

ИЗОСТАЗИЯ

Н. В. КОРОНОВСКИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ISOSTASY

N. V. KORONOVSKY

The isostatic compensation processes taking place in the Earth crust and upper mantle are discussed. It is shown that the compensation occurs due to the horizontal flow of substance within the Earth crust, lithosphere and astenosphere.

Рассмотрены вопросы изостатической компенсации, происходящие в земной коре и верхней мантии Земли. Показано, что компенсация осуществляется за счет горизонтального перетекания вещества в земной коре, литосфере и астеносфере.

ВВЕДЕНИЕ

В середине XIX века геодезические наблюдения в Индо-Гангской низменности обнаружили, что направление отвеса там не совпадает с нормальным. Возникла догадка, что эта аномалия обусловлена гравитационным притяжением находящегося вблизи грандиозного горного сооружения Гималаев. Но главное открытие было впереди. Когда работавший в Индии английский ученый Ф. Пратт занялся проверкой этой догадки путем вычислений, то оказалось, что сообразно массе горного сооружения отклонение отвеса должно было бы быть гораздо большим. Иными словами, в Гималайских горах нет того избытка масс, которого следовало ожидать. В 1855 году английский астроном Дж. Эри, а через несколько лет и сам Пратт предложили свои гипотезы, объясняющие эту нехватку масс исходя из предположения о свободном падении земной коры на подкоровом веществе: именно это явление впоследствии назвали изостазией. Но в те годы геологи и геофизики еще слишком мало знали о глубинном строении Земли, поэтому модели Дж. Эри и Ф. Пратта носили самый общий характер.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

В настоящее время внутреннее строение Земли благодаря геофизическим методам, и в первую очередь сейсмическому, известно довольно хорошо. Особенно это касается верхних оболочек Земли до глубины в 670 км, охватывающих верхнюю мантию и земную кору, имеющую наибольшую мощность в высокогорных областях, например в пределах Памира до 70–75 км, тогда как в океанах она намного тоньше и не превышает 10–15 км. В основании коры повсеместно прослеживается раздел или поверхность Мохоровичича, названный так по имени геофизика, впервые установившего его в начале XX века по скачкообразному увеличению скорости сейсмических волн. В среднем мощность земной коры составляет 35–40 км.

Земная кора на континентах обладает двухслойным строением. Верхний слой, обнажающийся на поверхности в пределах щитов древних платформ, слагается древними, докембрийскими кристаллическими

породами: гнейсами, разнообразными сланцами, гранитами. Нижний слой слогаается породами, скорость сейсмических волн в которых соответствует скорости в базальтах. И верхний и нижний слои в континентальной коре характеризуются расслоенностью.

В океанах земная кора обладает другим строением. Она состоит из тонкого слоя осадков: базальтов с характерной подушечной отдельностью; комплекса параллельных даек, служивших подводными каналами для базальтовых лав, и, наконец, полнокристаллических пород основного и частично ультраосновного составов. Кора океанского типа тяжелая, она принципиально отличается от континентальной коры.

Ниже поверхности Мохоровичича повсеместно располагается верхняя мантия, сложенная твердыми породами ультраосновного состава типа перидотитов и обладающая высокой вязкостью. На разной глубине, под континентами ниже, а под океанами выше, но также в верхней мантии повсеместно располагается астеносфера — слой менее вязкий, а следовательно, более пластичный, чем перекрывающая и подстилающая его верхняя мантия. Этот слой был предсказан Дж. Бареллом в 1914 году и доказан в 60-х годах XX века по уменьшению скоростей сейсмических волн в этом слое. Незначительное снижение скоростей объемных сейсмических волн объясняется наличием плавления в астеносфере порядка 1–5% от общей ее массы. Кровля астеносферы под океанами расположена очень близко к поверхности, залегая на глубинах 5–10 км, в то время как под континентами она находится на глубинах от 100 до 300 км. Мощность астеносферы составляет 100–250 км. Все, что располагается выше астеносферы, то есть верхняя часть мантии и земная кора, называется литосферой.

На глубине около 410 км примерно на 6% возрастает плотность пород и на 4% увеличивается скорость сейсмических волн. И наконец, очень резкая и тонкая (не более 6 км в мощности) граница прослеживается на уровне в 660–670 км, ниже которого плотность пород и скорости прохождения сейсмических волн снова скачкообразно возрастают на 6–7%. Эта граница разделяет верхнюю и нижнюю мантию, причем в последней вязкость возрастает более чем в 30 раз.

