

УДК 551.4 : 550.367 (571.5)

Ю. А. З О Р И Н

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ЭПОХ ВЫРАВНИВАНИЯ РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ)

Эпохи выравнивания рельефа рассматриваются как интервалы времени, в которые происходит охлаждение земных недр, сопровождающиеся исчезновением астеносферного слоя и нарушениями изостазии.

Как известно, в геологической истории Земли периоды тектонической активности чередуются со сравнительно продолжительными паузами, во время которых на обширных и разнородных по своим структурным особенностям территориях формируются поверхности выравнивания типа пенепленов. Примером может служить позднемеловая — палеогеновая тектоническая пауза, проявившаяся на громадной площади Восточной Сибири. Ее продолжительность 60—70 млн. лет. Возникшая в это время денудационная поверхность выравнивания обнаруживается и на стабильной Сибирской платформе (Логачев и др., 1964), и в Саяно-Байкальской складчатой области, где в юре существовал горный рельеф (Флоренсов, 1960), и в Забайкалье, для которого в эпохи поздней юры и раннего мела был характерен чрезвычайно высокий уровень тектонической активности (Уфимцев, 1971).

В настоящее время установлено, что достаточно крупные элементы морфоструктуры Земли (такие, как горные системы и разделяющие их впадины) находятся в состоянии, близком к изостатическому равновесию. В рифтовых зонах и в областях островных дуг изостазия, видимо, осуществляется по сложным схемам с участием плотностных неоднородностей мантии. Для большинства же континентальных областей горообразования характерна приближенная изостатическая уравновешенность по схеме Эри, согласно которой блоки земной коры как бы плавают в мантии, т. е. под крупными хребтами кора имеет повышенную толщину, образуя «корни гор», а под невысокими равнинами она относительно тонка.

Основываясь на этих фактах, некоторые исследователи полагают, что поверхности выравнивания на обширных территориях могут образовываться только тогда, когда «выравнивается» и раздел Моховичича, т. е. наряду с контрастами высот рельефа исчезают и контрасты в мощности земной коры (Николаев, 1962; Грачев, 1968). Они, очевидно, правы в тех случаях, когда речь идет об образовании платформ, остающихся относительно стабильными в течение нескольких геотектонических циклов. Однако вряд ли эта точка зрения может быть принята для всех тех областей, в которых после эпохи выравнивания возрождается горный рельеф.

Актуалистический подход к анализу явлений геологической истории предполагает существование в прошлом условий, аналогичных современным. В настоящее время на всей Земле продолжается этап новейшей (неоген-четвертичной) активизации и интенсивность тектонических дви-

жений в целом относительно высока. Перенос существующих соотношений между поверхностной и глубинной структурами на столь же активные этапы геологического прошлого вполне оправдан, но есть основания полагать, что в эпохи тектонического покоя состояние глубоких недр, а следовательно, и условия «плавления» коры на мантии, отличались от современных.

Рассмотрим данные, позволяющие делать последний вывод. Геологи издавна связывают высокую тектоническую активность с разогревом земных недр, так как явления метаморфизма и магматизма, указывающие на высокие геотермические градиенты, характерны именно для подвижных областей (Белоусов, 1962, 1966). В последние годы появились новые геофизические данные, существенно уточняющие и дополняющие представления о связи тектонической активности с температурным режимом земной коры и верхней мантии. По результатам интерпретации материалов магнитотеллурического зондирования обнаружено, что земные недра Саяно-Байкальской области интенсивного горообразования разогреты в значительно большей степени, чем недра относительно стабильной Сибирской платформы (Булмасов и др., 1968; Горностаев и др., 1970). Это подтверждается и определениями теплового потока через поверхность Земли (Любимова, 1968). Забайкальская же область змеренного горообразования по температуре верхней части мантии занимает промежуточное положение между двумя названными регионами.

Таким образом, интенсивность горообразования тем выше, чем больше разогреты глубокие земные недра. Основываясь на столь очевидной закономерности, можно полагать, что длительные тектонические паузы соответствуют эпохам относительного охлаждения верхней мантии. Очевидно, в эти эпохи температурные градиенты на обширных территориях были даже меньшими, чем на современных платформах, так как на последних все же обнаруживаются довольно значительные деформации базисных поверхностей выравнивания.

