

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ МЕЗОЗОЯ И КАЙНОЗОЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ИХ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ

© 2018 г. В. Г. Трифонов¹, *, С. Ю. Соколов¹

¹Геологический институт РАН, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 7

*e-mail: trifonov@ginras.ru

Поступила в редакцию 24.11.2017 г.

Обсуждаются два глубинных источника тектонических процессов позднего мезозоя и кайнозоя, воздействие которых изменяется и усиливается на поверхности твердой Земли — в земной коре. Первый источник — общемантийная конвекция. Ее восходящие ветви образованы общемантийными суперплюмами. От них распространяются верхнемантийные латеральные потоки. Нисходящие ветви конвекции образованы отслоенными высоко-метаморфизованными фрагментами утолщенной континентальной литосферы и частью субдущированных слэбов, погружающейся ниже переходного слоя мантии (~410–680 км), тогда как большинство слэбов трансформируется в субгоризонтальные линзы на уровне переходного слоя, участвуя в верхнемантийной конвекции. Последняя, вместе с общемантийной конвекцией, обуславливает плейт-тектонические процессы, а также разуплотнение литосферы, приводящее к усилению поднятий в эпоху новейшего горообразования. Второй источник — течения во внешнем ядре Земли, отражающиеся в инверсиях магнитного поля, которые учащаются в течение большинства фаз складчатости (фазы усиления деформаций сжатия и транспрессии) или перед ними. Частота фаз возрастает в неотектонический орогенный этап. Предполагается, что течения в ядре Земли изменяют ее фигуру вращения, что приводит к появлению объемных сил, воздействие которых геологически почти мгновенно. Тем самым, течения в ядре способствуют глобальности проявлений фаз складчатости и синхронности наложения главной стадии новейшего горообразования на плейт-тектонические процессы.

Ключевые слова: общемантийная и верхнемантийная конвекция, корреляция фаз складчатости и магнитных инверсий, глобальная синхронность этапов горообразования

DOI: 10.1134/S0016853X18050077

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемой статье выделен ряд тектонических явлений, характерных для развития Земли в позднем мезозое (с поздней юры) и кайнозое, и делается попытка установить их причины вплоть до построения глобальной модели геодинамических процессов, определяющих образование и развитие выявленных тектонических структур. Представления о тектонических явлениях и их последовательности, запечатленных в тектонических структурах, формируются на основе геологических наблюдений, т.е. результатах изучения природных объектов путем визуальных наблюдений, с помощью различных приборов и аналитических приемов и лабораторного моделирования. Дальнейшие исследования направлены на установление причинно-следственных связей между тектоническими явлениями, позволяющих более или менее уверенно определять и характеризовать процессы, обуславливающие образование и развитие все более обширных совокупностей тектонических явлений. В этой цепи исследований приходится сталкиваться с рядом трудностей.

Осмысление результатов геологических наблюдений как отражения природных явлений — всегда интерпретация. При визуальном изучении геологических объектов возможны ошибки интерпретации, обусловленные факторами как объективными, например, условиями обнаженности, так и субъективными, включая теоретические предпочтения исследователя. При интерпретации результатов геофизических наблюдений ошибки могут быть связаны с расширительным толкованием полученных данных: недоучетом некорrekтностей при решении обратных задач геофизики, погрешностями в выборе модели среды, пропуске слабых аномалий из-за сильных помех, восприятии таких помех как полезного сигнала и других, порой трудно учитываемых факторов.

При обобщении и сопоставлении результатов наблюдений возможны ошибки интерпретации, обусловленные конвергенцией признаков явлений разного типа или, напротив, дивергенцией признаков явлений одной группы. Пример источника ошибок, связанных с конвергенцией — петролого-геохимическое сходство позднемео-

цен-четвертичных вулканических образований Армянского нагорья с продуктами вулканизма энсиалических островных дуг, хотя признаков субдукции на Армянском нагорье в позднем кайнозое нет. Геохимическая близость продуктов вулканизма отражает сходство материала магматических очагов, вероятно, обусловленного тем, что в позднем кайнозое плавлению подвергаются сохранившиеся в литосфере реликты слэбов Мезотетиса.

Пример дивергенции признаков явлений одной группы — отсутствие островодужного вулканизма в тылу Кипрской островной дуги. Оно обусловлено низкой скоростью субдукции и косым направлением погружения субдуцируемой плиты (преобладанием продольного левого сдвига) в большей восточной части дуги. В итоге, погружающийся материал теряет способность участвовать в генерации магматических очагов на необходимых глубинах. Дивергенция такого рода, т.е. разнообразие второстепенных признаков при неизменном наличии главного признака явления (в данном случае мантийной сейсмофокальной зоны) позволяет дифференцировать группу сходных тектонических явлений.

Тектонические явления отражают связи между сложными, а не элементарными единицами среды. Поэтому обоснование нового явления или отождествление результатов наблюдений с известным явлением — это выбор варианта и его характеристик, которые представляются наиболее вероятными с позиций согласованности результата с его положением в общей структуре и последовательности событий. Многократность наблюдений сходных ситуаций позволяет выработать систему признаков явления, присутствие которых повышает вероятность интерпретации. Вполне удовлетворительным считается отождествление множества результатов наблюдений с тем или иным явлением, если его признаки присутствуют у 80% изученных однотипных объектов. При вероятностном характере таких оценок обобщение, основанное на сопоставлении тектонических явлений, т.е. первая производная от результатов наблюдений, будет справедливо с вероятностью 64%. Более широкое обобщение, основанное на ряде первых производных, или геодинамическая модель, объясняющая их совокупность, будут справедливы лишь с вероятностью не более 51%. Поэтому любые модельные построения, основанные на длинных рядах последовательных обобщений, оказываются сомнительными. В данной статье авторы делают попытку максимально сократить ряды последовательных обобщений, но отдают себе отчет в том, что итоговые модели остаются гипотетическими.

ОБСУЖДАЕМЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Перечислены некоторые важные тектонические явления, установленные или получившие существенное подтверждение в последние десятилетия и обсуждаемые на предмет их обусловленности геодинамическими процессами.

- Латеральные движения литосферных плит, установленные палеогеографическими и палеотектоническими реконструкциями и данными космической геодезии.

- Спрединг океанской литосферы, выявленный путем интерпретации полосовых магнитных аномалий. Установлено, что во многих океанических бассейнах зоны спрединга развиваются из рифтовых зон, возникших при раздвигании континентальной литосферы. Разработана система геологических и петролого-геохимических индикаторов зон спрединга и порождаемой им океанской литосферы, позволяющая выделять их палеоаналоги.

- Субдукция океанской или субокеанской литосферы под литосферу океанского или континентального типа. Главным признаком современных зон субдукции является наличие мантийной сейсмофокальной зоны, которая более или менее круто наклонена от субдуцирующей плиты. Сопутствующие признаки современных зон субдукции (характерная продольная тектоническая зональность, специфический магматизм) позволяют выделять их палеоаналоги, хотя конвергенция признаков может иногда быть источником ошибочной интерпретации.

- Коллизия плит и блоков континентальной литосферы, вызывающая синколлизийный магматизм и складчато-надвиговые деформации сжатия. Эти деформации приводят к утолщению земной коры и возникновению субаэральных поднятий умеренной высоты и аккумуляции во впадинах относительно тонкообломочных продуктов их разрушения (нижняя моласса) [21, 22]. Сопутствующие признаки позволяют выделять палеоаналоги коллизионных поясов.

- Тектоническая расслоенность литосферы — тектоническое явление, при котором разные слои литосферы характеризуются разной подвижностью и деформируются по-разному вплоть до различий в направлениях тектонических перемещений. Из-за этого возникают срывы на границах слоев литосферы. В общем виде тектоническая расслоенность проявляется в автономности деформаций верхней части коры по отношению к литосферной мантии, причем нижняя, а местами и средняя части коры выступают в роли подвижного слоя пониженной вязкости, что аналогично роли астеносферы по отношению к литосфере в целом. В отдельных складчатых областях, в зависимости от физических свойств деформируемых

пород, тектоническая расслоенность может быть более сложной и многообразной.