Подобная картина глубинного строения верхней части земного шара, характеризующаяся наличием нескольких слоев и объясняемая фазовыми переходами минералов во все более и более плотные структуры, конечно, не была известна в конце XIX века.

ПОНЯТИЕ ИЗОСТАЗИИ

Земной шар как вращающееся тело, состоящее из нескольких слоев, является фигурой почти равновесной. Именно так предполагают законы гидродинамики не-

смотря на то, что Земля является твердым телом, а не жидким. Тоненькая оболочка земной коры, составляющая по мощности всего лишь 1/160 радиуса Земли, как мы видели выше, представляет собой оболочку, отличающуюся на континентах и в океанах как по своей плотности, так и по мощности, причем такое же различие устанавливается и в пределах континентальной коры.

Термин “изостазия” (от греч. *isos* — равный и *status* — состояние) означает стремление земной коры к достижению гидростатического равновесия. Это представление можно проиллюстрировать действием всем известного закона Архимеда. Тяжелое и большое тело будет погружаться в жидкость на большую глубину, чем тело легкое и меньшего размера. Допустим, что в какой-либо жидкости плавают бруски одинаковой ширины и состава, но различные по длине. Тогда над поверхностью жидкости будет подниматься меньшая часть бруска, но которая зависит от его высоты. Одновременно большая часть бруска погружена в жидкость. Чем брусок больше, тем его часть над поверхностью жидкости будет выше, но одновременно и часть бруска, находящаяся ниже поверхности жидкости, погружается в нее на большую глубину. Подобная картина хорошо иллюстрируется айсбергами, огромными ледяными блоками, отколовшимися от ледников (рис. 1).

Так же должна вести себя и земная кора. Если на ее поверхности образовались горы высотой в 5–7 км, то подошва земной коры должна погрузиться в мантию на какую-то величину, чтобы компенсировать возросшую

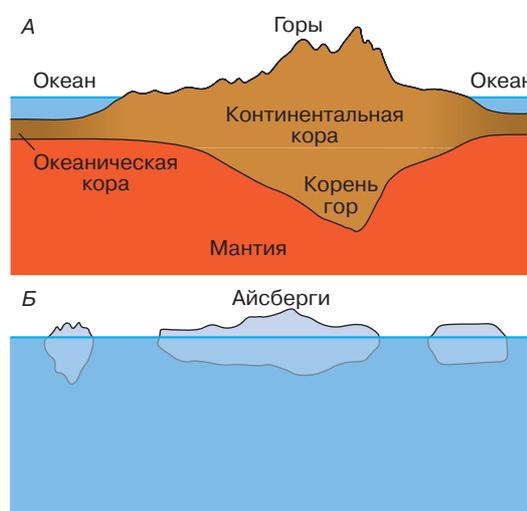


Рис. 1. “Корень” гор (А). Чем выше горы, тем “корень” гор глубже проникает в верхнюю мантию. “Корень” гор компенсирует, уравнивает массу гор; Б — айсберги, плавающие в морской воде. Над поверхностью воды возвышается одна треть ледяной глыбы

нагрузку. Так появляется “корень” гор (компенсационная масса) или прогиб поверхности Мохоровичича – подошвы земной коры. Чем горы выше, тем прогиб или “корень” больше, то есть он должен глубже вдаваться в верхнюю мантию, плотность которой в среднем $3,3 \text{ г/см}^3$, а средняя плотность земной коры $2,8 \text{ г/см}^3$. И этот “корень” гор должен в несколько раз превышать высоту горных хребтов над уровнем моря. По существу, в этом и заключается явление компенсации рельефа на глубине. Компенсационная или изостатическая поверхность в данном случае представляет собой уровенную поверхность, которая непосредственно касается снизу компенсационной массы. Эту поверхность иначе называют глубиной компенсации.

Именно такая изостатическая модель была предложена Дж. Эри в 1855 году (рис. 2). В том же году Ф. Пратт предложил несколько другую модель изостатической компенсации неровностей рельефа. По его мнению, подошва земной коры плоская, и поэтому компенсация должна осуществляться за счет изменения плотности в различных блоках коры. Под высокогорным рельефом средняя плотность земной коры должна быть меньше, чем под впадинами (рис. 1, А). Современные сейсмические исследования свидетельствуют о том, что местами действительно наблюдается изменение плотности как в коре, так и в мантии в горизонтальном направлении. То есть модель Ф. Пратта частично работает, но в то же время и модель Дж. Эри имеет место, а в целом изостатическая компенсация рельефа осуществляется более сложным путем. Собственно термин “изостазия” был введен в литературу американским геологом К. Деттоном в 1889 году.

