

УДК 550.4

## О термодинамической модели Земли

Р.Я. Белевцев

Институт геохимии и окружающей среды НАН и МЧС Украины

*Предложена новая термодинамическая модель Земли; рассмотрены роль первичной звездной материи, процессов магматизма, конвекции, газовой выделения, дифференциации, гравитации, влияния Луны и малых космических тел. Выделены основные этапы геологической эволюции Земли, которая преимущественно обуславливается термодинамическим саморазвитием планеты как изолированной системы.*

*ПРО ТЕРМОДИНАМІЧНУ МОДЕЛЬ ЗЕМЛІ, Белевцев Р.Я. — Запропонована нова термодинамічна модель Землі; розглянуті роль первинної зіркової матерії, процесів магматизму, конвекції, газовиділення, диференціації, гравітації, впливу Місяця та малих космічних тіл. Виділені основні етапи геологічної еволюції Землі, яка переважно обумовлюється термодинамічним саморозвитком планети як ізольованої системи.*

*ABOUT THERMODYNAMIC MODEL OF THE EARTH, Belevtsev R.Ya. — New thermodynamic model of the Earth has been proposed. Role of primary star matter, gas-magmatic convection and differentiation, gravitation, influence of the Moon and small cosmic bodies have been examined. Principal stages of geological evolution of the Earth were conditioned by advantage thermodynamic auto-development of planet how isolated system.*

**Ключевые слова:** термодинамическая эволюция Земли; геофизические процессы.

**Key words:** thermodynamic evolution of the Earth; geophysical processes.

Изучение происхождения и эволюции Земли — средних размеров третьей каменной планеты Солнечной системы — дает значительный материал для понимания генезиса малых космических тел и метеоритных кратеров. Наиболее распространенные метеориты — хондриты, имеют состав, близкий к земным мантийным перидотитам, а железные метеориты считаются аналогами пород ядра Земли. Ледовые ядра комет могут иметь нечто общее с земной гидросферой. На Украине известны большие метеоритные кратеры мезозойского и кайнозойского возраста, содержащие импактные алмазы. Правда, гранитов, широко распространенных на Земле и слагающих континентальную земную кору, среди метеоритов пока не обнаружено.

С другой стороны, исследование состава, возраста и условий образования метеоритов дали значительную информацию для геохимической эволюции Земли. Но нередко слишком буквально состав метеоритов переносится на состав геосфер, ведь малые космические тела пережили своеобразную петрогенетическую эволюцию, в частности потеряли газовую составляющую, они весьма древние (их возраст около 4,5 млрд. лет), и напрямую их нельзя сопоставлять с земными породами.

Глубинные зоны Земли скрыты от непосредственных наблюдений и для понимания ее строения и весьма сложной геологической эволюции необходимо привлекать космохимическую информацию. В то же время для формулировки однозначной генетической модели Земли пока мало данных и имеется несколько альтернативных гипотез. Среди последних можно выделить две главных: аккреционную и звездную. Большая часть исследователей придерживается аккреционной гипотезы — образование планеты Земля из холодного вещества газово-пылевой туманности под влиянием энергии гравитации. Есть много вариантов этой гипотезы, один из них — участие сверхновой звезды (Соботович Э.В. [20,23]). Звездная гипотеза (Амбарцумян В.А. [1]; Всехсвятский С.К. [7]) формулируется так: первичной материей может только звездная, а пыль и газ в космическом пространстве — это отработанный и рассеянный материал. По звездной модели из сверхплотных центров галактик при взрывах вылетают тела или сгустки звездной материи и образуются звезды с планетными системами, однако к развивающимся процессам можно отнести лишь прогрессивную стадию этих процессов — поток энергии и вещества при подготовке взрыва, а далее для протопланетных тел следует стационарный и регрессивный самопроизвольный процесс.