- Диффузный (рассеянный) характер границ плит, впервые отмеченный в работе [33] и проявляющийся в субдукционных и коллизионных условиях. Так, в области сочленения Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской плит на северо-востоке Азии мантийная сейсмофокальная зона является главным рубежом Тихоокеанской плиты, но пограничные структуры между Евразийской и Северо-Американской плитами теряются в широком поясе деформаций, охватывающем Курило-Камчатскую островную дугу и задуговой прогиб Охотского моря [39]. Что же касается современной коллизионной границы Евразийской плиты с плитами гондванского ряда, Африканской, Аравийской и Индийской, то ее представляет пояс деформаций шириной в сотни километров. Внутри пояса выделяются относительно слабо деформированные области (микроплиты, нередко оказывающиеся фрагментами ранее консолидированной земной коры), и зоны концентрации деформаций. Таких зон, отмеченных максимальными скоростями относительных перемещений, может быть несколько, и далеко не всегда они соответствуют сутурам закрывшегося океана Тетис. Аналогично построены и другие подвижные пояса на границах континентальных частей литосферных плит, развивающиеся в условиях поперечного или косоугольного горизонтального сжатия, независимо от того, возникли они на месте пост-океанических сутур альпийского или более древних тектонических циклов.

- Переход зон субдукции в субгоризонтальные линзы, распространяющиеся от субдуцирующей плиты на уровне переходного слоя мантии и названные стагнирующими слэбами [32], или большими мантийными клиньями [36].

- Позднекайнозойские поднятия, превышающие величину подъема, обусловленного коллизионным сжатием, и приводящие к формированию высоких гор и грубой верхней молассы.

- Мантийные суперплюмы — восходящие от низов мантии к литосфере объемы вещества с пониженными скоростями сейсмических волн, пониженной вязкостью и, вероятно, повышенной температурой.

- Фазы складчатости (тектонические фазы) — эпохи усиления деформаций горизонтального укорочения и транспрессии в коллизионных и субдукционных поясах альпийского цикла и обновленных более древних подвижных поясах, подвергшихся поперечному или косому сжатию. Продолжительность фаз составляет 1–6 млн лет, в течение длительных фаз выделяются пики наибольших деформаций.

- Циклы Бертрана (байкальский, каледонский, герцинский и альпийский) — выделенные в

конце протерозоя и фанерозое длительные (от 120 до 280 млн лет) глобальные эпохи, завершающиеся орогенными этапами, которые характеризуются регрессиями, широким распространением субаэральными поднятиями и усилением климатической зональности с признаками оледенений. Внутри орогенных этапов выделяются короткие стадии усиления поднятий, превышающих величину подъема, обусловленного коллизионным сжатием, продолжительностью 7–10 млн лет [21].

ГЛУБИННЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Геодинамические интерпретации тектонических явлений

Теория тектоники литосферных плит (плейт-тектоника) связала воедино на литосферном уровне такие явления, как спрединг океанской литосферы, предполагающий увеличение ее объема в зонах спрединга; латеральное движение литосферных плит; поглощение океанской литосферы в зонах субдукции, сопровождающееся формированием или наращиванием континентальной литосферы и ее деформацией в той плите, под которую океанская литосфера субдуцирует. При поглощении океанской литосферы в ходе субдукции и сближении континентальных обрамлений бывшего океана развивается крупномасштабная коллизия. Она вызывает деформационное утолщение литосферы и, в частности, земной коры. Последнее, согласно плейт-тектонической теории, приводит к горообразованию. Сопровождающее коллизию гранитообразование дополняет утолщение коры и поднятие поверхности.

Дальнейшие исследования показали, что некоторые свойства геологической среды, заложенные в первоначальную плейт-тектоническую модель, распространены не повсеместно. Так, классическая плейт-тектоника игнорировала реологическую расслоенность литосферы как фактор тектогенеза. Однако вскоре выяснилось, что этот фактор приводит к тектоническому расслоению литосферы, не позволяющему рассчитывать поведение плит как монолитных образований при их тектоническом взаимодействии, по меньшей мере, в пределах подвижных поясов. Для возникновения расслоенности необходимо наличие дифференцированной по глубине субгоризонтальной силы [12]. Такой тангенциальной компонентой являются объемные силы, не связанные с тепломассопереносом [19]. Обладающие различной вязкостью и плотностными характеристиками зоны литосферы, распределенные неравномерно, с течением времени при подвижном реологическом состоянии трансформируются в состояние горизонтальных пластов с равномерным распределением этих характеристик вдоль

них, как состояние с минимальной потенциальной энергией. Возникающая таким образом расслоенность имеет, тем самым, тектоническую природу.

Изменилось также представление о границах плит: субдукционные и, тем более, коллизионные границы являются диффузионными, т.е. представляют собой пояса деформаций шириной в сотни километров. И если в субдукционных поясах основная деформация концентрируется в сейсмофокальной зоне, то в коллизионных поясах она может быть рассредоточена по нескольким зонам с близкими скоростями деформации.

В классической плейт-тектонической теории зоны субдукции рассматривались как области поглощения океанской литосферы, компенсирующие ее нарастание в зонах спрединга. Мантийные сейсмофокальные зоны, как главный признак субдукции, прослежены до глубин 600–650 км, т.е. почти до основания переходного слоя мантии. С появлением сейсмической томографии были обнаружены продолжения субдуцируемых слэбов в нижнюю мантию [44]. Однако такие зоны субдукции немногочисленны. Большая часть исследованных слэбов трансформируется в большие мантийные клинья на уровне переходного слоя, причем в отдельных случаях ниже него обнаружены высокоскоростные объемы на удалении от областей субдукции [40].

Обоснования тектонической расслоенности литосферы, диффузности границ плит и перехода зон субдукции в большие мантийные клинья усложнили первоначальную плейт-тектоническую модель, но не изменили ее сути. Незыблемым остался главный принцип — обусловленность важнейших тектонических явлений взаимодействием литосферных плит.

Сложности возникли при попытке объяснить в рамках плейт-тектонической теории особенности новейшего горообразования. В новейшем орогенном этапе выделяются две стадии [21, 22]. Длительная первая стадия началась в разных орогенических поясах в интервале времени с конца эоцена до начала миоцена, но чаще всего в позднем олигоцене (25–24 млн лет назад) и сменилась второй стадией в конце миоцена или, чаще, в плиоцене, а местами, например, в Гималаях и Тянь-Шане лишь в начале плейстоцена (7–2 млн лет назад). В течение первой стадии развивались деформационные утолщения коры и, соответственно, изостатические поднятия в зонах концентрации деформаций коллизионного сжатия. Поскольку направления наибольшего сжатия неоднократно изменялись в течение первой стадии, субаэральные поднятия охватили значительную часть орогенических поясов, но высота поднятий, как правило, не превысила среднегорной, т.е. 1.0–1.5 км. Таким образом, развитие го-

рообразования в первую стадию вполне вписывалось в плейт-тектоническую модель.

Во вторую стадию горообразования скорости вертикальных движений возрастают в несколько раз. Площадь поднятий увеличивается, а амплитуда подъема ранее возникших возвышенностей удваивается и местами утраивается. Образуются современные горные системы, за счет разрушения которых формируется грубая моласса. Эти явления и в Альпийско-Гималайском, и в других континентальных подвижных поясах охватывают не только области продолжающихся покровно-складчатых и транспрессивных деформаций, но и области, где такие деформации существенно ослабели к началу плиоцена, а местами завершились в более ранние стадии альпийского цикла или в прежние циклы. Так, в Альпах, Карпатах, на Большом Кавказе усиление горообразования происходит на фоне уменьшения коллизионного сжатия. Но даже там, где его вклад в рост гор возрастает, например, в Тянь-Шань—Памиро—Гималайском регионе, он составляет от 20 до 50%. Остальное является изостатической реакцией на разуплотнение низов коры и верхов мантии. Разуплотнение литосферной мантии происходит из-за ее частичного замещения астеносферным веществом [4]. Оно дополняется разуплотнением низов коры и верхов мантии в результате ретроградного метаморфизма высоко-метаморфизованных пород корового происхождения в условиях пластической деформации под воздействием астеносферных флюидов [5, 22]. Таким образом, преобладающая доля поднятий второй стадии обусловлена не коллизионным взаимодействием плит, а глубинными преобразованиями литосферы и перемещениями пород подлитосферной мантии.

Выявлены и обоснованы частные механизмы структурообразования, обусловленные либо взаимодействием плит, либо интенсивными вертикальными движениями второй фазы горообразования, либо экзогенными процессами, связанными с климатическими факторами и их изменениями. Таковы гравитационная тектоника; вулканотектоника; гранитообразование как источник поднятий; восстановление изостатического равновесия, нарушенного эрозией поднятий и осадконакоплением во впадинах, изменениями ледовой нагрузки и количества воды в крупных водоемах при смене оледенений и межледниковий.