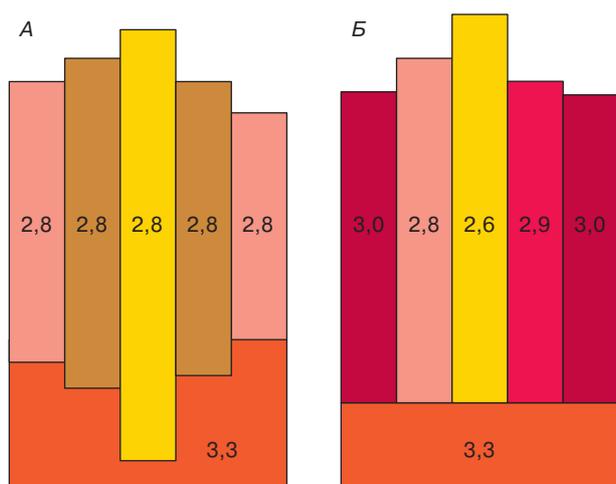


Рис. 2. Изостазия по Дж. Эри (А) и Ф. Пратту (Б)

ГЛЯЦИОИЗОСТАТИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ

За последний 1 млн лет большие пространства в высоких широтах северного полушария не менее четырех раз покрывались огромными ледниковыми щитами. Это были так называемые Великие четвертичные оледенения. Последнее из них достигло максимума своего продвижения на юг примерно 20 тыс. лет назад, и на Европейской равнине оно оставило конечно-моренные гряды в районе Валдая, поэтому и было названо Поздневалдайским. Центрами, откуда ледник начинал радиально перемещаться, были Скандинавия, Новая Земля, а восточнее Таймыр. Оледенение такого же возраста, названное Висконсинским, охватило всю Канаду и северную часть США.

Мощность ледников в центре щитов составляла 3–4 км, а на периферии – первые сотни метров. После максимальной стадии наступания в южном направлении ледник стал быстро таять, отступать, уменьшаться в мощности и около 9 тыс. лет назад последние массы льда уже полностью исчезли.

В Фенноскандии, Карелии и на Кольском полуострове сокращение и утонение ледникового покрова вызвали быстрое поднятие территории в виде свода, причем в его центре поднятие было максимальным, достигнув примерно 250 м, а на периферии – гораздо меньше (рис. 3). Воздымание шло быстро, примерно

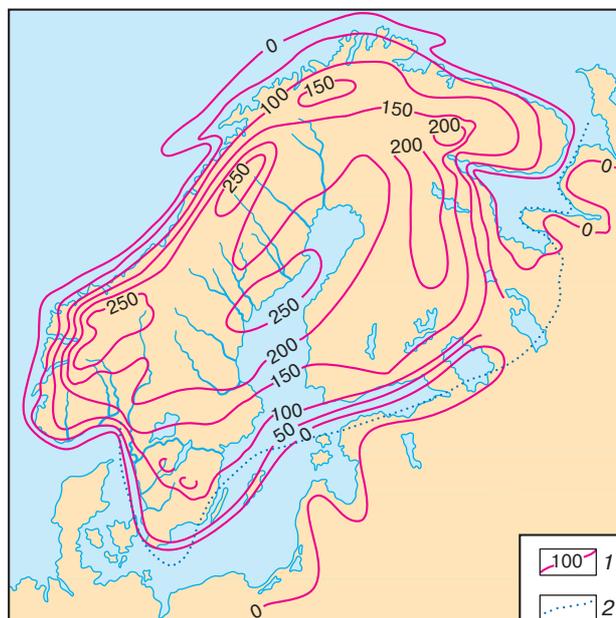


Рис. 3. Гляциоизостатическое поднятие Балтийского щита после исчезновения последних ледников 8–7 тыс. лет назад (по Н.И. Николаеву). 1 – изогипсы (в метрах), 2 – граница Балтийского щита

10–13 см/год, сразу же после таяния и отступления льда, но впоследствии оно замедлилось и сейчас составляет не более 1 см/год. Такая же картина наблюдается и в Северной Америке, где послеледниковое поднятие Канады оценивается в 300 м, а современная скорость поднятия также около 1 см/год, тогда как после снятия ледниковой нагрузки она была значительно больше.

