

Причины вертикальных движений земной коры

Е. В. Артюшков, А. Е. Шлезингер, А. Л. Яншин

В последние десятилетия все большее внимание геологи уделяют горизонтальным тектоническим движениям. Новая глобальная тектоника (концепция литосферных плит), согласно которой происходят значительные горизонтальные перемещения земной коры и дрейф континентов, широко завладела умами многих специалистов, работающих в области наук о Земле. Значительно меньше изучают вертикальные тектонические движения, которые практически не рассматриваются новой глобальной тектоникой и не находят в ней объяснения. Вместе с тем внутри литосферных плит именно вертикальные движения имеют доминирующее значение, они создают основные структурные элементы земной коры и рельеф ее поверхности. Лучше всего вертикальные движения изучены на континентах и во внутриматериковых морях. Поэтому в нашей статье речь пойдет именно об этих областях.

Причину вертикальных движений земной коры невозможно понять без знания строения глубоких земных недр и процессов, которые в них протекают. Основная характерная особенность внутреннего строения Земли — существование жидкого ядра, более плотного, чем окружающая его твердая нижняя мантия. Включения вещества ядра содержатся и в нижней мантии, но здесь они находятся в твердом состоянии. Изотерма плавления этого вещества проходит примерно вдоль границы ядро — мантия. По мере разогревания Земли в результате радиоактивного распада твердые включения вещества ядра в расположенном над ядром слое нижней мантии расплавляются. Это приводит к разрушению скелета породы нижней мантии и дифференциации материала по плотности. Более тяжелое вещество оседает в расплаве и присоединяется к жидкому ядру. После этого остающаяся смесь веществ оказывается легче расположенной

выше породы нижней мантии, которая еще содержит тяжелые включения вещества ядра. В результате конвективной неустойчивости эта смесь — легкий материал внедряется в вышележащие слои мантии.

Наиболее вероятно, что легким материалом, выделившимся за время жизни Земли на границе ядра и мантии, сложен верхний слой Земли примерно в 1000 км, т. е. в первом приближении — верхняя мантия. Расположенный ниже слой — нижняя мантия представляет собой еще не разделенное по плотности вещество Земли.

Подъем легкого материала в нижней мантии происходит, скорее всего, вдоль расположенных на значительном расстоянии друг от друга каналов с пониженной вязкостью. При подъеме легкого материала выделяется большая энергия, что приводит к его значительному дополнительному нагреву. Поэтому в верхнюю мантию легкий материал поступает с более высокой температурой по отношению к окружающим областям, заполненным поднявшимся сюда в предшествующие геологические эпохи и уже успевшим охладиться легким материалом.

Опуская рассмотрение процессов, связанных с движениями в мантии легкого материала, отметим, что над каналами его крупные массы, нагретые до температуры около 1300° С, должны подниматься до глубин 100—200 км. Эта температура примерно на 500° выше температуры вещества, расположенного на таких глубинах в областях, где подъема легкого материала не происходит. Поэтому его внедрение создает температурные неоднородности в верхней части мантии Земли. Поступающий сюда сильно нагретый легкий материал испытывает частичное плавление, сопровождающееся новой дифференциацией по плотности. Его наиболее легкие компонен-



Евгений Викторович Артюшков, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики Земли АН СССР. Занимается проблемами физики твердой Земли. Автор многих работ, посвященных происхождению движений в недрах Земли и на ее поверхности, в том числе монографии: Геодинамика. М., 1979. В «Природе» опубликовал статью «Что приводит в движение земную кору» (1973, № 10). Член редколлегии журнала «Природа».



Александр Ефимович Шлезингер, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института АН СССР. Специалист в области тектоники платформенных областей, осадочных чехлов морей и океанов. В «Природе» опубликовал статью «Черноморская впадина — глубочайший молодой провал на поверхности Земли» (1978, № 5).



Александр Леонидович Яшин, академик, заместитель директора Института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР (Новосибирск), заведующий лабораторией региональной тектоники Геологического института АН СССР. Автор фундаментальных работ по геологии молодых платформ. Главный редактор и автор тектонической карты Евразии. Президент Московского общества испытателей природы. Лауреат Государственных премий СССР. В «Природе» опубликовал статью «Как же образуются залежи солей?» (1978, № 7).