Мантийная конвекция

Вскоре после того, как были сформулированы основные положения плейт-тектонической теории, стало очевидным, что предложенный механизм не содержит эффективных собственных источников перемещения и взаимодействия литосферных плит. В качестве такового был предложен механизм общемантийной тепловой

конвекции [31]. Однако Е.В. Артюшков [2] и О.Г. Сорохтин [20] аргументировали большую эффективность химико-плотностной конвекции, связанной с дифференциацией мантии. При этом предполагалось, что зоны спрединга соответствуют восходящим ветвям конвекции, а зоны субдукции и коллизии — ее нисходящим ветвям [20].

Дальнейшие исследования, особенно сейсмографические, убедительно показали, что прямого соответствия восходящих и нисходящих ветвей конвекции указанным элементам плейт-тектонической системы нет. Для зон спрединга наиболее очевидным свидетельством такого несоответствия могут служить океаны вокруг Африки, где зоны спрединга примерно параллельны друг другу на некоторых участках. Спрединг в этих зонах наращивает Африканскую плиты. Поскольку внутри Африки зоны поглощения литосферы, компенсирующие разрастание, отсутствуют, это означает, что либо с одной стороны от Африканской плиты, либо с обеих сторон зоны спрединга удаляются от предполагаемого питающего их глубинного источника. Открытие перехода большинства субдуцируемых слэбов в большие мантийные клинья показывает, что и зоны субдукции не могут в полной мере представлять нисходящие ветви общемантийной конвекции.

В.П. Трубицын [25, 26, 43] выполнил численное моделирование общемантийной конвекции. В его моделях восходящая ветвь конвекции соответствует мантийным суперплюмам, а нисходящая ветвь — зонам субдукции, которые на уровне переходного слоя испытывают деформации и преобразования, но продолжают в нижнюю мантию. Конвективные ячей замыкаются на уровне слоя D" в основании мантии. Слой D" характеризуется пониженными скоростями сейсмических волн и утолщается до 250–300 км в секторах Земли, к которым приурочены мантийные суперплюмы. Предполагается, что эти утолщения являются скоплениями горячего и тяжелого материала, возможно, с относительно высоким содержанием железа [28, 29].

В расчете мантийной конвекции решающее значение имеет вязкость среды. Вязкость подлитосферных верхнемантийных пород, принимаемых за верхнюю латеральную ветвь конвекции, рассчитана по скорости гляциоизостатического поднятия Балтийского и Канадского щитов после снятия ледовой нагрузки и оценена величинами порядка 10^{19} – 10^{20} Пас [3, 30]. С использованием этих данных была построена гипотетическая модель распределения вязкости во всей мантии [41]. Согласно этой модели, вязкость повышается до $\sim 10^{21}$ Пас к низам переходного слоя, составляет $\sim 10^{22}$ Пас в нижней мантии и понижается до 10^{19} – 10^{20} Пас в утолщениях слоя D". Другим источником для оценки вязкости мантии послужили ла-

бораторные эксперименты с поведением оливина при высоких давлениях [35]. Приложение результатов экспериментов к решению уравнений конвекции показало возрастание вязкости в нижней мантии до 10^{24} – 10^{25} Пас, при которых конвекция становится неэффективной. При численном моделировании общемантийной конвекции В.П. Трубицын [25, 26] использовал как данные модели [41], так и результаты экспериментов с оливином. Чтобы обеспечить эффективность общемантийной конвекции, он принял значения вязкости для верхней мантии $\sim 10^{18}$ Пас, а в расчете вязкости по данным экспериментов с оливином уменьшил вдвое один из расчетных коэффициентов (объем активации).

Авторы данной статьи предложили модель тектоники мантийных течений, которая сводится к следующим основным положениям [21, 24]. Восходящую ветвь общемантийной конвекции образуют общемантийные суперплюмы. От них распространяются подлитосферные верхнемантийные потоки, которые из-за вязкого трения прямо или опосредованно перемещают литосферные плиты. В местах расхождения плит возникают зоны спрединга, а в местах схождения — зоны субдукции и коллизии. Нисходящую ветвь конвекции образуют зоны субдукции, продолжающиеся ниже переходного слоя мантии, и отторженные фрагменты плотных литосферных масс под кратонами и областями интенсивной коллизии (рис. 1, рис. 2).

Существенная роль отводится переходу большинства субдуцируемых слэбов в большие мантийные клинья. Ряд авторов [6, 11] рассматривает их как источник верхнемантийной конвекции, играющей значительную, если не определяющую роль во внутриплитном магматизме, преобразовании и тектоническом развитии литосферы некоторых подвижных поясов. Верхнемантийной конвекцией можно объяснить и особенности движения Тихоокеанской плиты [24]. Согласно сейсмографическим данным, меридионально удлинённый Центрально-Тихоокеанский суперплюм порождает верхнемантийные потоки, направленные как к западу, так и к востоку от него. Восточные потоки приводят к образованию зон спрединга Восточно-Тихоокеанского поднятия, где благодаря верхнемантийной конвекции формируется встречный подлитосферный поток, увлекающий Тихоокеанскую плиту на северо-запад.

Кристаллохимическая структура минералов переходного слоя мантии допускает присутствие в них гидроксильных групп, поступающих в этот слой из субдуцируемых слэбов. Наряду с возможным поступлением в переходный слой глубинного водорода, это делает его потенциальным источником водных флюидов [17, 38, 42]. В эпохи

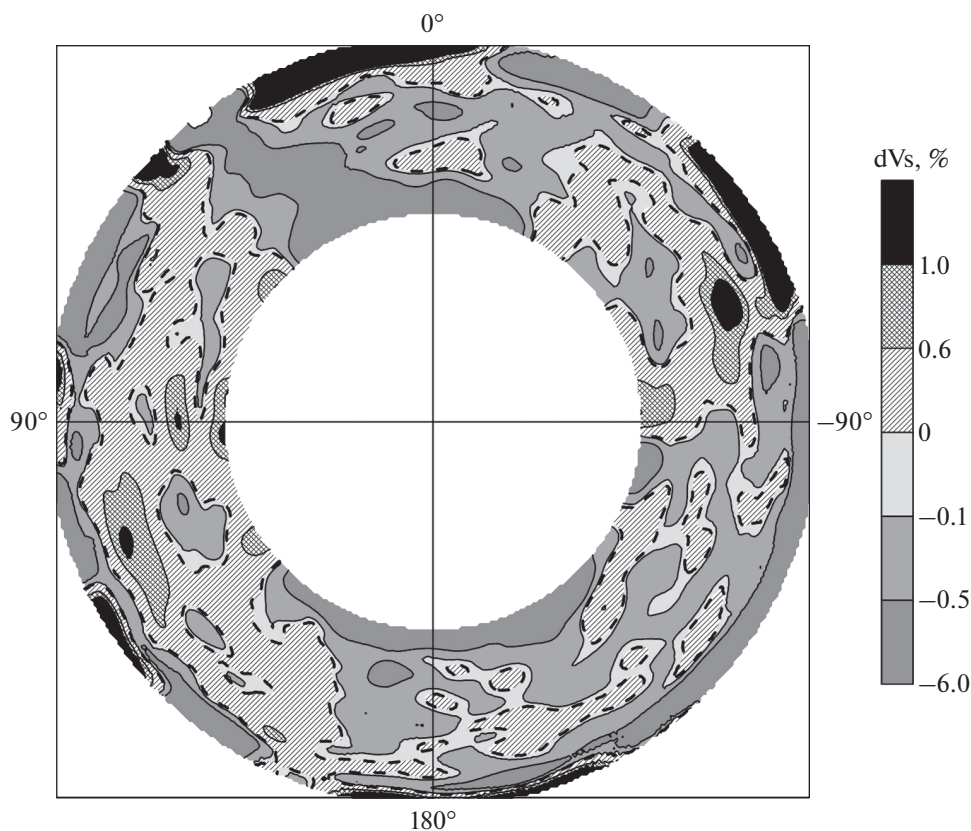


Рис. 1. Экваториальный разрез δV модифицированной сейсмотомографической модели мантии NGRAND (с использованием данных [27, 34], по S-волнам. Показана (пунктир) нулевая изолиния

широкого распространения коллизии она замедляет движение плит, и подлитосферные потоки распространяются под соседние с коллизией области. Перерабатывая переходный слой мантии, потоки обогащаются флюидами. Активизированная таким образом мантия частично замещает мантийную часть литосферы, а флюиды потоков вызывают метаморфические преобразования литосферы и, как следствие, ее разуплотнение. Это приводит к резкому усилению вертикальных движений во вторую, плиоцен-четвертичную, стадию новейшего горообразования.