Расчеты показывают, что прогибание поверхности суши при мощности ледника в 3 км должно быть около 1 км. Но как только ледник стал уменьшаться в своей мощности в результате таяния, сразу же начало происходить поднятие, не дожидаясь полного исчезновения ледового покрова. Движения земной коры в областях дегляциации продолжаются и в настоящее время, но происходят они уже с гораздо меньшей скоростью, сравнимой со скоростью эндогенных тектонических движений.

О темпе послеледникового поднятия свидетельствуют морские террасы, абразионные уступы, озерные отложения и ленточные глины в озерных впадинах. Датирование абсолютного возраста отложений по ^{14}C показывает, что высокие скорости поднятия до 10–13 см/год продолжались не более 1000–1500 лет, а затем быстро уменьшались. И кроме того, они в точности соответствовали участкам, с которых лед исчезал в разное время, то есть реакция на снятие нагрузки в геологическом смысле была почти мгновенной. В данном случае изостатическая компенсация нагрузки льда и его исчезновения осуществляется на более глубоком уровне, чем земная кора, по-видимому в астеносферном слое. Исходя из скоростей послеледникового поднятия Е.В. Артюшков показал, что вязкость астеносферного слоя под Фенноскандией должна составлять 10^{19} Па·с, а выше и ниже в верхней мантии — 10^{21} Па·с. Различия в вязкости на два порядка достаточно велико и играет важную роль в быстроте изостатического поднятия территории после снятия нагрузки, а во время присутствия ледяного покрова мощностью в 3 км вещество астеносферы также быстро выдавливалось в соседние районы, и затем, когда ледник отступал, перетекало обратно. Когда мы говорим о вязкости каких-то слоев в земной коре, мантии, астеносфере, следует понимать под ней способность вещества к течению, несмотря на то что вязкость в 10^{19} – 10^{20} Па·с представляет собой очень высокое значение. Однако в условиях больших температур и давления вещество с высокой вязкостью способно к перемещению.

Интересно, что и в краевых частях ледниковых покровов, где мощность льда достигала сотен метров уже в 50–60 км от края ледника, формировались пониженные участки или депрессии рельефа, перед фронтом покрова, заполнявшиеся обширными озерами. Как только ледник отступал, области фронтального прогибания

перемещались вслед за ним, а бывшие озера осушались и их территория воздымалась.

Еще в 50-х годах XX века В.К. Гуделис в Прибалтике доказал, что вслед за фазами отступления ледника периферические участки суши, ранее обрамлявшие ледник, поднимались на 7–12 м и эта “волна” воздымания точно соответствовала фазам отступления последнего ледника. И такая картина повсеместно наблюдается на Европейской и Западно-Сибирской равнинах, которые в четвертичное время неоднократно перекрывались мощными ледниками. Есть указания на то, что время, необходимое для восстановления нарушенного изостатического равновесия из-за тяжести ледника, путем компенсационных перемещений в астеносфере пропорционально квадрату среднего размера ледника.

Современный Антарктический ледник максимальной мощностью в 4 км имеет форму двояковыпуклой линзы, и центральные участки Антарктического материка под тяжестью ледника опущены ниже уровня океана. Такая же картина и у мощного Гренландского ледника. При таянии этих последних на Земле крупных ледниковых щитов земная поверхность начнет подниматься и земная кора будет стремиться достичь состояния изостатического равновесия.

Примеров быстро “работающей” изостазии можно привести много. Одним из них является оз. Бонневиль в Скалистых горах США. 20 тыс. лет назад во время максимума последнего оледенения и влажного климата озеро имело глубину до 300 м и диаметр около 100 км. В настоящее время озеро высохло, и на месте озерной чаши возникло сводовое поднятие, изобазы которого довольно точно повторяют контур водной массы, отсутствие которой сразу же вызвало изостатическое поднятие (рис. 4).

Любая, достаточно значимая нагрузка на земную кору, например: образование крупных впадин, заполненных осадочными толщами, обширные и мощные лавовые покровы, вулканы, искусственные водохранилища, способна вывести какой-то участок земной коры из состояния изостатического равновесия.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время техногенные процессы, в частности техногенное перераспределение масс на поверхности Земли, достигли огромных объемов — около 10 тыс. км³ в год, что явно превышает воздействие неравновесного слоя в 70 м (разница в поверхностях сфероиды и геоида Земли). Глубокие карьеры, шахты, рудники, поля отвалов горных разработок, откачка подземных вод, нефти, газа, водохранилища — все это должно приводить к изменению изостатического равновесия в региональном масштабе.