Наблюдаемая в настоящее время приближенная изостатическая уравновешенность крупных морфоструктур объясняется тем, что даже в тектонически активных регионах скорость движений, восстанавливающих изостазию, значительно превышает скорость протекания глубинных процессов, изменяющих структуру коры и верхней мантии. Общие темпы развития тектонически активных областей определяются главным образом подобными глубинными процессами, поэтому в этих районах скорость собственно изостатических движений оценить невозможно. Такие оценки могут быть сделаны в областях недавних оледенений. В результате детальных исследований поднятия Фенноскандии обнаружено, что после снятия ледниковой нагрузки максимальная скорость изостатических движений, достигающая 10 см/год , была характерна для блоков с размерами около 100 км . Средняя скорость воздымания более обширных районов была значительно меньшей (Артюшков, 1967). Подобное явление может наблюдаться в том случае, если изостатическое выравнивание осуществляется в основном за счет перетекания вещества в астеносферном слое, кровля которого располагается на глубине около $50\text{—}80 \text{ км}$, а подошва — на глубине $200\text{—}350 \text{ км}$. Динамическая вязкость вещества этого слоя оценивается в $10^{20}\text{—}10^{21}$ пуаз (Артюшков, 1967). Земная кора и самая верхняя часть мантии, расположенная над астеносферой, обычно объединяются в литосферу. Судя по тому, что горные хребты (и, очевидно, им соответствующие «корни») в условиях высокой тектонической активности существуют не менее $10^6\text{—}10^7$ млн лет, динамическую вязкость литосферы можно оценить не ниже, чем в $10^{26}\text{—}10^{27}$ пуаз (Магницкий, 1965).

Причиной возникновения астеносферного слоя является либо частичное плавление, либо частичная аморфизация вещества мантии под действием высокой температуры (Гутенберг, 1963; Магницкий, 1968).

Именно в интервале глубин, соответствующих этому слою, кривая изменения температуры наиболее близко подходит к графику зависимости температуры плавления мантии от давления (глубины). Видимо, достаточно сравнительно небольшого уменьшения температуры для того, чтобы здесь произошла полная кристаллизация вещества и его вязкость стала сопоставимой с вязкостью литосферы. Последнее означает исчезновение астеносферы.

Выше отмечалось, что именно эпохи тектонического покоя характеризуются охлаждением земных недр. Увеличение вязкости вещества на глубине астеносферного слоя на пять-шесть порядков приведет к резкому ухудшению условий плавления литосферы на мантии. Кора как бы «вмерзнет» в мантию. Точнее, скорость движений, восстанавливающих изостазию, уменьшится также на пять—шесть порядков, так как она обратно пропорциональна вязкости слоя, в котором происходит перетекание вещества (Артюшков, 1967). Если принять в качестве исходного приведенное выше максимальное значение скорости изостатического воздымания отдельных районов Фенноскандии, то скорость аналогичных движений в эпохи тектонического покоя можно оценить в 10^{-3} — 10^{-4} мм/год. Приведенные величины гораздо меньше скорости денудационного понижения рельефа, которая, судя по оценкам по твердому стоку, составляет 0,025—0,075 мм/год (Ritter, 1967). В подобных условиях горный рельеф будет уничтожен денудацией, а «корни гор» сохранятся, т. е. изостазия будет нарушена. При повторном разогреве земных недр в эпоху очередной тектонической активизации, когда вновь возникнет слой пониженной вязкости, скорость изостатических движений возрастет и древние морфоструктуры будут возрождены при условии, если новые тектонические процессы не приведут к радикальной перестройке земной коры.

Примером подобной последовательности геологических событий может служить развитие в позднем мезозое и кайнозое Забайкальской области умеренного горообразования. В настоящее время здесь выделяются крупные новейшие сводовые поднятия: Даурское, Олекминско-Становое и Ундино-Газимурское. Они разделены обширными междусводовыми пространствами (негативными структурными формами первого порядка). В пределах последних преобладают структурные формы второго порядка: линейно-вытянутые впадины забайкальского типа (Флоренсов, 1960) и разделяющие их невысокие поднятия. Во время новейшего тектонического этапа в Забайкалье наиболее активно проявились поднятия. Участки земной коры, соответствующие депрессиям, опускались лишь относительно, отставая в воздымании от смежных территорий. Об этом свидетельствует чрезвычайно малая мощность кайнозойских отложений во впадинах забайкальского типа.

Крупные морфоструктуры Забайкалья в первом приближении близки к состоянию изостатического равновесия по схеме Эри. Здесь отмечают лишь незначительные отклонения от изостазии, выражающиеся в том, что крупные сводовые поднятия несколько перекомпенсированы — мощность земной коры под ними на 1,5—2 км больше, чем это требуется по условию полного равновесия (Зорин, 1971). Продолжающееся слабое воздымание этих районов (Зорин, Сизиков, 1965) находится в соответствии с направлением сил, стремящихся привести земную кору в состояние равновесия. Очевидно, изостатические движения играли весьма существенную роль в развитии крупных сводовых поднятий Забайкальской области умеренного горообразования.