Оценены скорости верхнемантийных латеральных потоков и нисходящих течений в мантии [24]. Скорости верхнемантийных потоков были определены для двух тектонически различных регионов — под системой вулканических островов Гавайи — Императорский хребет океанической Тихоокеанской плиты и под континентальной Аравийской плитой и Аравийско-Кавказским сегментом Альпийско-Гималайского орогенного пояса. В первом случае оценка скорости основывалась на анализе вулканизма с кампана (~76 млн лет), во второй — с начала эоцена (~55 млн лет). В обоих случаях скорость варьи-

ровала в разные отрезки времени, но в среднем составила ~8 см/год, что под системой Гавайи—Императорский хребет близко к скорости движения литосферной плиты, а в Аравийско-Кавказском регионе превосходит ее в несколько раз.

В качестве объяснения высоких скоростей течений в подлитосферной верхней мантии предложена модель ее строения, опирающаяся на существующие представления о РТ-параметрах этой среды. Предполагается, что астеносфера состоит из прочных фрагментов от зерен до крупных блоков, разделенных тонкими пленками вещества, близкого к состоянию плавления и местами насыщенного флюидами [24]. Наличие межблокового и межзернового матрикса с резко пониженной вязкостью делает возможными общую деформацию и течение прочных обломков с высокими скоростями.

Предположительная оценка скоростей нисходящих течений в мантии была выполнена для африканского и южно-американского обрамлений Атлантического океана. Путем анализа данных сейсмической томографии под обоими обрамлениями Южной и Центральной Атлантики были обнаружены объемы мантии с повышенными

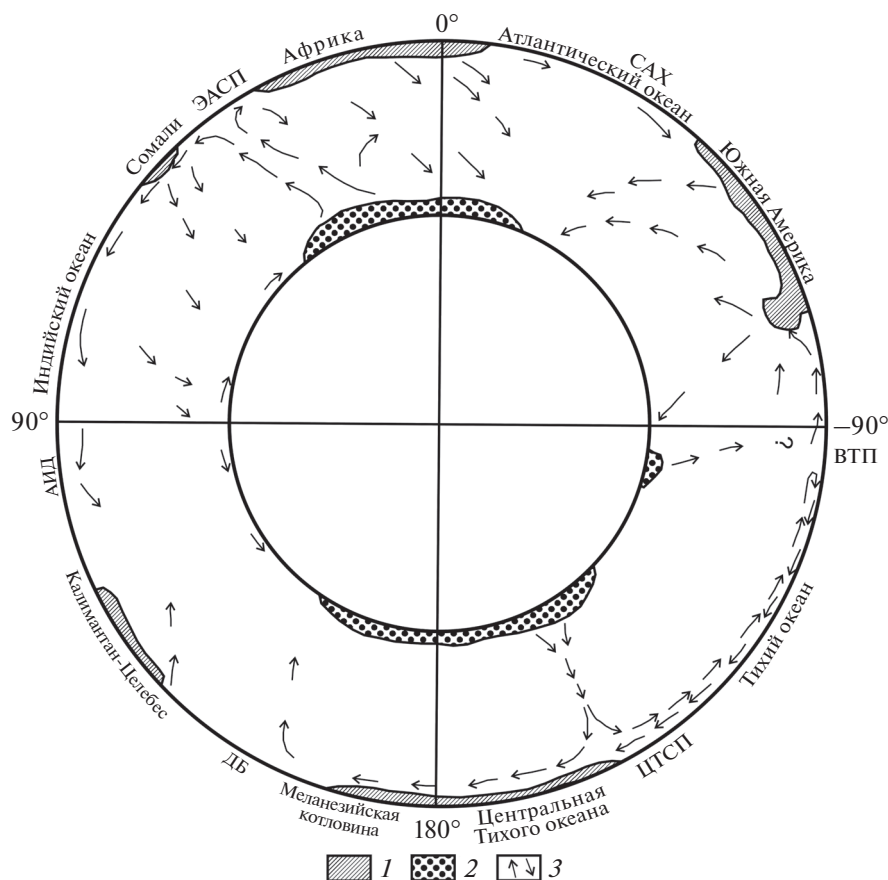


Рис. 2. Профиль мантии вдоль экваториального сечения.

Показаны (стрелки) направления мантийных течений.

Обозначены: Андамено-Индонезийская дуга – АИД, Восточно-Тихоокеанское поднятие – ВТП, дуга Бисмарка – ДБ, Срединно-Атлантический хребет – САХ, Центрально-Индийский хребет – ЦИХ, Центрально-Тихоокеанский суперплюм – ЦТСП, Эфиопско-Афарский суперплюм – ЭАСП.

1 – литосфера континентального типа; 2 – слой D'' в основании мантии, скопления горячего и тяжелого материала; 3 – направления течения мантийного материала

скоростями сейсмических волн. Они прослежены до глубин 2000–2200 км, где теряют свою обособленность, и интерпретированы как отслоенные и погружающиеся фрагменты континентальной литосферы, которые под Южной Америкой могут вмещать также субдуцированный с запада слэб океанской литосферы. Эти скопления высокоскоростных объемов на двух сторонах Атлантики наклонены навстречу друг другу и на глубинах 2000–2200 км смыкаются (рис. 3). Если сложить расстояния по латерали между наиболее и наименее погруженными фрагментами по обеим сторонам Атлантики, то полученная сумма окажется близкой к ширине глубоководной части океана. Это дает основание полагать, что погружение отторженных континентальных фрагментов началось одновременно с началом раскрытия Атлантики и расстояние между фрагментами, отторгавшимися позднее, последовательно нарастало по мере раздвигания. Поскольку раздвигание этой части Атлантики началось в самом начале юры

(~200 млн лет назад) и с той поры отторженные от основания континентальной литосферы фрагменты погрузились на 1800–2100 км, средняя скорость погружения составила ~0.9–1.0 см/год.

Полученные значения скоростей нисходящих течений в мантии почти на порядок меньше скоростей латеральных верхнемантийных потоков и, вероятно, не уступающих им скоростей восходящих потоков в мантийных суперплюмах. Последнее предполагает, что нисходящие потоки занимают гораздо больший объем по сравнению с восходящими; в противном случае нисходящие потоки не могли бы их компенсировать. Выполненные исследования не добавили обоснований нисходящих мантийных течений на глубинах более 2200 км. Если все-таки допустить, что такие потоки существуют и замыкают общемантийную конвекцию, то приведенные выше данные приводят к выводу, что время замыкания конвективного цикла соиз-

меримо с продолжительностью альпийского тектонического цикла.

Модель тектоники мантийных течений объясняет в рамках общемантийной конвекции и ее производных не только тектонические явления, объединяемые плейт-тектонической теорией, но и некоторые явления ею не объяснимые и, прежде всего, усиление вертикальных движений во вторую стадию новейшего орогенного этапа. Вместе с тем, эта модель не претендует на то, чтобы объяснить все разнообразие тектонических явлений. Вне предложенных интерпретаций остались такие значительные явления, как формирование обширных впадин на континентальной коре, погружение которых не обусловлено раздвиганием или обеспечивается им не полностью, и крупных магматических провинций, накладывающихся на плиты независимо от их возраста и состава. Первые Е.В. Артюшков [4] связывает с метаморфогенным уплотнением пород литосферы. Вторые рассматриваются как проявления плюмовой тектоники [16]. Можно ли их считать производными суперплюмов типа Эфиопско-Афарского или Центально-Тихоокеанского, пока не ясно, поскольку тектонотипы этих образований имеют относительно древний возраст и не находят отражения в сейсмотомографических данных.

Тектоническое отражение геодинамических событий в земном ядре

Фазы складчатости, синхронно проявившиеся в разных подвижных поясах с конца юры поныне, были сопоставлены с частотой инверсий магнитного поля Земли [23]. В течение этого интервала времени тектонические фазы имели место в эпохи как выдержанной однонаправленной магнитной полярности, так и частых инверсий магнитного поля, но чаще были приурочены к эпохам частой смены полярности или непосредственно следовали за ними (рис. 4). В этом смысле говорится далее о синхронности большинства тектонических фаз эпохам частой смены магнитной полярности. С конца олигоцена, т.е. в течение неотектонического орогенного этапа, когда инверсии были особенно частыми, тектонические фазы происходили одна за другой с интервалами 1–1.5 млн лет (до ~3 млн лет между штирийской и аттической фазами), что несоизмеримо с длительными интервалами между более ранними фазами. При этом пики деформационной активно-

сти внутри неотектонических фаз следовали за эпохами максимальной частоты инверсий через 1–2 млн лет (рис. 5).