ты, всплывая, могут достигать нижней границы земной коры.

В тектонически активных областях непосредственно под корой действительно наблюдаются мощные линзы вещества мантии с сильно пониженными скоростями продольных сейсмических волн (7,2—7,8 км/с) и плотностью 3,1—3,3 г/см³. Это вещество называется аномальной мантией в отличие от относительно холодной нормальной мантии со скоростями 8,1—8,3 км/с и плотностью 3,35 г/см³, обычно расположенной под корой в стабильных областях. Аномальная мантия имеет температуру 1000—1200° С. Например, на западе США под корой мощностью около

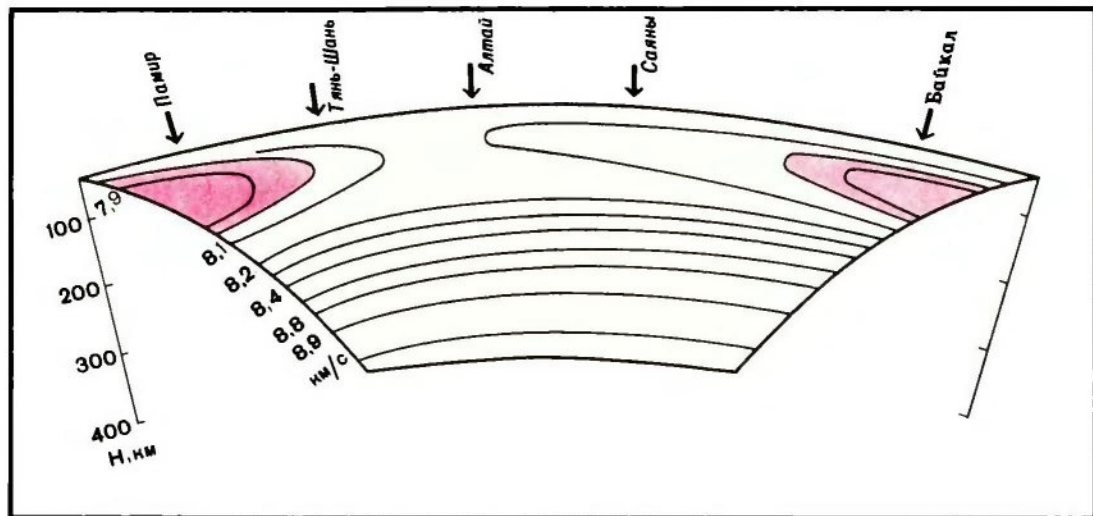
30—40 км находится слой аномальной мантии той же мощности. Крупные массы аномальной мантии расположены и под срединно-океаническими хребтами.

Как мы увидим ниже, с внедрениями легкого материала в верхнюю мантию связана тектоническая активность, проявляющаяся на поверхности Земли. Подъем легкого материала в нижней мантии должен быть прерывистым не только в пространстве, но и во времени. Он должен начинаться только после накопления легкого материала под нижней мантией в достаточно большом количестве. Таким образом можно объяснить существование тектонических циклов — резкую активизацию

тектонических движений с периодом около 200 млн лет.

В верхних слоях Земли, на глубинах в среднем от 100 до 200 км, в слое, названном астеносферой, вязкость резко понижается. Над этим слоем расположен литосферный слой, включающий в холодных стабильных областях кору и верхние, наиболее холодные и вязкие слои мантии. Аномальная мантия, быстро всплывая в астеносфере, подходит к гораздо более вязкой литосфере. Здесь скорость ее под-

ли, легкий материал накапливается, вытесняя находившееся здесь ранее менее нагретое и более плотное вещество астеносферы. Такие участки с повышенной температурой мантии играют роль «ловушек» для легкого материала. Напротив, участки с пониженной температурой мантии соответствуют понижениям подошвы литосферы. Легкий материал при своем движении стремится их обтекать. Такие погруженные участки подошвы литосферы играют роль «антиловушек».



Горизонтальные вариации скоростей продольных волн [цифры на изолиниях] под тектонически активной областью Центральной Азии. Эти вариации, скорее всего, связаны с неоднородным нагревом верхних слоев мантии.

ема резко падает. Аномальная мантия начинает растекаться вдоль нижней границы (подошвы) литосферы.

