЕННОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СЛЕДСТВИЯ

Данные сейсмической томографии, детально рисующие трехмерное строение глубоких недр Земли; результаты экспериментов при сверхвысоких давлениях, способствующих лучшему пониманию состава и свойств вещества и возможного характера конвекции в мантии Земли; компьютерное моделирование геодинамических процессов; успехи региональной геологии континентов и океанов, освещение древнейшей истории Земли, успехи сравнительной планетологии, достигнутые в результате применения дистанционных методов и прямого исследования ближайших небесных тел, создали предпосылки для построения новой, глобальной геодинамической модели.

Современную Землю, с точки зрения стиля протекающих в ней геодинамических процессов, разделяют на три главные области: кору и верхнюю мантию, составляющие *тектоносферу*, где господствует *тектоника плит*; нижнюю мантию — область проявления тектоники мантийных струй, т. е. *плюмтектоники*; ядро с прогрессирующим разрастанием твердого, чисто железоникелевого внутреннего (центрального) ядра за счет внешнего, жидкого, что именуется *тектоникой роста*.

Ведущее значение в тектонике плит придается погружению холодных литосферных пластин в зонах субдукции, что рассматривается как естественное следствие существования Земли в холодном космическом пространстве и, очевидно, ее векового охлаждения. Холодные пластины погружаются первоначально до границы верхней и нижней мантии на 670 км и здесь какое-то время, от 100 до 400 млн лет, находятся в состоянии стагнации, пока наступает катастрофический гравитационный коллапс, вызывающий погружение пластины уже до границы мантии и ядра. Этому коллапсу способствует эндотермическая природа фазового перехода на границе 670 км. Наступающее из-за коллапса взаимодействие холодной пластины с внешним ядром имеет два важных следствия. С одной стороны, оно вызывает охлаждение внешнего ядра и порождает в нем нисходящий вихрь, уносящий железо и никель во внутреннее ядро, которое благодаря этому испытывает разрастание, с другой стороны, оно провоцирует возникновение компенсационного восходящего течения на границе ядро — мантия, которое порождает плюм, достигающий границы нижней и верхней мантий, и здесь, так же как и холодный плюм, испытывает задержку, а затем прорывается вверх. В современной картине Земли (рис. 2.1) различают один крупный нисходящий холодный суперплюм под Центральной Азией и два восходящих суперплюма — под южным Тихим океаном и под Африкой. Таким образом, в нижней мантии, а фактически и в переходной зоне к верхней мантии, навстречу друг другу на определенном расстоянии

движутся колонны охлажденного и разогретого вещества, т. е. конвекция реализуется в форме адвекции.

Мощные восходящие суперплюмы служат причиной раскола и деструкции суперконтинентов и образования вторичных океанов между их фрагментами, в то время как под суперконтинентами, окруженными зонами субдукции, возникают воронкообразные формы.

Спрединговые хребты первоначально (Срединно-Атлантический хребет) располагаются непосредственно над плюмом, поднимающимся с границы мантия — ядро. С возникновением же зон субдукции по краям океана (Индийский, Тихий океан) оси спрединга утрачивают эту зависимость. Таковы основные черты спрединговой модели, предлагаемой японскими учеными для современной Земли. Модель отражает современное развитие Земли и то, что в ее длительной истории характер и относительное значение различных геодинамических процессов испытывали существенные изменения.