Обоснование синхронности большинства тектонических фаз альпийского цикла и эпох частых инверсий магнитного поля важно потому, что, согласно современным представлениям, решающее значение для создания и функционирования магнитного поля Земли имеют процессы в земном ядре и их взаимодействие с мантией [7]. Считается, что течения в ядре, в сочетании с вращением сфероида и высокой проводимостью материала, формируют структуру нормального магнитного поля Земли, которое в первом приближении может быть аппроксимировано полем диполя, ориентированного по оси вращения, проходящей через центр масс [8].

Геодинамическое воздействие этих процессов на литосферу путем конвекции или иных форм тепломассопереноса в мантии не может быть источником тектонических фаз. При скорости восходящих ветвей мантийного конвективного тепломассопереноса 8–10 см/год время прохождения конвективным возмущением интервала 2800 км от ядра до подошвы литосферы составило бы 35–28 млн лет, тогда как тектонические фазы близки по времени к эпохам частой смены магнитной полярности и в течение последних 24 млн лет проявляются вслед за их максимумами через 1–2 млн лет (см. рис. 4, см. рис. 5). Таким образом, существует отличный от конвективного, квазимгновенный (в геологическом масштабе времени) способ передачи к литосфере энергии от процессов в ядре Земли.

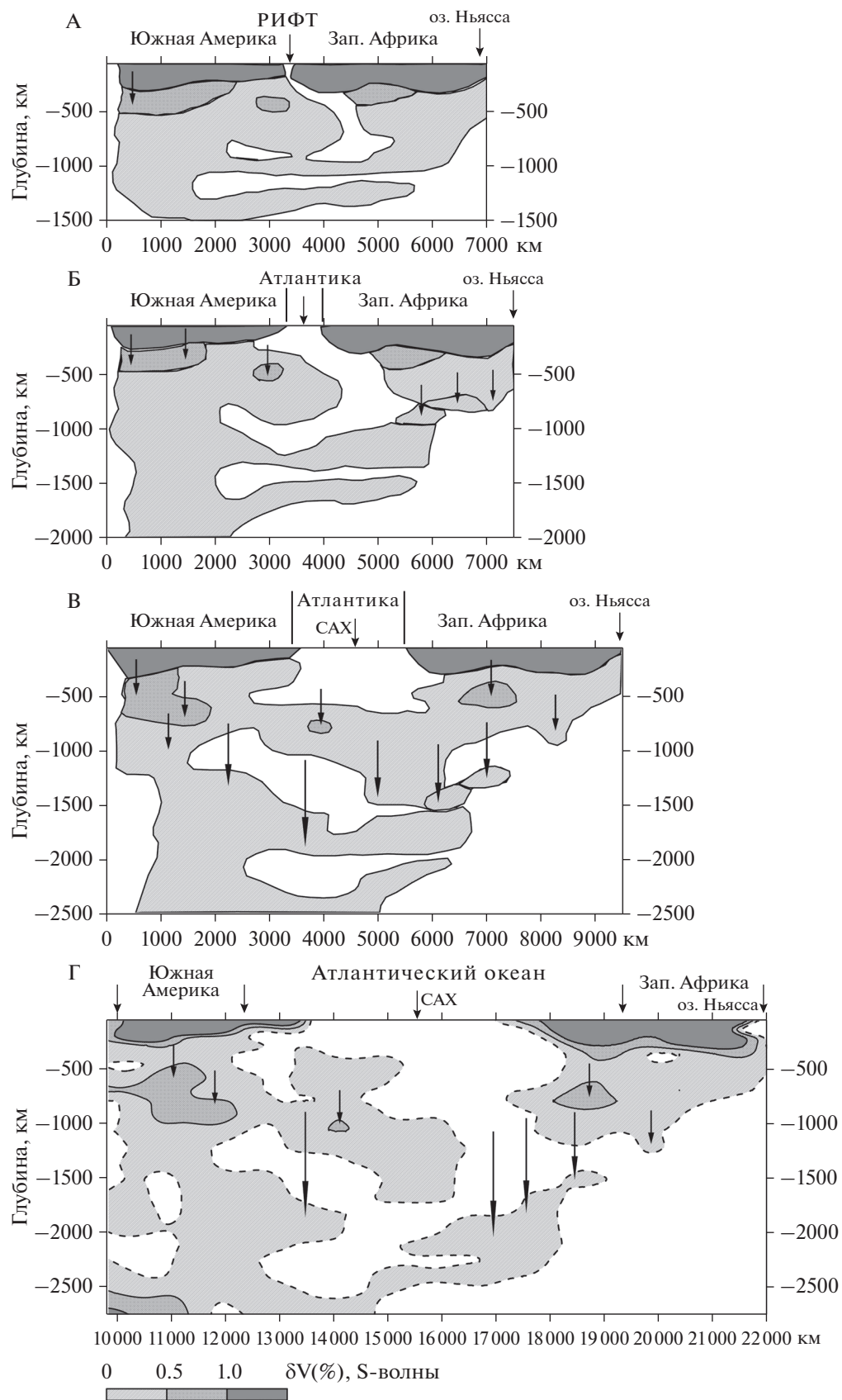
Выявленные исследованием вариаций нормального магнитного поля за последние 50 лет параметры диполя демонстрируют пространственное смещение со временем положения его центра на север от экватора относительно центра масс [9]. Это свидетельствует об изменении формирующей магнитное поле структуры течений материала жидкого ядра, средняя плотность которого выше плотности низов мантии почти на 50%. Изменения положения этих доминирующих в теле Земли масс, приводящие к изменению характеристик момента инерции относительно текущей оси вращения, должны приводить к изменению режима вращения Земли. Существуют расчеты, указывающие на смещение твердого ядра внутри жидкого [1]. Если принять во внимание, что средняя плотность твердого ядра превосходит плотность внешнего

Рис. 3. Стадии погружения отторженных фрагментов утолщенной континентальной литосферы Южно-Американского и Африканского обрамлений Атлантики (по данным [24, 27], с изменениями и дополнениями).

А — начало юры, Б — мел, В — палеоген, Г — современность.

Показаны (стрелки) направления погружения тяжелых мантийных блоков, длина стрелки отражает величину погружения.