Мощность литосферы не постоянна. Вязкость мантии на небольших глубинах определяется в основном температурой, которая сильно изменяется в горизонтальном направлении. Поэтому изменяется и мощность литосферы. Она увеличивается под холодными и относительно стабильными платформенными областями до 100 км и резко понижается под сильно нагретыми тектонически активными областями до 20—30 км.

В областях, где подошва литосферы располагается ближе к поверхности Зем-

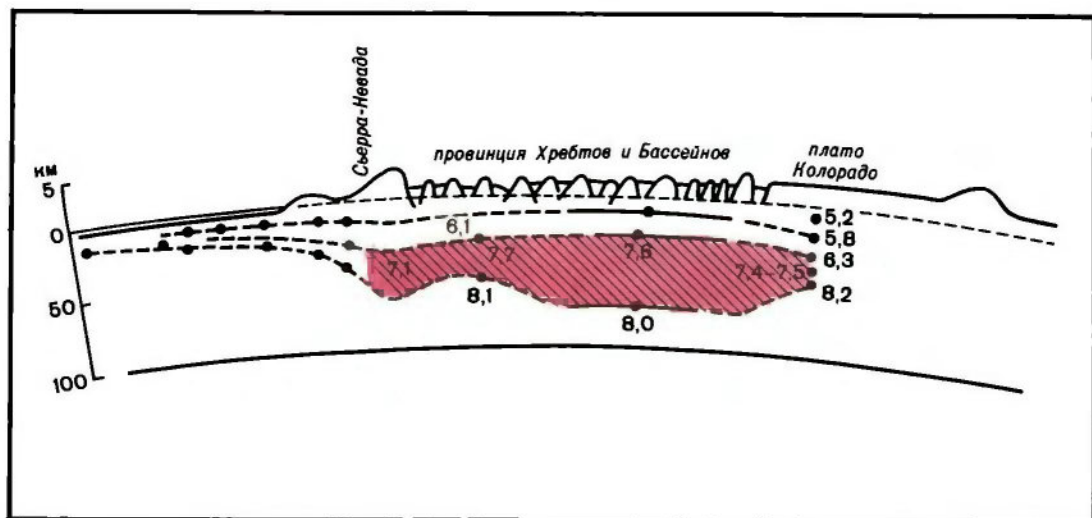
ля, вся континентальная кора или ее основная часть прошла через стадию горообразования, которая характеризуется интенсивной магматической активностью, а следовательно высокими температурами коры и мантии и пониженной мощностью литосферы. Поэтому под горным сооружением обычно существует крупная ловушка легкого мантийного вещества. После окончания горообразовательного процесса крупное поднятие на поверхности Земли сравнительно быстро разрушается. Однако кора и особенно мантия под ним сохраняют повышенную температуру еще в течение очень долгого времени. Как показывают расчеты, для охлаждения слоя до глубины около 100 км, соответствующей границе литосферы в платформенных областях, требуется время в 300—500 млн лет.

Литосфера вместе с аномальной мантией в ловушках плавает на подстилающей ее астеносфере, давление в которой примерно постоянно в горизонтальном

направлении. В период охлаждения материка в области ловушки под бывшим горным сооружением плотность верхних слоев мантии продолжает оставаться пониженной. Поэтому кора над ловушкой оказывается изостатически приподнятой по отношению к окружающей территории, и здесь существует структура типа кристаллического щита платформы. С течением времени температура верхних слоев мантии постепенно падает, а высота ловушки уменьшается. Одновременно возрастает

его потока. Таким образом, однажды образовавшись, ловушка оказывается способной себя поддерживать, захватывая все новые порции аномальной мантии.

Амплитуда поднятий территории над ловушкой определяется количеством и температурой захваченного в нее легкого материала. Если ловушка находится достаточно далеко от области подъема легкого материала, то в нее поступает его сравнительно небольшое количество и новый материал успевает заметно охладить-



Строение коры мантии под западной частью США. Заштрихована аномальная мантия. Цифрами обозначены скорости продольных волн.

плотность мантии и уменьшается высота территории по отношению к окружающим ее областям с холодной литосферой.