Другой важной особенностью рассматриваемого региона является унаследованность новейших структурных форм от позднемезозойских. Неоген-четвертичные сводовые поднятия возникли на месте позитивных форм, существовавших в поздней юре-раннем мелу (Флоренсов, 1960). Кроме этого, в Забайкалье установлена тесная корреляционная связь

между средними значениями современной мощности земной коры в крупных зонах и интенсивностью проявления позднемезозойского (преимущественно позднеюрского) гранитоидного магматизма (Зорин, 1967). Как известно, формирование гранитоидных интрузивных комплексов связывается с процессом увеличения мощности земной коры. Поэтому можно полагать, что в эпохи поздней юры-раннего мела районам новейших поднятий, где преимущественно и развиты позднемезозойские гранитоиды, соответствовали утолщения земной коры, подобные тем, которые существуют здесь в настоящее время. Следовательно, в эти тектонически активные эпохи также соблюдалась изостазия.

Возникает вопрос: образовались ли «корни» новейших сводовых поднятий заново после позднемеловой — палеогеновой эпохи выравнивания, разделяющей позднемезозойский и неоген-четвертичный этапы тектонического развития Забайкалья, либо они просто сохранились с поздней юры — раннего мела? Повторное возникновение утолщений земной коры на тех же самых местах, по сути дела, требует повторения глубинных процессов, изменяющих мощность коры. О сходстве или различии таких процессов можно в какой-то степени судить по магматизму. В поздней юре-раннем мелу в Забайкалье имела место поздняя (орогенная) стадия развития мезозойской подвижной области (Зорин, 1967). Для этого времени был характерен гранитоидный интрузивный магматизм и сравнительно разнообразный по составу вулканизм с некоторым преобладанием андезитов. Только в конце раннего мела, когда поверхностная (и, очевидно, глубинная) структура была в общих чертах уже сформирована, состав эффузивов изменился до основного, а объем излияний резко сократился. Неоген-четвертичная тектоническая активизация на большей части территории Забайкалья сопровождалась лишь незначительным по объему базальтовым вулканизмом. Таким образом, геологические материалы не дают оснований предполагать, что в новейшее время повторились глубинные процессы, протекавшие в поздней юре-раннем мелу.

По-видимому, существующая в настоящее время в Забайкалье глубинная структура земной коры в своих общих чертах сформировалась в орогенную стадию развития мезозойской подвижной области, когда магматические явления были особенно интенсивными. Если это так, то мы вынуждены признать, что в позднемеловую — палеогеновую тектоническую паузу сравнительно выровненный рельеф этой территории не соответствовал её сложному глубинному строению, т. е. изостазия была нарушена. В. Д. Любалин (1966) полагает, что в это время изостазия нарушалась какими-то активными эндогенными силами. Однако, как представляется автору настоящего сообщения, нет необходимости прибегать к столь искусственным построениям. Нарушения равновесия были связаны, видимо, с охлаждением мантии и с исчезновением астеносферного слоя. В неоген-четвертичное время произошёл новый разогрев земных недр и вновь возник слой пониженной вязкости. В связи с улучшением условий плавления коры на мантии резко увеличилась скорость движений, восстанавливающих изостазию, и на месте древних утолщений земной коры выросли сводовые поднятия. Последние продолжают развиваться и в настоящее время, хотя глубинная структура коры в рассматриваемом районе существенным образом не изменяется, на что указывает его невысокая сейсмичность. Продолжающееся воздымание этих участков земной коры связано, очевидно, с их разгрузкой в результате интенсивного денудационного среза.

Подобное объяснение природы новейших движений пригодно только для областей слабого и умеренного горообразования, структурные формы которых обнаруживают унаследованность от структурных форм предыдущего активного этапа развития. Оно, разумеется, не может быть принято для областей интенсивного горообразования, наложенных на

древние складчатые области и характеризующихся высокой сейсмичностью. В таких регионах в новейшее время происходила радикальная перестройка земной коры. Примером может являться Байкальская рифтовая зона, структурные формы которой начали свое развитие только в кайнозое.

В целом же на основании всего изложенного выше можно полагать, что чередование тектонически активных эпох, во время которых формируется горный рельеф, с эпохами выравнивания связано с периодическими разогревами и охлаждениями земных недр. Собственно говоря, эта идея вытекает уже из представлений о цикличности развития земной коры.

До недавнего времени, когда рассматривались лишь чрезвычайно упрощенные тепловые модели Земли, считалось, что распад радиоактивных элементов, являющийся, видимо, основным источником тепловой энергии, не может обеспечить периодического разогрева и охлаждения верхней мантии. Это, в частности, являлось одним из основных возражений против известной геотектонической гипотезы Джолли (Белоусов, 1962). Для объяснения периодичности тектогенеза делались предположения о возможности экзотермических и эндотермических полиморфных превращений в слое Голицына (Белоусов, 1966). Однако возможность таких превращений ничем не доказана.