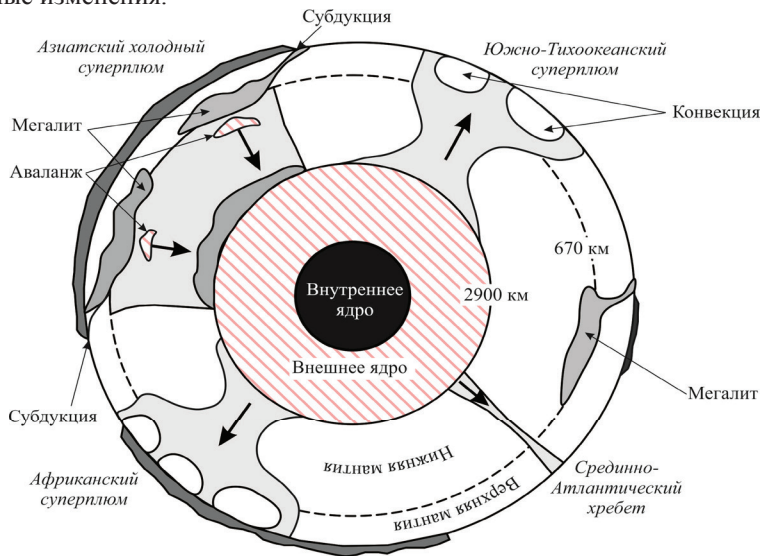


Рис. 2.1. Модель основной материальной и тепловой конвекции Земли (В. Е. Хаин, 1995)

Предполагается, что Земля начала расслаиваться на оболочки уже на стадии аккреции. Когда Земля достигла таких размеров, что смогла удерживать первичную атмосферу, образованную газами, выделяющимися при соударении планетоземалей, начался ее разогрев под влиянием тех же соударений и выделения гравитационной энергии. Этот разогрев привел к образованию магматического океана, на дно которого начали осаждаться пузыри расплавленного железа, создавая железный

слой в основании этого океана. Достигнув критической толщины, слой этот поменялся местами с подстилающим его хондритовым материалом (из-за инверсии плотностей), что и привело к образованию расплавленного железного ядра в центре планеты. Процесс этот сопровождался мощным выделением гравитационной энергии, что способствовало наращиванию магматического океана. В самом же ядре под влиянием охлаждения и возрастания давления началось осаждение железоникелевых кристаллов, из которых и сформировалось внутреннее ядро.

С замедлением процесса аккреции и роста Земли уход тепла в окружающее пространство стал превышать аккреционный разогрев и началось охлаждение магматического океана, которое и могло привести к его расслоению на две оболочки: нижнюю, на глубине 400—700 км, состоящую из оливина и пироксенов, т. е. ультрамафитовую, и верхнюю, базальтового состава. Последняя и дала начало литосфере.

По этой модели стратифицированная структура Земли возникла почти одновременно с ее аккреционным образованием, в течение не более 100 млн лет. Этот период именуют *периодом роста*. Кратко пересказанная выше интерпретация последовательности событий этого периода представляет один из наиболее оригинальных элементов концепции японских исследователей.

В течение этой самой ранней стадии развития Земли в ее недрах преобладала хаотическая конвекция (турбулентность). Постепенно, по мере ослабления турбулентности, она переросла в более упорядоченную с восходящими и нисходящими колоннами разогретого или охлажденного вещества. Так совершился переход к *плюмтектонике* первоначально (примерно до 4 млрд лет) из-за отсутствия литосферы, господствовавшей во всем объеме от границы ядра до поверхности Земли. С появлением в начале архея литосферы, ее дальнейшим разрастанием и с обособлением астеносферы верхняя мантия и кора стали областью совместного проявления плюм- и плейттектоники, в то время как в нижней мантии сохранилось господство плюмтектоники.

На основании материалов по юго-западной части Гренландии, допускается, что действие плейттектонического механизма началось уже 3,9 млрд лет назад, но при этом справедливо указывают на определенные отличия архейской тектоники плит от более поздней: плиты были более тонкими, менее жесткими (из-за повышенной температуры), быстрее погружались, проникая лишь на относительно небольшую глубину, так как высокая температура препятствовала переходу базальта в эклогит и оливина перидотитов в шпинель. Такую тектонику плит именуют **кожной тектоникой**, или **доплитной тектоникой** (австралийский ученый Г. Ф. Дэвис). По мере понижения мантийных температур и в результате охлаждающего влияния народившегося Мирового океана становится возможным и переход базальта в эклогит, и оливина перидотитов в шпинель, что резко снизит плавучесть субдуцируемой плиты и позволит ей, наконец,