Обозначена (пунктир) нулевая изолиния δV



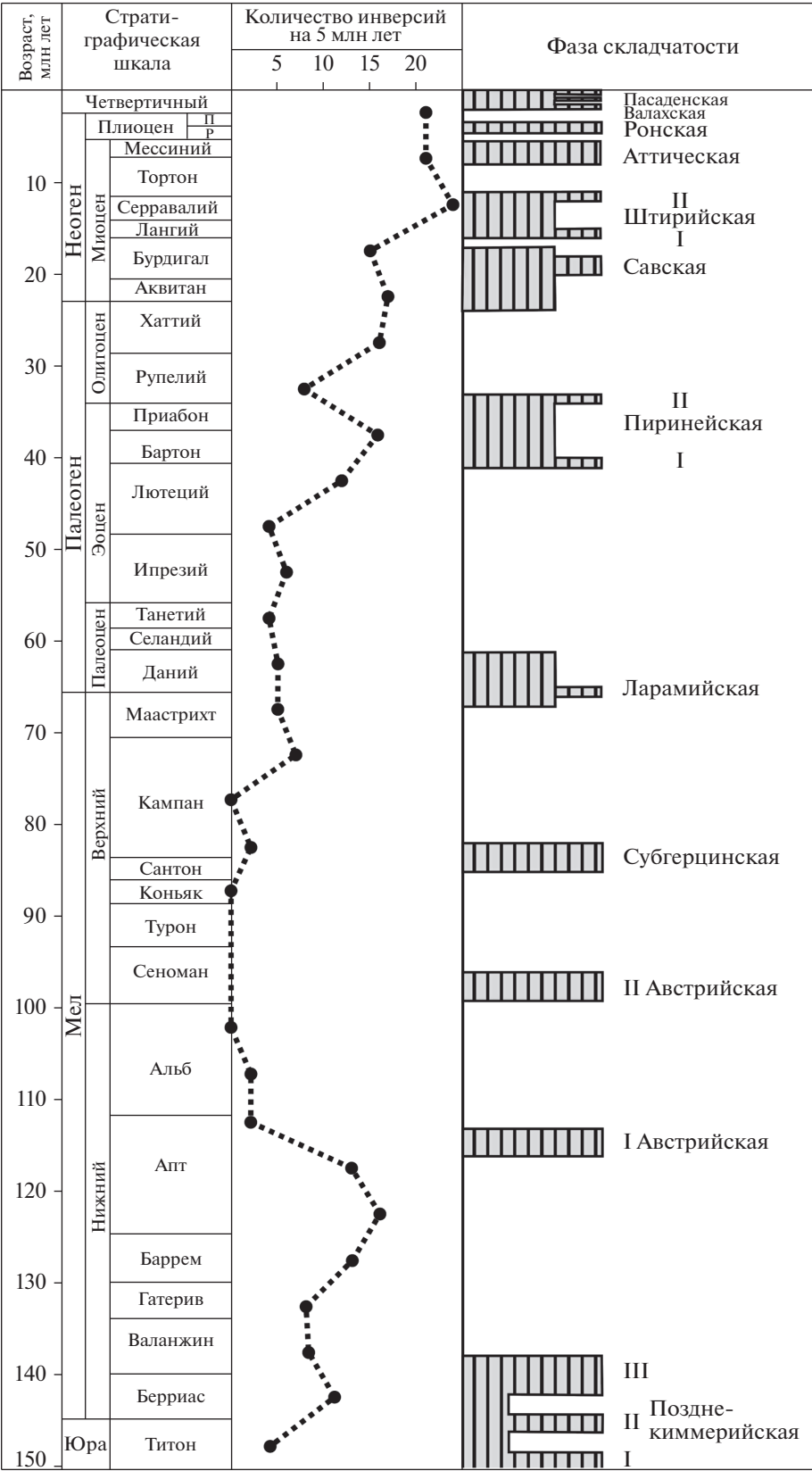


Рис. 4. Сопоставление фаз и эпох активизации деформаций сжатия и транспрессии с конца юрского периода поныне и частоты инверсий магнитной полярности (с использованием данных [23], с изменениями и дополнениями). Представлено количество инверсий магнитного поля по интервалам времени в пять миллионов лет

жидкого ядра на ~15%, такое смещение также может приводить к изменению режима вращения Земли, в частности, к изменению положения оси вращения внутри тела сфероида. Подтверждением этого факта являются данные International Earth Rotation and Reference Systems Service [37] за последние 100 лет, из анализа которых следует смещение полюса вращения на юг вдоль 70° з.д. со скоростью ~10 см/год.

Изменения течений в ядре, ответственных за формирование нормального магнитного поля, отражают, по мнению авторов, перераспределение масс в системе внешнего жидкого и внутреннего твердого ядра, приводящее к изменению режима вращения Земли. Это могло стать причиной возникновения в мантии переменных объемных сил. Наиболее интенсивно они проявляются в литосфере и земной коре, отличающейся максимальной неоднородностью, расслоенным и блоковым строением, имеющей контакт со свободной поверхностью, совпадающей с поверхностью твердой Земли, и контакт в подошве со слоем пониженной вязкости. При действии субгоризонтальной объемной силы эта разница создает дифференциацию в вертикальном направлении и усиливает расслоенность. Таким образом, связь между инверсиями магнитного поля и фазами тектонической активизации является не прямой. Оба указанных явления могут быть следствиями переменной пространственной структуры течений материала с большой плотностью, с одной стороны, и большой проводимости во внешнем жидком ядре, с другой, приводящими как к инверсиям магнитного поля, так и к изменениям режима вращения Земли и адаптации к ним положения и скоростей литосферных фрагментов.

ИЕРАРХИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Статистическая физика и термодинамика рассматривают любые физические тела как системы, состояние которых определяется набором параметров (температура, давление, плотность, химический потенциал, энергосодержание и т.д.). Параметры взаимосвязаны таким образом, что изменение хотя бы одного из них влечет за собой совокупность процессов, которые приводят к изменению других параметров, восстанавливающему равновесие системы. Тектонические системы — это совокупности природных процессов, взаимосвязанных в определенном объеме геологической среды и прямо или косвенно приводящих к движению литосферы и развитию в ней структурных форм [14, 15].

В технике существует понятие структурных напряжений, которые уравниваются в определенном объеме среды при отсутствии внешних нагрузок на граничных поверхностях. Структурные напряжения служат мерой нарушения равно-

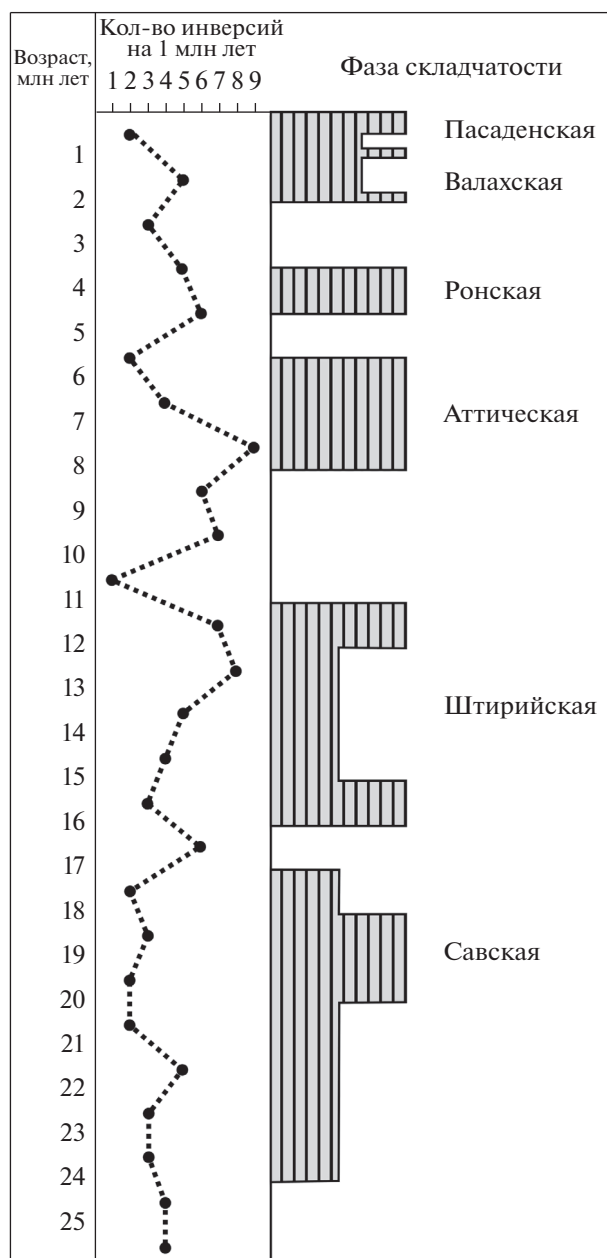


Рис. 5. Сопоставление фаз и эпизодов активизации деформаций сжатия и транспрессии с конца олигоцена поныне и частоты инверсий магнитной полярности (по данным [23], с изменениями и дополнениями). Представлено количество инверсий магнитного поля по интервалам в один миллион лет

весного состояния вещества. В геологической среде напряжения возникают при воздействии как внешних по отношению к рассматриваемому объему нагрузок, так и внутренних источников, но можно обособить объемы среды, в которых действующие напряжения уравниваются. Тектонические системы — это, вместе с тем, и системы напряжений, возникающие на разных уровнях организации геологической среды при

нарушении равновесного состояния по любому из параметров, характеризующих ее как термодинамическую систему [14]. Мерой ранга тектонической системы служит размер области, в которой замыкаются структурные связи между элементами системы. В этом смысле можно говорить о системах глобальной и локальных разных рангов, а также о системах, охватывающих разные слои Земли.

Большинство деформаций и смещений, доступных непосредственному наблюдению, возникают под действием локальных тектонических систем. Так, сложность строения зон деформаций и смещений на границах литосферных плит и микроплит, особенно коллизионных, хотя и является отражением глубинных взаимодействий, но в значительной мере обусловлена особенностями геомеханики сред со свободной поверхностью, в данном случае поверхностью твердой Земли. В системах, ответственных за такие структуры, источник структурообразования выступает в роли главного фактора, который сопровождается второстепенными, и их взаимодействие обуславливает сложность тектонических проявлений, обычно ограниченных верхами земной коры.