В 1970 г. опубликована чрезвычайно интересная работа Е. А. Любимовой, в которой приводятся результаты численных экспериментов на ЭВМ над уравнением теплопроводности для усложненных моделей Земли. Оказалось, что при генерации тепла рассеянными радиоактивными элементами наиболее вероятной областью плавления в верхней мантии является слой на глубинах от 100 до 400 км. По своему положению он приблизительно соответствует астеносфере. Если в этом слое будет осуществляться конвективное перемешивание вещества, то он со временем будет перемещаться вверх (излишки тепла с нижней границы транспортируются к верхней, подплавляя ее, а относительно холодное вещество из верхних его частей опускается вниз и кристаллизуется). Нижняя граница в конце концов догоняет верхнюю и слой исчезает. В нижних слоях начинает накапливаться тепловая энергия, вновь достигается температура плавления и весь процесс повторяется. «Возникают циклы расходования и накопления энергии» (Любимова, 1970, стр. 7), т. е. циклы разогрева и охлаждения верхних частей мантии, циклы образования и исчезновения астеносферы. При отношении коэффициента эффективной теплопередачи в слое расплава к коэффициенту теплопроводности в окружающей среде, равному 10, продолжительность одного полного цикла составляет 140—170 млн. лет (Любимова, 1970), что вполне сопоставимо с длительностью геотектонических циклов, в которые следует включать эпохи тектонической активизации и эпохи выравнивания.

Таким образом, новые данные о термике верхней мантии не противоречат представлениям об эпохах выравнивания рельефа как об интервалах времени, в которые происходит охлаждение земных недр, сопровождающееся исчезновением астеносферного слоя либо, по крайней мере, резким увеличением вязкости его вещества, что во многих регионах может привести к нарушениям изостазии.

ЛИТЕРАТУРА

- Артюшков Е. В. Об установлении изостатического равновесия земной коры.— Изв. АН СССР. Сер. физика земли, № 1, 1967.
Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. Госгеолтехиздат, 1962.
Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. «Наука», 1966.
Булмасов А. П., Горностаев В. П., Мандельбаум М. М., Поспеев В. П., Савинский К. А. Глубинные магнитотеллурические зондирования в Прибайкалье.— В сб.: Байкальский рифт. «Наука», 1968.

- Горностаев В. П., Михалевский В. И., Поспеев В. П. Глубинные магнитотеллурические зондирования на юге Сибирской платформы и в зоне Байкальского рифта.— Геол. и геофиз., № 4, 1970.
- Грачев А. Ф. К вопросу о корнях гор.— Вестн. Ленингр. гос. ун-та, № 12, 1968.
- Гутенберг Б. Физика земных недр. М., изд-во иностр. лит., 1963.
- Зорин Ю. А. О тектонике Восточного и Центрального Забайкалья в позднем мезозое.— Геотектоника, № 1, 1967.
- Зорин Ю. А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. «Наука», 1971.
- Зорин Ю. А., Сизиков А. И. О возникновении и развитии Даурского свода (Центральное Забайкалье).— Вестн. научн. инф. Забайкальского отд. географ. о-ва СССР, № 2, 1965.
- Логачев Н. А., Ломоносова Т. К., Климанова В. М. Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра. «Наука», 1964.
- Любалин В. Д. Особенности тектонического развития Забайкалья в посленижнемеловой период.— В сб.: Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья, вып. 1(3). Чита, 1966.
- Любимова Е. А. Тепловая аномалия в области Байкальского рифта.— В сб.: Байкальский рифт. «Наука», 1968.
- Любимова Е. А. Тепловые потоки и динамика земных недр.— Изв. АН СССР. Сер. физика земли, № 5, 1970.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. «Недра», 1965.
- Магницкий В. А. Слой низких скоростей верхней мантии Земли. «Наука», 1968.
- Николаев Н. И. Нестектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. Госгеолтехиздат, 1962.
- Уфимцев Г. Ф. Древняя поверхность выравнивания на юге Забайкалья.— Геоморфология, № 1, 1971.
- Флоренсов Н. А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1960.
- Ritter D. F. Rates of denudation. J. of Geol. Educ., v. 15, No. 4, 1967.

Институт земной коры
СО АН СССР

Поступила в редакцию
28.VIII.71

THE GEOPHYSICAL ASPECTS OF THE PROBLEM OF RELIEF PLANATION EPOCHS (ILLUSTRATED BY EAST SIBERIA)

Yu. A. ZORIN

Summary

The author suggests that the epochs of relief planation should be considered as intervals of time when the cooling of the Earth's interior takes place, accompanied by disappearance of the asthenospheric layer and by disturbances of the isostasy. The recent data on the heat budget of the Earth do not exclude the possibility of a periodical formation and disappearance of the asthenospheric layer.