С точки зрения термодинамики имеются два главных типа процессов: самопроизвольные и развивающиеся. Самопроизвольные процессы проходят без затрат энергии (работы) и приводят изолированную систему к равновесию с максимальной энтропией и свободной энергией, равной нулю, согласно второму закону термодинамики. Энтропия системы, как мера связанной внутренней энергии, увеличивается также как и вероятность или устойчивость системы (по Больцману), которая стремится к беспорядку, хаосу, рассеиванию вещества [2,3,5,18,19]. Пример — выравнивание температуры или концентрации

компонента в растворе посредством теплопроводности или диффузии.

Развивающиеся процессы и системы являются открытыми с большими градиентами физических и термодинамических параметров — температуры, давления, концентрации, массы, ускорения, энергии, значительных потоков энергии и вещества, которые нередко имеют взрывной характер. Такие системы характеризуются уменьшением энтропии и, соответственно, уменьшением вероятности, изменяются от беспорядка к порядку и структурированию (И.Пригожин; Больцман [18,19]). Развивающиеся процессы и системы далеки от равновесия и открыты, а условием их существования является постоянный и значительный приток энергии и вещества.

Для вероятности ( $W$ ) и энтропии ( $S$ ):

$$S = k \ln W,$$

для молярной системы:

$$S = R \ln W, \quad (1)$$

для энтропии газа ( $g$ ):

$$\Delta S_g = -R \ln P_g = R \ln V \text{ при } T = \text{const}, \quad (2)$$

а для свободной энергии:

$$\Delta G_g = RT \ln(P_g - P_0). \quad (3)$$

Примеры — жизнь, развитие техногенеза и цивилизаций, энерговыделение звезд, горение, взрывы (на прогрессивной стадии), столкновение тел, падение метеорита, извержение вулкана, землетрясение, молнии, конвекция, газовыделение.

Также имеются процессы стационарные, промежуточные между самопроизвольными и развивающимися, с небольшими энергозатратами, слабым взаимодействием сил, малыми градиентами физических и термодинамических параметров и минимальным уменьшением энтропии (производством отрицательной энтропии по И.Пригожину). Примеры — теплопроводность, диффузия, обращение спутников вокруг центральных тел по эллиптическим орбитам с использованием энергии гравитации.

Сила гравитации прежде всего зависит от расстояния между телами (пропорциональна квадрату расстояния) и относится к слабым взаимодействиям, особенно по отношению к малым космическим телам, к рассеянной космической пыли и газам, которые сами являются конечными продуктами самопроизвольных или стационарных процессов, завершающих развивающиеся процессы в звездах. И лишь при отклонении от них, например, при столкновении тел, могут возникнуть сильные, однако кратковременные взаимодействия.

Эволюция звезд и планет также зависит от их масс [1–4, 7, 9, 16, 17, 21, 22]. Крупные тела с массой близкой к Солнцу ( $M = 10^{30}$  кг) остаются звездами; с несколько меньшей массой  $5 \cdot 10^{26} - 2 \cdot 10^{27}$  кг (Юпитер, Сатурн) — остывшие звезды, но сохранившие звездный гелий-водородный состав [29]. Небольшие звезды превращаются в каменные планеты. Крупные каменные планеты, такие как Земля и Венера с массой  $(5 - 6) \cdot 10^{24}$  кг эволюционируют до сих пор, выделяя газы, хотя легкие газы — водород и гелий — эти планеты удержать не могут. Небольшие каменные планеты с массой менее  $10^{22-23}$  кг (Марс, Меркурий, Луна) давно остыли и почти лишились газов, хотя в трещинно-поровом пространстве пород холодного приповерхностного горизонта (в реголите) могут сохраняться замерзшие газы и газогидраты. Условиями устойчивости газогидратов являются низкие температуры и высокие давления [12]. На Марсе, например, для давления атмосферы на поверхности планеты 600 Па гидраты метана и диоксида углерода будут устойчивы при температуре меньше минус  $50^\circ\text{C}$ , а в поверхностном слое для геостатического давления в  $10^6$  Па (10 атм) на глубине 50–100 м — меньше  $-5^\circ\text{C}$ .