Системы, ответственные за проявления гравитационной тектоники, как правило, также не выходят за пределы верхних частей земной коры. Изостатическая компенсация вертикальных движений, возникающих из-за эрозии поднятий и аккумуляции продуктов их разрушения во впадинах, осуществляется в средних и нижних горизонтах коры [18]. Проявления вулcano-тектоники обусловлены системами процессов, ограниченных глубиной магматических очагов, которые располагаются в земной коре или мантийной части литосферы. Это не исключает поступления в очаги материала из подлитосферных верхнемантийных потоков или из мантийных суперплюмов, но эти поступления не имеют прямого отношения к проявлениям вулcano-тектоники.

Изостатическая компенсация появления и снятия ледовой нагрузки и изменений в связи с этим объема воды в мировом океане происходит, как принято считать, на уровне астеносферы, хотя гляциоизостазия под древними щитами частично может осуществляться и перемещением горных масс в коровых волноводах.

Система процессов, объединяемых моделью тектоники мантийных течений и, в частности, плейт-тектоники, охватывает всю мантию Земли, будучи обусловлена в конечном счете общемантийной конвекцией. Это не исключает того, что отдельные элементы этой системы (подсистемы) ограничены верхней мантией и переходным слоем. Таковы спрединг, латеральное перемещение плит верхнемантийными подлитосферными потоками, верхнемантийная конвекция, глубинные

преобразования и перемещения, приводящие к разуплотнению верхов мантии и низов коры и усилению вертикальных движений во вторую стадию горообразования, и в значительной мере субдукция, если субдуцируемые слэбы полностью или частично переходят в большие мантийные клинья.

Сложными оказываются соотношения между плейт-тектоническими элементами обсуждаемой системы и процессами горообразования. Понятие тектонического цикла возникло в эпоху господства геосинклинальной парадигмы. На основе ограниченного в ту пору набора геологических наблюдений сформировалось представление, что в течение цикла происходит направленное развитие геосинклиналей, завершающееся складчатостью и горообразованием. По мере накопления наблюдений в различных тектонических областях становилось все более очевидным, что однотипные процессы, интерпретируемые как зарождение и развитие геосинклиналей в рамках единого тектонического цикла, были неодновременными в разных областях, и не всякая фаза или эпоха складчатости приводила к горообразованию на обширных территориях. Так возникли понятия ранних и поздних альпид, герцинид разного возраста и т.д. В рамках плейт-тектонической парадигмы это означает, что различные бассейны с океанической или субокеанической корой возникали и закрывались в разное время. Но орогенные этапы и, прежде всего, “пиковая” вторая стадия горообразования проявлялись синхронно на обширных территориях. Эпохи продолжительностью 7–10 млн лет, сходные с второй стадией новейшего горообразования, выделены в конце герцинского (артинский век) и каледонского (эйфельский век) циклов. Проявления горообразования артинского времени зафиксированы в палеозойских складчатых поясах Урала и Центральной Азии [13], эйфельского – в различных каледонских системах [10]. И в ранней перми, и в среднем девоне известны примеры, когда горообразование непосредственно следовало за эпохой покровно-складчатых деформаций или было оторвано от нее значительным интервалом времени. В обоих случаях со второй стадией совпадала частичная перестройка плейт-тектонической системы (расположения бассейнов с океанической корой, зон субдукции и т.д.) и, возможно, системы мантийных течений, определяющих движение плит [21].

Широкое распространение коллизии, определяющее возникновение выраженных в рельефе деформационных поднятий, также было неодновременным в разных горно-складчатых поясах. Высокая сомкнутость континентов, связываемая многими исследователями с обширной коллизией, не совпадает по времени с орогенными этапами. Так, максимальная сомкнутость континен-

тов, определяемая как эпоха существования Пангеи, имела место в карбоне, а вторая стадия орогенного этапа герцинского цикла приходится на раннюю пермь. Новейший орогенный этап и его вторая стадия характеризуются меньшей сожностью континентов, чем эпоха Пангеи.

Таким образом, мы приходим к выводу, что плейт-тектонический “конвейер”, представляемый на земной поверхности открытием и закрытием бассейнов с корой океанского типа и выраженный соответствующими отложениями, деформациями, магматическими и метаморфическими проявлениями, “работал” асинхронно в разных областях, и на эти разновозрастные проявления накладывались глобальные орогенные этапы с повсеместно синхронной второй стадией горообразования.

В конкретных геологических ситуациях фазы складчатости отражают развитие деформаций сжатия и транспрессии в областях коллизионного и субдукционного взаимодействия плит и в этом смысле являются частью цепочки событий в рамках плейт-тектонической модели или, в более общем смысле, модели тектоники мантийных течений. Но эти модели не могут объяснить одновременность проявлений фаз складчатости (тектонических фаз) в разных подвижных поясах и сегментах крупных поясов. Выявленная синхронность большинства тектонических фаз и частых инверсий магнитного поля позднего мезозоя и кайнозоя указывает, что синхронность определяется течениями вещества в земном ядре, генерирующими нормальное магнитное поле. Предполагается, что эти течения приводят к изменению параметров вращения Земли и вызывают появление в мантии объемных сил и деформаций, обеспечивающих адаптацию мантии к изменившимся геодинамическим условиям. Особенно интенсивно эти деформации проявляются в литосфере и, более всего, в земной коре, отличающейся максимальной неоднородностью строения и расположенной на внешней границе твердой Земли.

Таким образом, синхронность большинства тектонических фаз и частых инверсий магнитного поля служит проявлением глобальной тектонической системы, охватывающей как земное ядро, так и все его оболочки. Будучи проявлена лишь в тектонических фазах, эта система, казалось бы, оказывала ограниченное влияние на эволюцию внешних оболочек Земли, осуществляющуюся в рамках тектоники мантийных течений. Однако роль воздействий течений в ядре может быть более значительной.

В течение неотектонического орогенного этапа (с конца олигоцена и поныне, т.е. в последние 25–24 млн лет) геодинамические воздействия процессов в земном ядре, отраженные в синхрон-

ности инверсий магнитного поля и тектонических фаз, проявлялись столь часто и вызывали столь значительные флуктуации в системе процессов, объединяемых моделью тектоники мантийных течений, что могли способствовать разрушению системы и перестройке. Кульминацией такого развития событий явилась вторая стадия орогенного этапа, когда верхнемантийные потоки, определяющие взаимодействие плит, стали турбулентными и привели к разуплотнению верхов мантии и низов коры, резко усилившему горообразовательные вертикальные движения.

Остается неясным, какую роль сыграли процессы в земной ядре в развитии палеозойских орогенных этапов. В течение раннепермского этапа горообразования частых инверсий магнитного поля не выявлено.

И в плейт-тектонической модели и в модели тектоники мантийных течений, пространственное положение ветвей общемантийной конвекции и определяемых ими структурных образований не обнаруживает связи с параметрами вращения Земли. Исключением могут быть два главных суперплюма, Эфиопско-Афарский и Центрально-Тихоокеанский. Оба ориентированы в современных координатах субмеридионально и расположены в противоположных сегментах Земли — примерно на 30°–35° в.д. и 160°–155° з.д., соответственно. В отличие от обеих моделей, глобальная система тектонических процессов, определяемая течениями в земном ядре, связана с параметрами вращения, поскольку силы, определяющие ее тектонические проявления, возникают из-за изменения этих параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тектонические явления и создаваемые ими структуры позднего мезозоя и кайнозоя возникают как результат интерференции воздействия систем геодинамических процессов, охватывающих разные объемы и разные глубины Земли. Так, разнообразные локальные деформации, возникающие в процессе взаимодействия плит и вертикальных движений, обусловленных глубинными преобразованиями, как правило, не выходят за пределы литосферы. Процессы, выраженные тектоническими явлениями, которые описываются моделью тектоники мантийных течений, охватывают всю мантию Земли, хотя отдельные элементы этой системы (спрединг, латеральное перемещение плит, значительная часть зон субдукции, вещественные преобразования, приводящие к усилению вертикальных движений) ограничены верхней мантией, включая переходный слой.