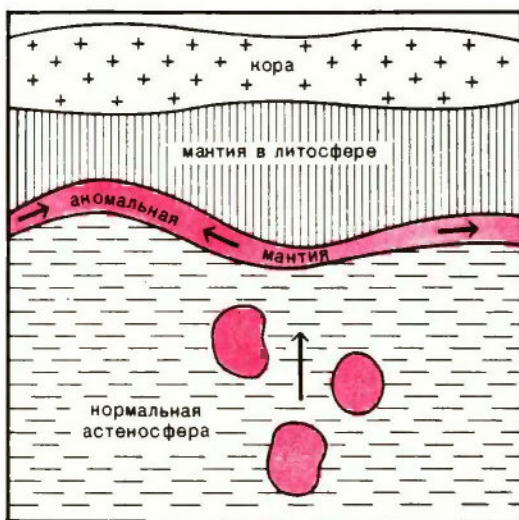
Высота ловушки под щитами соизмерима с мощностью расположенного над ней слоя мантии в литосфере. Поэтому захват в ловушку новых порций горячего материала — аномальной мантии — приводит к значительному прогреву литосферы и сокращению ее мощности на величину порядка высоты ловушки. В следующую эпоху подъема в мантию легкого нагретого материала процесс может повториться, если рассматриваемая ловушка вновь окажется не слишком удаленной (меньше или порядка 1000 км) от вертикального

ся при перетекании вдоль подошвы литосферы. В таких условиях на поверхности Земли поддерживается невысокое поднятие. При последовательном многократном поступлении в ловушку сравнительно небольшого объема легкого материала образуются длительно живущие кристаллические щиты-платформы типа Балтийского или Канадского.

Если структура типа кристаллического щита с крупной ловушкой расположена вблизи области подъема из глубины аномальной мантии, то она захватывает ее сильно нагретой и в большом количестве, что немедленно сопровождается образованием значительного изостатического поднятия. Одновременно начинается интенсивное прогревание вышележащего слоя мантии в литосфере, которое сильно понижает его вязкость. Когда последняя снижается до значения 10^{22} — 10^{23} пауз, то аномальная мантия получает возможность сравнительно быстро, за время 10^6 — 10^7 лет, вытеснить расположенное над

ней более тяжелое вещество мантии за счет конвективной неустойчивости. В результате аномальная мантия подходит вплотную к коре, а вещество мантии, ранее находившееся в литосфере, вытесняется вниз и в стороны, постепенно прогреваясь и приобретая характерную для астеносферы температуру.

Над линзой горячей мантии с температурой 1000—1200° С раздел астеносферы и литосферы сильно поднимается и располагается в пределах земной коры,



Растекание аномальной мантии вдоль подошвы литосферы [стрелками показано направление движения мантии].

поэтому ловушка достигает большой высоты. Это приводит к образованию высокого поднятия, изостатически скомпенсированного мощным слоем легкого материала. Типичным примером может служить указанная выше обширная зона поднятий в западной части Северной Америки. Мощность коры здесь не превышает нормальных для платформенных областей значений, несмотря на то, что абсолютная высота территории в среднем равна 2—2,5 км. Это означает, что практически все поднятие изостатически скомпенсировано слоем аномальной мантии. В ряде районов мощность коры здесь снижается до 30 км и менее, при этом мощность слоя аномаль-

ной мантии соответственно возрастает.

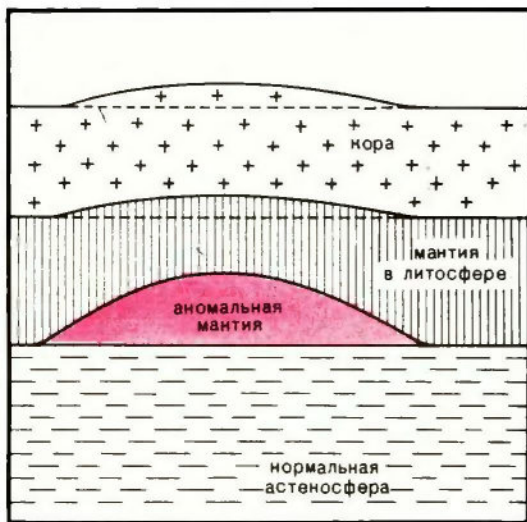
Ряд современных горных сооружений сформировался на платформах в области кристаллических щитов, образовавшихся на месте ранее существовавших здесь горных сооружений. Высота щитов постепенно уменьшается во времени, и иногда они перекрываются небольшим осадочным чехлом. Затем в эпоху оживления восходящих движений некоторые щиты испытывают поднятия, превращаясь в так называемые области тектонической активизации.