Малые космические тела (астероиды, кометы, метеороиды, космическая пыль) различаются не только величиной и массой, но также плотностью и составом. Прежде всего различаются металлические железо-никелевые, ультрабазитовые (хондритовые) астероиды и метеориты, а также ледяные кометы. Они могли образоваться при взрыве под давлением газов в небольших сгустках звездной материи, оказавшихся в космическом вакууме [15]. В зависимости от стадии дифференциации, газовыделения и РТ условий образуются при начале дифференциации лед (в кометах), при слабой дифференциации — ультрабазит, либо ультрабазит-металл на конечных ее стадиях. Не исключено, что малые космические тела имеют в своем составе лед или газогидраты.

После взрыва в космическом пространстве образуются звездно-планетные системы, которые связываются количеством движения и гравитацией, а движутся по определенным орбитам — спутники относительно центральных тел, причем эти орбиты эллиптические с определенным расстоянием спутника от центрального тела и скоростью его движения по орбите.

Центростремительная и центробежная силы при этом уравниваются, как, например, при обращении Земли вокруг Солнца:

$$\frac{GM_\odot M_\oplus}{R^2} = \frac{M_\oplus V^2}{R}, \quad (4)$$

то есть

$$GM_{\odot} = V^2 R, \quad (5)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $M_{\odot}$  — масса Солнца,  $M_{\oplus}$  — масса Земли,  $R$  — расстояние Земли от Солнца,  $V$  — скорость движения Земли по орбите. Соотношение (5) означает, что обращение Земли вокруг Солнца не зависит от массы Земли, также как и для всех спутников. Скорость движения Земли по почти круговой орбите (эксцентриситет орбиты 0,014) зависит от расстояния от Солнца, находящегося в одном из фокусов эллиптической орбиты Земли: она минимальна в афелии ( $R_a = 152 \cdot 10^6$  км, а  $V_a = 29,6$  км/с) и максимальна в перигелии ( $R_p = 147,8 \cdot 10^6$  км, а  $V_p = 30,1$  км/с), т.е. выдерживается соотношение (5).

Взаимосвязь расстояния спутника до центрального тела, скорости движения его по эллиптической орбите и времени прохождения определенного сектора орбиты сформулировано в законах Кеплера. Эллиптичность орбиты спутника зависит от факторов, тормозящих его движение по орбите. Т.е. чем большая эллиптичность орбиты (большой ее эксцентриситет), тем больше энергии потерял спутник при движении по орбите и тем больше становится энтропия системы «спутник–центрально тело» и тем скорее такой спутник оторвется от центрального тела и его орбита перейдет от эллиптической к прямой. Тогда стационарная система «спутник–центрально тело» достигнет максимальной энтропии, своего равновесия и эта система разрушится. Спутник уйдет в космическое пространство. Для системы «Земля–Солнце» за 4,5 млрд. лет эллиптичность орбиты небольшая:  $R_a/R_p = 1,029$ , в то время как для комет это отношение может достигать 30–40.