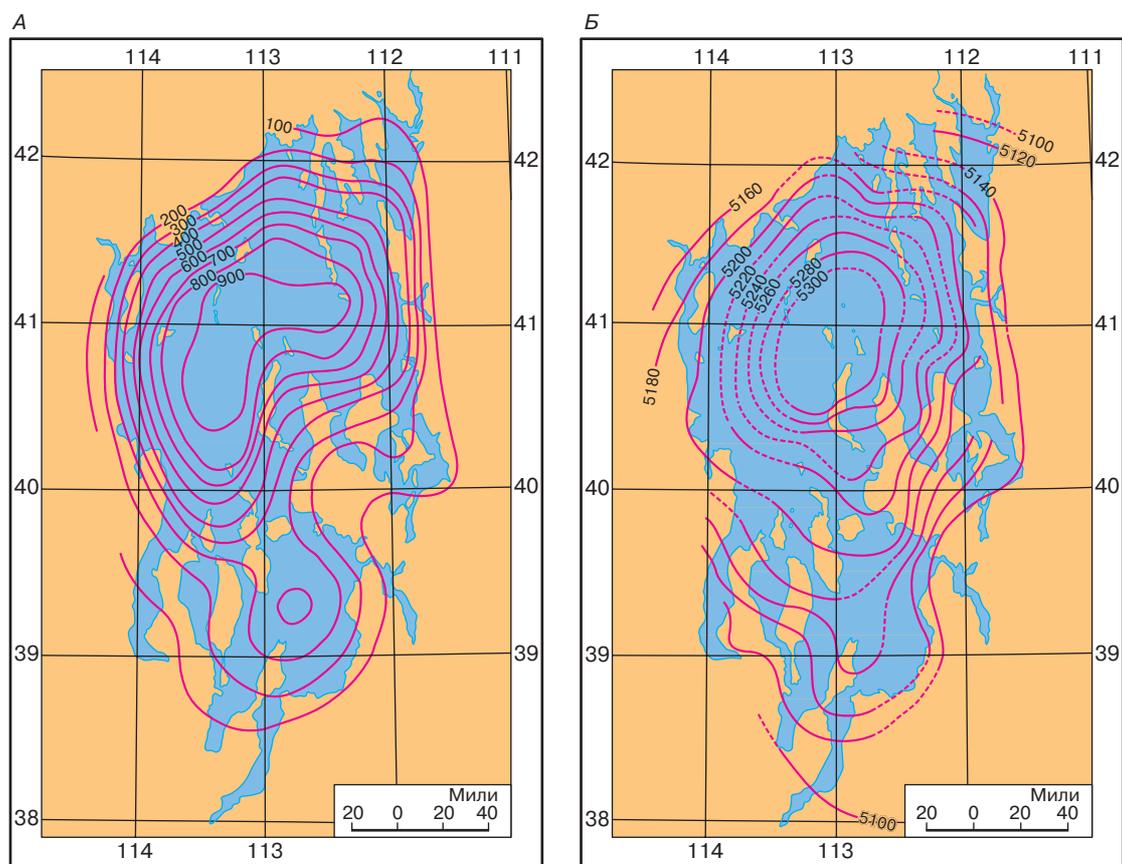


Рис. 4. Изостатические движения в районе оз. Бонневиль в Скалистых горах Северной Америки (по М.Д. Криттендену): А – глубины озера 15–20 тыс. лет назад (прогибание дна); Б – поднятие дна после высыхания озера 6 тыс. лет назад. Изолинии показаны в футах, а масштаб – в милях

КАКИМ ОБРАЗОМ МОЖНО СУДИТЬ ОБ ИЗОСТАТИЧЕСКОМ РАВНОВЕСИИ

Для этих целей служат так называемые изостатические аномалии, которые показывают отклонения от условий полного равновесия. Измеряются аномалии в миллигаллах. В горных областях изостатические аномалии составляют обычно 30–50 мгл, тогда как в платформенных, равнинных областях и океанах эти аномалии не превышают 10–20 мгл (1 гл = 980 см/с²). Столь небольшие аномалии говорят о том, что в значительной мере рельеф поверхности Земли изостатически скомпенсирован, хотя существуют районы, в которых изостазия нарушена.