Так, например, на месте Тянь-Шаня в палеозое существовали складчатые горные сооружения, формирование которых закончилось около 220 млн лет назад. После сглаживания рельефа здесь существовал щит, к олигоцену (40 млн лет назад) постепенно погружившийся и местами перекрытый осадками мощностью до нескольких сотен метров. Около 25 млн лет назад территория начала подниматься. В плиоценовое и четвертичное время, за последние 5—7 млн лет, здесь в результате преимущественно вертикальных движений сформировался высокогорный рельеф. Таким образом, после прекращения палеозойского горообразовательного процесса под бывшими горами на месте современного Тянь-Шаня сохранилась ловушка, которая была заполнена аномальной мантией в следующую эпоху быстрого подъема легкого материала с границы ядро — мантия. Такие же ловушки существовали и под другими современными областями тектонической активизации.

Горные области могут включать также глубоко погруженные холодные участки с резко повышенной мощностью литосферы. Если подошва литосферы в них оказывается ниже подошвы слоя аномальной мантии под соседними горными областями, то такие участки в поднятие не вовлекаются. К подобным структурам, по-видимому, относятся Ферганская и Джунгарская депрессии. Они испытывают быстрое изостатическое погружение за счет накопления большого количества осадков, сносимых со смежных горных хребтов. Эти участки превращаются в межгорные и предгорные впадины.

Осадочные бассейны на платформах образуются на месте бывших кристаллических щитов. Как отмечалось выше, щиты существуют в приподнятом по отношению к соседним областям положении в связи с периодическим поступлением легкого материала в ловушки на нижней границе литосферы. Если, однако, в какую-то эпо-

ху ловушка оказывается очень далеко от источника легкого материала, то она его совсем не захватывает или захватывает в малых количествах. В таком случае поднятие коры и прогрев литосферы оказываются выраженными в меньшей степени или вообще не происходят. В связи с понижением температуры верхних слоев мантии ловушка уменьшается. Соответственно, в следующий раз, если она и захватывает легкий материал, то уже в меньшем количестве, которого для поддержания



Поднятие литосферы в области кристаллического щита над ловушкой, заполненной аномальной мантией.

высокого стояния поверхности Земли оказывается недостаточно. После этого начинается прогрессирующее уменьшение высоты ловушки, а следовательно увеличение мощности литосферы. Когда на месте бывшей ловушки подошва литосферы прогибается, легкий нагретый материал начинает обтекать ее прогнутый участок. В результате такие структуры остаются все время холодными и поэтому также оказываются самоподдерживающимися.

По мере охлаждения вещества в ловушке ее плотность увеличивается, что приводит к сжатию литосферы и образованию на поверхности Земли депрессии, глубина которой равна величине сжатия

этого слоя. Заполнение депрессии осадками увеличивает нагрузку на литосферу и сопровождается ее изостатическим погружением до глубины, примерно в четыре раза превышающей глубину начальной депрессии. Общая глубина осадочного бассейна при уплотнении аномальной мантии на величину до $0,2-0,3 \text{ г/см}^3$ и высоте ловушки в $20-30 \text{ км}$ может достигнуть $5-8 \text{ км}$.

Согласно современным представлениям, нижний базальтовый геофизический слой коры состоит главным образом из пород основного состава. При низких давлениях или высоких температурах их устойчивому состоянию соответствует группа минералов, образующая габбро с плотностью $2,9-3,0 \text{ г/см}^3$. При повышении давления или понижении температуры устойчивой становится группа минералов, имеющая тот же средний химический состав, но соответствующая другой породе — эклогиту с более высокой плотностью — $3,5-3,6 \text{ г/см}^3$.

Давление в «базальтовом» слое на глубинах в среднем от 20 до 40 км равно $5-11 \text{ кбар}$, а температура в нем $300-500^\circ \text{C}$. В этих условиях стабильными являются близкие к эклогиту породы с высокой плотностью. Однако при таких температурах переход к таким плотным породам идет крайне медленно, за время, равное или превышающее 10^9 лет. Поэтому связанное с ним утяжеление коры растягивается на огромное время.