Основные внутренние процессы в планетах при их термодинамической эволюции — это газовыделение, конвекция, дифференциация, остывание, уплотнение. Чем меньше первичные протопланетные звездные сгустки, тем короче активная эволюция планет. Марс и Луна, например, закончили свою эндогенную эволюцию 4–3 млрд. лет назад, превратившись в твердо-каменные планеты. Вероятны столкновения, поглощение, разрушение и деформация космических тел. Аккреция возможна лишь для твердых тел, но не для рассеянных газов. Условием аккреции для малых тел является очень небольшие различия в скорости и направлении движения тел, а иначе упругие деформации их оттолкнут друг от друга. Прилипание пыли к малому телу маловероятно. Возможно поглощение большими планетами малых тел, лишь при случайном отклонении последних со стационарных орбит. Космические малые тела, пыль и газ являются холодным отработанным материалом эволюции звезд и как термодинамическая система имеет большую энтропию и устойчивость, и поэтому для изменения такой системы и превращения малых тел в крупное тело (планету или звезду), т.е. для процесса развития и уменьшения энтропии нужна огромная дополнительная целенаправленная энергия, которой не может быть гравитация. Исследования поверхности Луны, испещренной метеоритными кратерами, показали, что метеоритного вещества на Луну нападало за последние 3,0–3,5 млрд. лет совсем немного. Мощность рыхлой лунной «почвы» — реголита, развитого далеко не на всей поверхности Луны, составляет обычно несколько метров или десятков метров [8]. К тому же реголит преимущественно представляет собой не само метеоритное вещество, а раздробленные лунные породы, возраст которых более 3.0 млрд. лет. Это еще один довод против аккреционной гипотезы образования планет.

## О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗЕМЛИ И КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Изложенные данные позволяют кратко охарактеризовать основные особенности термодинамической модели континентальной земной коры и Земли. Во-первых, модель холодной аккреции твердых космических тел не может указать на источник огромной и целенаправленной энергии, которая позволила бы из рассеянного космического вещества образовать большие планеты, подобные Земле. Это было бы против второго закона термодинамики, поскольку без большого вклада дополнительной энергии самопроизвольный процесс обратного идти не может, а гравитационной энергии для этого недостаточно, особенно при начальных этапах аккреционной модели, когда Проземля имела небольшую массу. Во-вторых, в составе Земли содержится много водорода часто в виде гидридов металлов [13, 22], метеориты практически не содержат водорода, а захватить газ  $H_2$  Земля не может. В-третьих, если бы Земля образовалась путем холодной аккреции, то глубинные процессы плутонической магматической дифференциации мантии (с конвекцией, газовой выделением и конвективной теплопередачей) и образованием гранитоидной коры, были бы невозможны, поскольку по аккреционной гипотезе при кондуктивной теплопередаче на такую глубину тепло не доходит. В то же время изложенный материал обосновывает большую активность плутоно-магматических процессов во всем объеме Земли в ранние этапы эволюции планеты, когда Земля была газовой-расплавленной.

Геологическая эволюция Земли и геосфер, как развивающихся систем, поддерживалось огромной ее внутренней энергией, унаследованной от ее первичного звездного вещества. Эта энергия постепенно покидала Землю, определяя эндогенные процессы, которые уменьшались по величине со временем, также как оставшаяся внутренняя энергия Земли и других планет. На Земле и Венере эти процессы проявляются до сих пор в виде вулканизма, газовой выделения, землетрясений, глубинных разломов и теплового

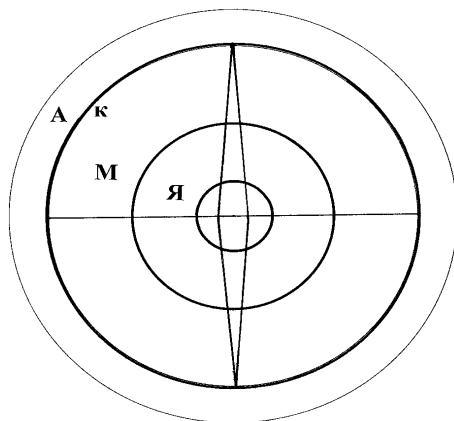
потока из внутренних сфер [2–6, 8–11, 14–17, 21, 22, 25–28, 30, 31]. На небольших планетах — Марсе, Луне и других — возможны лишь слабые планетотрясения и тепловой поток. Малые космические тела видимо полностью остыли и их энергетика зависит лишь от внешних причин.