Рельеф поверхности Земли, созданный в результате тектонических эндогенных и экзогенных, эрозионных и денудационных сил, непрерывно изменяется. Растущие горы разрушаются, а материал сносится реками и накапливается в континентальных впадинах, прибрежных частях морей и океанов. То есть изостати-

ческое равновесие все время нарушается, хотя, судя по картам изостатических аномалий, амплитуда последних очень незначительна. А это, в свою очередь, указывает на быстрое приспособление земной коры к нарушению равновесия и перетеканию подкорового материала в горизонтальном направлении из-под нагруженных участков. Для этого отдельным блокам земной коры необходимо перемещаться и по вертикали. Все это свидетельствует в пользу относительно пониженной вязкости вещества верхней мантии ниже подошвы земной коры.

Изостатическое равновесие удовлетворительно выполняется лишь в структурах ограниченного размера. Так, если местные неровности рельефа обладают размерами в длину не более чем в 100 км, они, как правило, изостатически не компенсируются.

Именно это обстоятельство независимо от других геофизических данных свидетельствует о том, что земная кора и часть верхней мантии, то есть литосфера,

оказываются гораздо более вязкими несмотря на местные различия, чем подстилающая ее астеносфера. Поэтому, когда мы говорим о перетекании материала в мантии для выравнивания нарушенного изостатического равновесия, следует иметь в виду, что речь идет о литосфере, которая как бы плавает на астеносфере с вязкостью на два-три порядка ниже. В этом заключается выдающееся значение астеносферы в качестве компенсационного слоя, когда речь идет о процессах изостазии.

Таким образом, сейчас достоверно установлено, что процессы изостазии или изостатического равновесия осуществляются не в основании земной коры, как предполагали Дж. Эри и Ф. Пратт, а в основании литосферы – в астеносфере, то есть охватывают значительную часть верхней мантии.

В областях, где сейчас наблюдаются активные тектонические движения и существуют горные хребты разной высоты и протяженности, изостатическое равновесие нарушено в различной степени. Так, в молодых альпийских складчатых сооружениях почти повсеместно наблюдаются изостатические аномалии, а некоторые районы, например Горный Крым и Большой Кавказ, характеризующиеся большими положительными изостатическими аномалиями, должны были бы опускаться, в то время как они испытывают поднятие. Находящийся перед фронтом Западного Кавказа Индоло-Кубанский передовой прогиб, характеризующийся отрицательными изостатическими аномалиями, должен бы воздыматься, тогда как он, наоборот, опускается. В этих местах тектонические движения направлены как бы против сил, стремящихся привести район в состояние изостатического равновесия, то есть они антиизостатические.

Причина подобного поведения структур заключается в том, что в этих районах действуют иные тектонические силы, связанные с эволюцией Альпийского складчатого пояса, в частности с субмеридиональным сжатием. Это поле напряжений обусловлено процессом коллизии, то есть столкновением двух крупных ли-

тосферных плит: Евразийской и Африкано-Аравийской. На меридиане Кавказа этот процесс начался где-то в позднем мелу (70–75 млн лет назад), продолжается и в настоящее время, о чем свидетельствуют данные спутниковой геодезии, указывающие на взаимное сближение различных продольных структур пояса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, изостазия является одним из основополагающих принципов, который должны учитывать любые геотектонические построения. Общей, одинаковой для всех регионов Земли модели изостатической компенсации типа Ф. Пратта или Дж. Эри не существует. В каждом отдельном случае она конкретна, все зависит от геологических условий, размера явления или региона, где оно происходит. Нарушенное изостатическое равновесие восстанавливается очень быстро, литосфера опускается или всплывает. Поэтому большинство регионов Земли находятся в состоянии, близком к изостатическому равновесию.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Артемьев М.Е.* Изостазия территории СССР. М.: Наука, 1975. 215 с.
2. *Артюшков Е.В.* Геодинамика. М.: Наука, 1979. 327 с.
3. *Белоусов В.В.* Основы геотектоники. М.: Недра, 1989.
4. *Люстих Е.Н.* Изостазия и изостатические гипотезы // Тр. Геофиз. ин-та. 1957. № 38 (165). 89 с.
5. *Николаев Н.И.* Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 490 с.

Рецензент статьи М.Г. Ломизе

* * *

Николай Владимирович Короновский, профессор, доктор геолого-минералогических наук, зав. кафедрой динамической геологии геологического факультета МГУ. Область научных интересов – геодинамика, неотектоника, магнетизм. Автор 280 работ, пяти учебников и четырех монографий.