Геодинамические процессы, выраженные синхронностью частых инверсий магнитного поля и большинства тектонических фаз, иницииро-

ваны, вероятно, перераспределением вещества земного ядра и охватывают, тем самым, все геосферы. Предполагается, что эта система процессов способствовала возникновению новейшего орогенного этапа. В отличие от геодинамических процессов, объединяемых моделью тектоники мантийных течений, которые не обнаруживают значимой связи с параметрами вращения Земли, процессы последней группы сопряжены с перемещениями вещества земного ядра, способными вызвать изменения параметров вращения. Такие изменения и обуславливают тектонические проявления этой системы процессов, которая, тем самым, становится значимым фактором тектогенеза.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда, проект № 17-17-01073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Ю.Н., Суворова И.И. Процесс изменения широт и его связь с вынужденными перемещениями внутреннего твердого ядра // *Физика Земли*. 2006. № 7. С. 66–75.
2. Артюшков Е.В. Гравитационная конвекция в недрах Земли // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1968. № 9. С. 3–18.
3. Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука, 1979. 328 с.
4. Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 457 с.
5. Артюшков Е.В. Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 6. С. 738–760.
6. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал "ГЕО", 2001. 408 с.
7. Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. Гидромагнитное динамо как источник планетарного, солнечного и галактического магнетизма // *Успехи физических наук*. 1987. Т. 152. Вып. 2. С. 263–284.
8. Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Брагин В.Ю. Геомагнитное поле в геологическом прошлом (за последние 400 млн лет) // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 4. С. 486–495.
9. Ладынин А.В., Попова А.А. Оптимизационный подбор параметров эксцентричного диполя путем сравнения модельных полей с магнитным полем Земли // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 3. С. 266–278.
10. Леонов Ю.Г. Тектоническая природа девонского орогенеза. М.: Недра, 1976. 192 с.
11. Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495.
12. Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение горных пород литосферы // *Тектоническая расслоенность литосферы*. М.: Наука, 1980. С. 105–146.
13. Моссаковский А.А. Орогенные структуры и вулканизм палеозойной Евразии. М.: Наука, 1975. (Тр. ГИН. Вып. 268).
14. Пономарев В.С., Трифонов В.Г. Факторы тектогенеза // *Актуальные проблемы тектоники океанов и континентов*. М.: Наука, 1987. С. 81–94.
15. Пономарев В.С., Трифонов В.Г. Тектонические системы // *Природа*. 1989. № 4. С. 62–71.
16. Пучков В.Н. Взаимосвязь плитотектонических и плюмовых процессов // *Геотектоника*. 2016. № 4. С. 88–104. doi 10.7868/S0016853X1604007X
17. Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю. Геология мантии Земли. М.: ГЕОС, 2010. 140 с.
18. Ребецкий Ю.Л. Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // *Геодинамика и тектонофизика*. 2015. Т. 6. № 4. С. 437–466.
19. Ребецкий Ю.Л. Геодинамика и тектоника малых тангенциальных массовых сил // *Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Материалы XLIX Тектонического совещания*. М.: ГЕОС, 2017. Т. 2. С. 133–139.
20. Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974. 184 с.
21. Трифонов В.Г. Коллизия и горообразование // *Геотектоника*. 2016. № 1. С. 1–23.
22. Трифонов В.Г., Артюшков Е.В., Додонов А.Е., Бачманов Д.М., Миколайчук А.В., Вишняков Ф.А. Плиоцен-четвертичное горообразование в Центральном Тянь-Шане // *Геология и геофизика*. 2008. Т. 49. № 2. С. 128–145.
23. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Сопоставление тектонических фаз и инверсий магнитного поля в позднем мезозое и кайнозое // *Вестник РАН*. 2018. Т. 88. № 1. С. 33–39.
24. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Подлитосферные течения в мантии // *Геотектоника*. 2017. № 6. С. 1–15.
25. Трубицын В.П. Распределение вязкости в моделях мантийной конвекции // *Физика Земли*. 2016. № 5. С. 1–10.
26. Трубицын В.П., Трубицын А.П. Численная модель образования совокупности литосферных плит и их прохождения через границу 660 км // *Физика Земли*. 2014. № 6. С. 138–147.
27. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochemistry Geophysics Geosystems* G³. 2002. Vol. 3 (January 10). Paper number 2001GC000168. <http://www.geophysics.harvard.edu/geodyn/tomography/>.
28. Bull A.L., McNamara A.K., Ritsema J. Synthetic tomography of plume clusters and thermochemical piles // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. Vol. 278. P. 152–162.
29. Deschamps F., Cobden L., Tackley P. The primitive nature of large low shear wave velocity provinces // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. Vol. 349–350. P. 198–208.
30. Fjeldskaar W. Viscosity and thickness of the asthenosphere detected from the Fennoscandian uplift // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. Vol. 126. P. 399–410.
31. Forsyth D., Uyeda S. On the relative importance of the driving forces of plate tectonics // *Geophysical J. of Royal Astron. Society*. 1975. Vol. 43. P. 163–200.

32. *Fukao Y., Widiyantoro S., Obayashi M.* Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region // *Review of Geophysics*. 2001. Vol. 39. P. 291–323.
33. *Gordon R.G.* The plate tectonic approximation: Plate nonrigidity, diffuse plate boundaries, and global plate reconstructions // *Annual Review of Earth Planet. Sci.* 1998. Vol. 26. P. 615–642.
34. *Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S.* Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth // *GSA Today*. 1997. Vol. 7. P. 1–7.
35. *Hirth G., Kohlstedt D.* Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists // *Inside the Subduction Factory* / J. Eiler (ed.). Washington D.C.: AGU. Geophys. Monogr. Ser. 2003. Vol. 138. P. 83–105.
36. *Huang J., Zhao D.* High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // *J. Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. B09305.
37. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) / W.R. Dick, D. Richter (ed.). Annual report 2006. Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2008. 187 p
38. *Jacobsen S.D., Demouchy S., Frost J.D., Ballaran T.B., Kung J.* A systematic study of OH in hydrous wadsleyite from polarized FTIR spectroscopy and single-crystal X-ray diffraction: Oxygen sites for hydrogen storage in Earth's interior // *Amer. Mineral*. 2005. Vol. 90. No. 1. P. 67–70.
39. *Kozhurin A.I.* Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // *Tectonophysics*. 2004. Vol. 380. P. 273–285.
40. *Maruyama S., Santosh M., Zhao D.* Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary // *Gondwana Research*. 2007. Vol. 11. P. 7–37.
41. *Paulson A., Zhong Sh., Wahr J.* Modelling post glacial rebound with lateral viscosity variations // *Geophysical J. Int.* 2005. Vol. 163. P. 357–371.
42. *Smyth J.R.* A crystallographic model for hydrous wadsleyite: An ocean in the Earth's interior? // *Amer. Mineral*. 1994. Vol. 79. P. 1021–1025.
43. *Trubitsin V.P., Evseev M.N., Trubitsin A.P.* Influence of continents and lithospheric plates on the shape of D'' layer and the spatial distribution of mantle plumes // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2015. Vol. 15. № 3.
44. *Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R.* Evidence of deep mantle circulation from global tomography // *Nature*. 1997. Vol. 386. P. 578–584.

Рецензенты М.Г. Леонов, В.Н. Пучков

Tectonic Phenomena and Supervising Geodynamic Processes

V. G. Trifonov^a, * and S. Yu. Sokolov^a

^a*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^{*}*e-mail: trifonov@ginras.ru*

Received November 24, 2017

Abstract—The study concerns two deep sources of tectonic processes in Late Mesozoic and Cenozoic which influence is transferred and enforced on the spheroid surface — Earth crust. The first source is mantle convection. Its upgoing branches are comprised by mantle superplumes from which the upper mantle flows spreads laterally. Downgoing convection branches are comprised by detached highly metamorphosed fragments of thickened continental lithosphere and partially by subducted slabs, submerged lower than transitional mantle layer (~410–680 km). Major of subduction zones are transformed to subhorizontal lenses at the transitional layer depth participating in upper mantle convection. Coupled with total mantle convection it defines plate tectonic processes and lithosphere density loose, bringing rise amplifying during mountain formation. The second source is outer core flows reflected in magnetic field inversions, which are more frequent during or before of major of tectonic activity phases (phases of compression and transpression deformations strengthen). Inversion frequency rises during neotectonic orogeny. It is supposed, that Earth core flows change its spheroid parameters, which brings to the appearance of volume forces, affecting almost immediately in geological time. Thus core flows contribute to global character of tectonic phases occurrences and synchronicity for superposition of modern mountain formation main phase with plate tectonic processes.

Keywords: mantle and upper mantle convection, orogenic phases and magnetic inversions correlation, global synchronicity of mountain formation periods