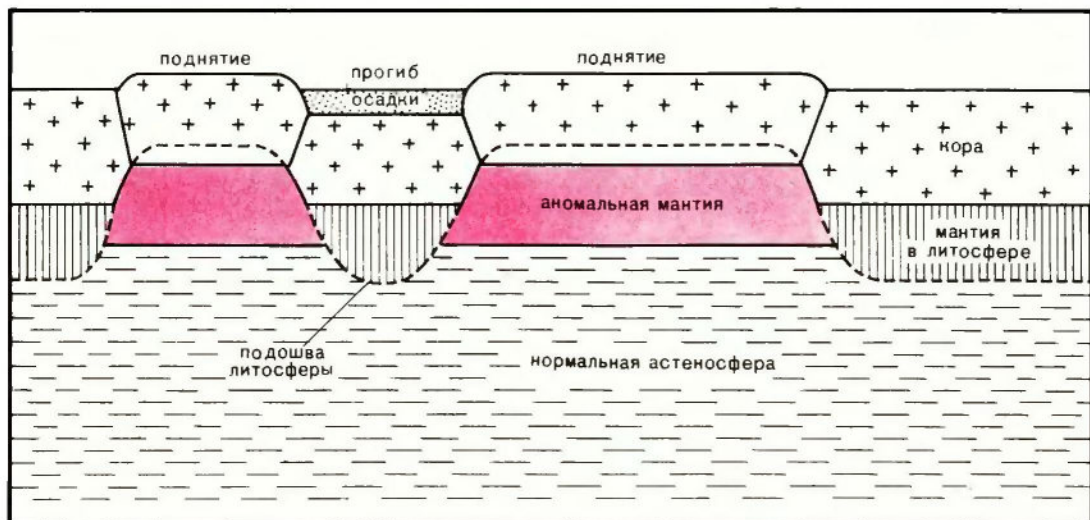
Сейсмические исследования обнаруживают во многих платформенных областях в нижних частях коры слой мощностью в $10-15 \text{ км}$ со скоростями продольных сейсмических волн $7,1-7,3 \text{ км/с}$. Такие скорости скорее характерны не для базальта, а для гранатового гранулита с плотностью $3,1-3,2 \text{ г/см}^3$. В ряде районов, особенно под глубокими впадинами, в нижних частях коры наблюдаются еще более высокие скорости — $7,4-7,6 \text{ км/с}$. Такие скорости должны быть характерны для гранатового гранулита с плотностью $3,3-3,4 \text{ г/см}^3$.

Уплотнение базальта при переходе в гранатовый гранулит на величину $0,2-0,3 \text{ г/см}^3$ в слое толщиной в $10-15 \text{ км}$ вызовет сжатие коры на $0,7-1,5 \text{ км}$, что, в свою очередь, обусловит образование заполненного осадками бассейна глубиной до $3-6 \text{ км}$.

Особенно значительное погружение вызывается переходом самой нижней ча-

сти базальтового слоя коры в эклогит. Такой переход в 8-километровом слое дает сжатие коры на 1,2—1,4 км. Глубина образующегося при этом осадочного бассейна в 5—6 км близка к мощности слоя, испытывающего переход в эклогит. Наиболее типичные скорости продольных волн в эклогите — 8,2—8,3 км/с — близки к скорости в расположенной в большинстве стабильных областей под корой мантии перидотитового состава. Поэтому отличить под

При поступлении к подошве литосферы очень крупных масс сильно нагретой аномальной мантии она может не только заполнить ловушки, но и расположиться достаточно мощным слоем под областями понижений подошвы литосферы. Прогревая мантию в литосфере, аномальная мантия делает ее менее вязкой, вытесняет более холодное и плотное вещество мантии из литосферы и приходит в непосредственное соприкосновение с базальтовым



Стена поднятий и прогибов, возникших в результате подхода к коре аномальной мантии. Поднятия изостатически скомпенсированы слоем аномальной мантии. Между ними возникают прогибы с мощной литосферой.

корой эклогит от перидотита сейсмическими методами очень трудно.