## СИСТЕМА «ЗЕМЛЯ–ЛУНА»

Интересные выводы относительно эндогенно-магматических процессов при формировании планет дают данные о системе «Земля–Луна» [8]. Луна, как известно, всегда повернута к Земле одной стороной, которая только и видна с Земли. Это явление обусловлено гравитационной асимметрией Луны — значительным смещением центра ее тяжести по направлению к Земле (на 3 км по Галкину И.Н. [8]) и было вызвано гравитационным полем Земли, но могло осуществиться лишь при значительных перемещениях вещества внутренних сфер Луны. Однако такая дифференциация в недрах Луны не могла происходить в твердом их состоянии (современном или при холодной аккреции), но возможна при достаточно низкой вязкости недр Луны, когда они представляли собой газово-жидкую (расплавленную) фазу и плотные массы внутренних сфер могли смещаться под влиянием притяжения Земли. Учитывая эволюцию Луны, это могло произойти в период времени 4,5–4,0 млрд. лет назад, когда на Луне происходили активные эндогенно-магматические процессы [8, 16, 22]. С другой стороны, гравитационное поле Луны вызывает (вместе с Солнцем) приливные деформации в недрах Земли, которые особенно сильны в экваториальной области и способствовали (вместе с динамикой вращения Земли вокруг оси в магматический этап ее эволюции — 4,5–3,0 млрд. лет назад) образованию современной формы Земли как эллипсоида вращения. Ведь известно, что экваториальный радиус Земли примерно на 22 км меньше ее полярного радиуса, и поэтому при одинаковой плотности внутри Земли расстояние между фокусами эллипсоида Земли составило бы 1040 км (рис. 1). Такую форму Земля могла приобрести лишь в ранние магматические стадии, когда ее недра имели низкую вязкость (около 1 пз). Эти данные также подтверждают наличие активного эндогенно-магматического этапа в термодинамической эволюции Земли и Луны и противоречат гипотезе холодной аккреции.

К этому следует добавить, что фигура Луны как эллипсоида вращения имеет меньший полярный радиус (ось вращения) — 1736,04 км, а направленный к Земле — 1739,23 км [8]. Расстояние между фокусами лунного эллипсоида должно составить около 210 км при одинаковой плотности лунных пород, а центр тяжести Луны вероятнее всего располагается в одном из этих фокусов и отстоит от центра лунного эллипсоида примерно на 100 км.

Наклон орбиты Луны к эклиптике  $5^\circ$ , хотя ось вращения Луны почти перпендикулярна к эклиптике, что обуславливается притяжением Земли. Орбита Луны более эллиптическая, нежели орбита Земли: наибольшее удаление от Земли в апогее составляет  $406800 \cdot 10^3$  км, а в перигее —  $356400 \cdot 10^3$  км, т.е. параметры эллиптической орбиты Луны:  $a = 381600 \cdot 10^3$  км,  $b = 380800 \cdot 10^3$  км,  $c = 25200 \cdot 10^3$  км, а эксцентриситет орбиты — 0,066 (у земной орбиты — 0,014). Известно также, что гравитационное взаимодействие Земли и Луны довольно значительно, и выражается, в частности, в лунных приливах в океане, которые в 2,2 раза значительнее, чем солнечные [8]. Имеется некая неустойчивость в системе «Земля–Луна», особенно если учесть быстрое вращение Земли вокруг своей оси и значительный наклон последней к плоскости эклиптики. Это трудно объяснить влиянием Солнца или внутренними процессами в планетах. Ведь планеты Меркурий и Венера располагаются ближе к Солнцу, но вращаются очень медленно и оси их вращения перпендикулярны эклиптике. К этому можно добавить также то, что вращение Солнца и всех планет вокруг своей оси, а также движение их по орбите происходит в одну сторону — с запада на восток. Напрашивается предположение, что параметры орбит и внутреннее стро-



**Рис. 1.** Геосферы Земли: **А** — атмосфера, **к** — земная кора, **М** — мантия, **Я** — ядро (внешнее — жидкое, внутреннее — твердое). Земля — эллипсоид вращения, показаны фокусы эллипсоида, **а** (экваториальный радиус) — 6378 км, **б** (полярный радиус) — 6356 км, **с** — 520 км.