Общее прогибание территории при переходе от щитов к осадочным бассейнам может определяться каким-либо из описанных процессов либо их совместным действием. В сумме они способны обеспечить компенсированное осадконакоплением погружение коры до 15—18 км. Судя по повышению скоростей в нижних частях коры под некоторыми кристаллическими щитами, уплотнение ее нижнего слоя начинается еще на стадии их высокогорного стояния. Однако погружения здесь не происходит в связи с наличием в ловушке легкого материала.

слоем коры. При этом базальты нижних частей коры начинают нагреваться.

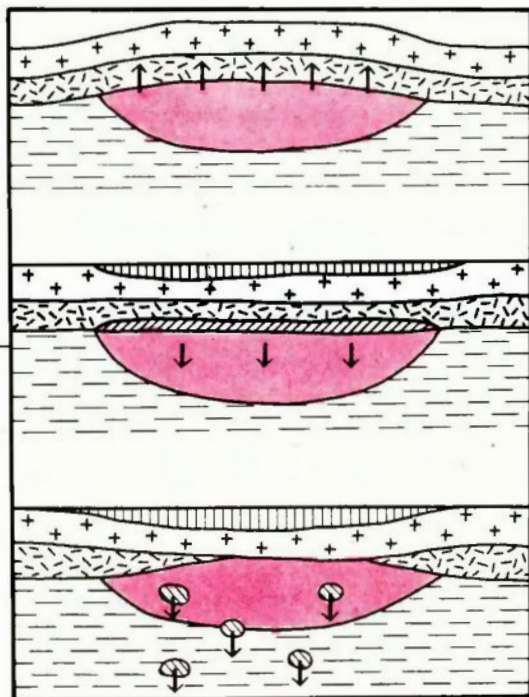
Скорость фазового перехода габбро — эклогит, как указывалось выше, очень низкая при температурах 300—500° С, типичных для нижних частей коры на платформах. С ростом температуры она резко увеличивается, примерно на один порядок величины на каждые 100°. Когда температура поднимается до 800° С, характерное время перехода снижается до 10⁶ лет, а увеличение плотности при переходе еще является значительным. При достижении таких температур в базальтовом слое развивается быстрый, с геологической точки зрения, переход базальта в гранатовый гранулит, а затем в эклогит.

Быстрое увеличение плотности в базальтовом слое коры возможно лишь в узком интервале температур (800—1000° С), когда фазовый переход уже происходит с большей скоростью, но еще приводит к значительному уплотнению породы. С дальнейшим повышением температуры уплотнения базальта уже практи-

чески не происходит. Такие условия могут осуществляться при проникновении аномальной мантии к коре в холодных платформенных областях, особенно под осадочными бассейнами с мощной литосферой. Охладившись во время вытеснения холодной мантии из литосферы, аномальная мантия должна подходить к коре, нагретой на несколько сотен градусов ниже, чем под областями тектонической активизации. Блоки плотного гранатового гранулита и эклогита, образовавшиеся в местах контакта с корой легкой нагретой мантии, отрываются от коры и тонут в аномальной мантии с низкой вязкостью. В результате аномальная мантия приходит в контакт с новыми частями базальтового слоя, которые также испытывают фазовый переход, отрываются от коры и тонут в мантии. По мере погружения гранатового гранулита, с увеличением давления он переходит в эклогит с плотностью $3,5-3,6 \text{ г/см}^3$, более плотный, чем нормальная мантия в астеносфере. Эклогит погружается в астеносферу и накапливается у ее подошвы.

В результате описанного процесса от коры отрывается мощный слой, соответствующий всему базальтовому слою или его нижней части. Ставшая более тонкой кора испытывает быстрое изостатическое погружение. Глубина образующегося при этом морского бассейна может быть легко определена из условия изостатического равновесия. При мощности эклогитизированного слоя базальта в 20 км , его начальной плотности в $2,9 \text{ г/см}^3$, мощности слоя аномальной мантии в 20 км и ее плотности в $3,25 \text{ г/см}^3$ глубина морского бассейна достигнет 3 км . При более значительной начальной мощности базальтового слоя в 30 км , что соответствует более резкому сокращению мощности консолидированной коры, глубина возникшего бассейна увеличится до 5 км . Морской бассейн постепенно заполняется осадками, под тяжестью которых кора продолжает погружаться. Погружение увеличивается также при охлаждении и уплотнении аномальной мантии. Существование, что погружению территории всегда предшествует поднятие. Оно возникает в то время, когда аномальная мантия подходит к подошве литосферы и сохраняется на стадии ее проникновения к коре.