ение Земли и Луны в значительной степени обязаны их гравитационно-динамическому взаимодействию. В ранние этапы эволюции, когда Земля и Луна были газово-расплавленными телами, Земля как более массивное тело оказывала большее влияние на распределение центра тяжести Луны и ее орбиту. Однако после конденсации расплавленных внутренних зон Луны, уже влияние последней на Землю было преобладающим.

Вероятно, и ускорению вращения Земли вокруг своей оси способствовало движение Луны по орбите в ту же сторону. И наклон земной оси к эклиптике также было вызван наклоном орбиты Луны по отношению к эклиптике, хотя, вероятно, в ранние этапы последний был большим. Причем, это произошло в ранние этапы эволюции газово-расплавленной Земли, когда ее вращение вокруг оси могло вызвать дифференциацию внутренних маловязких магм и образование фигуры, близкой к современному эллипсоиду вращения. Участие Солнца в этих процессах также могло быть значительным, особенно на всю систему «Земля–Луна». Гравитационное влияние Солнца непосредственно на Землю компенсируется центробежными силами движения Земли по околосолнечной орбите, в то время как Луна вращается близко вокруг Земли по независимой от Солнца орбите и вызывает аномальное влияние на положение оси Земли и скорость ее вращения (для сравнения — Меркурий и Венера, у которых нет спутников).

В поздние этапы эволюции Земли, когда она стала в целом твердой и консолидированной, влияние Луны на геологические процессы продолжается. Это выражается в активизации землетрясений, вулканизма, тектоники плит. Луна не оставляет в покое Землю и тектонические плиты, разделенные низковязкими магматическими или астеносферными зонами. Влиянием Луны можно, например, объяснить преимущественное скопление материков с континентальной корой в северном полушарии Земли, преимущественную субмеридиональную ориентировку зон спрединга.

Видимо, если бы не было Луны, то не было бы на Земле таких коротких суток, смены времен года и такой геологической истории, том числе возникновения и развития биосферы. Своей жизнью мы обязаны не только Земле и Солнцу, но и Луне! Условий для жизни нет ни у Венеры (слишком близка к Солнцу и не имеет спутников), ни у Марса (далек от Солнца, но самое главное не имеет крупных спутников). Впрочем, Марс мог 4,0–3,5 млрд. лет назад иметь океан с кислой постмагматической водой, хотя для ощелочения последней при осадконакоплении и для зарождения биосферы необходимо около полумиллиарда лет (как в раннем рифее на Земле [2–5, 20]), которых у небольшого Марса наверняка не было.

Безусловно, выдвинутая идея предполагает детальные исследования для своего всестороннего обоснования.

## ВЫВОДЫ

В термодинамической эволюции Земли и Луны по звездной гипотезе ведущую роль на первых этапах играли эндогенные процессы — газовыделение, дифференциация, конвекция, остывание (уменьшение внутренней энергии), уплотнение, деформации, а также гравитационно-динамической планет. В этой эволюции можно выделить такие этапы:

1) появление Праземли на современной орбите Земли с звездным составом и массой, в десятки раз (до 50 раз) превышающей массу современной Земли (4,5 млрд. лет назад), а также ее спутника — Пралуны; 2) диссипация (удаление) большей части водорода, гелия и других инертных, а также части легких элементов, и образование расплавленных планет с массой, близкой к современной (4,5–3,8 млрд. лет назад), с развитием системы «Земля–Луна»;

3) эндогенная магматическая дифференциация Земли на геосферы с выделением газов - водорода, углеводородов, аммиака, галогенов, оксидов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , оксидов азота, серы), с конвекцией газов и расплавов (4–2 млрд. лет назад);

4) экзотермическая плутоническая кристаллизация расплавов с газовыделением, конвекцией во внутренних геосферах — гидридном ядре, ультраосновной мантии, гранитоидной коре, и образование внешних геосфер — кислого океана, и восстановленной атмосферы (3,5–1,7 млрд. лет назад);

5) активизация экзогенных процессов — образование суши и осадочных отложений при участии вулканизма, землетрясений, деформации мантии и коры; тектоника литосферных плит; формирование современного океана, кислородсодержащей атмосферы и биосферы (1,6 млрд. лет — настоящее время).