В качестве типичного примера глубоководного бассейна рассмотрим Южно-Каспийскую впадину. Мощность осадков в ней достигает $20-25 \text{ км}$. Из них нижние 10 км осадков накопились по крайней мере с юры, а возможно и с палеозоя, т. е. за



Последовательные стадии процессов, приводящих к образованию глубоководного бассейна внутреннего моря при поступлении аномальной мантии к холодной коре континентальной платформы.

Вверху — поднятие в момент подхода к коре аномальной мантии; в середине — погружение при переходе части базальтового слоя в более плотные гранатовый гранулит и эклогит; внизу — отрыв эклогитизированного базальтового слоя и образование глубоководного бассейна.



время более 150 млн лет, а верхний слой мощностью до 15 км образовался со среднего плиоцена, за последние 4—5 млн лет. До новейшего погружения на месте Южного Каспия существовал платформенный осадочный бассейн, т. е. мощность консолидированной коры здесь должна была быть нормальной для платформ. В настоящее время под Южным Каспием она сократилась до 10—12 км. Незадолго до начала погружения по периферии платформы зафиксировано поднятие. Поэтому и глубоководная часть Южно-Каспийской впадины также, скорее всего, была приподнятой. Для описываемой области характерен чрезвычайно сильный разогрев верхних слоев мантии. Слой повышенной электропроводности под Южно-Каспийской впадиной поднимается до глубины 40—60 км, на ее периферии опускается на глубину 100—120 км, а под расположенной к северу от Кавказа Скифской плитой погружается до 200—300 км. Температуру на нижней границе коры оценивают примерно в 600—1000° С (точно определить ее при наличии толстого слоя осадков сложно).

Таким образом, для рассматриваемой области характерны все признаки быстрого погружения коры за счет фазового перехода базальта в эклогит: начальная платформенная стадия развития, последующее поднятие территории, сменяющееся резким погружением, уменьшение мощности консолидированной коры и сильный разогрев мантии. В глубоководной части Южного Каспия под осадками залегают породы с «базальтовыми» скоростями сейсмических волн — 6,8—6,9 км/с мощностью в 10—12 км. Гранитный геофизический слой здесь отсутствует. Это может быть связано с метаморфическими реакциями в «гранитном» слое при контакте с горячей аномальной мантией, значительно изменяющими скорости упругих волн.

Длительность и однонаправленность вертикальных движений во многих областях связаны с большой продолжительностью существования неровностей подошвы литосферы. Поднятия этой границы — ловушки — периодически захватывают легкий материал, и расположенные над ними области испытывают восходящие движения. Прогибы подошвы литосферы — антиловушки — обычно обтекаются легким материалом, а расположенные над ними области остаются холодными и испытывают погружение.

Характер вертикальных движений изменяется, когда изменяется структура неоднородностей на подошве литосферы. Так, если ловушка на платформе долгое время не получает притока легкого материала и вместе с ним тепла, то на ее месте образуется антиловушка. При этом испытывающий поднятие кристаллический щит превращается в погружающийся осадочный бассейн.

При поступлении под кору аномальной мантии в области образования внутреннего моря вытесняется ранее существовавшая под осадочным бассейном холодная мантия в литосфере. Вместе с ней исчезают и неоднородности мощности литосферы, что приводит на время к прекращению развития структур более высокого порядка внутри осадочного бассейна.

Неоднородности мощности литосферы при больших горизонтальных перемещениях литосферных плит сохраняются. Поэтому, несмотря на смещения последних на тысячи километров, связанные с этими неоднородностями однонаправленность и длительность вертикальных движений также сохраняются. Подъем из глубины легкого материала происходит в различных областях Земли. Если при дрейфе литосферных плит ловушки оказываются недалеко от восходящих потоков легкого материала, то они вновь его захватывают, а прогибы подошвы литосферы легкий материал продолжает обтекать. Таким образом, однонаправленный характер и длительность вертикальных движений коры во многих областях не противоречат дрейфу континентов.