В целом активность эндогенных процессов в Земле снижается при ее эволюции, она остывает, уменьшается внутренняя энергия Земли, связанная с термодинамическим саморазвитием как изолированной системы. Система «Земля–Луна» способствовала и способствует активизации и продлению геологической эволюции Земли.

Падение космических тел на Землю не сыграло значительной роли в ее эволюции, хотя оказало порой значительное влияние на местные, реже на глобальные, процессы во внешних геосферах [2–5, 16, 22], например, на эволюцию биосферы.

1. Амбарцумян В. А. Нестационарные объекты во Вселенной и их значение для исследования происхождения и эволюции небесных тел // Проблемы современной космогонии. — М.: Наука, 1972. — С. 5–18.
2. Белевцев Р.Я., Бухарев С.В., Коломиец Г.Д. Концепция плутонического формирования континентальной земной коры Украинского щита // Минер. журн., 2000. — **22**, № 2/3. — С. 118–131.
3. Белевцев Р.Я., Бойченко С.Г., Спивак С.Д. и др. Термодинамика газового обмена в окружающей среде. К.: Наукова думка, 2007. — 247 с.
4. Белевцев Р.Я. Термодинамическая эволюция Земли // САММАС–2008, Винница, 2008. — С. 22–23.
5. Белевцев Р.Я. Термодинамика и генетическая эволюция докембрийских гранитоидов Украинского щита // Эволюция докембрийских гранитоидов и связанных с ними полезных ископаемых в связи с энергетикой Земли и этапами ее тектоно-магматической активизации: Збірн. наук. праць. — Київ: УкрДГРІ, 2008. — С. 35–46.
6. Буллен К. Сейсмология и внутреннее строение Земли в целом // Физика и химия Земли. — М.: Изд-во ИЛ, 1958. — С. 97–127.
7. Всехсвятский С. К. Космогония Солнечной системы // Проблемы современной космогонии. — М.: Наука, 1972. — С. 316–413.
8. Галкин И.Н. Геофизика Луны. — М.: Наука, 1978. — 176 с.
9. Добрецов Н. Л. Введение в глобальную петрологию. — Новосибирск: Наука, 1980. — 200 с.
10. Йоханнес В. Значение экспериментальных исследований по проблеме формирования мигматитов / Мигматиты. — М.: Мир, 1988. — С. 53–109.
11. Богатиков О.А., Гоньшакова В.И., Фрих-Хар В.И. и др. Классификация лунных магматических пород. — М.: Недра, 1985. — 72 с.
12. Клименко А.П. Клатраты (гидраты газов). — Киев: Наук. думка, 1989. — 74 с.
13. Ларин В.Н. Гипотеза изначальной гидридной Земли. — М.: Недра, 1975. — 99 с.
14. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII. — Киев: Наук. думка, 1988. — 171 с.
15. Маракушев А.А. Происхождение метеоритов и общая эволюция планет Солнечной системы // Минерал. Журн. — 1996. — **18**, № 1. — С. 3–23.
16. Мейсон Б. Основы геохимии. — М.: Недра, 1971. — 311 с.
17. Планета Венера (атмосфера, поверхность, внутреннее строение) / Под ред. В.Л.Барсукова, В.П.Волкова. — М.: Наука, 1989. — 482 с.
18. Полинг Л. Общая химия. — М.: Мир, 1974. — 846 с.
19. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. — М.: Прогресс, 1986. — 431 с.
20. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдасов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. — М.: Наука, 1990. — 182 с.
21. Рудник В.А., Соботович Э.В. Ранняя история Земли. — М.: Недра, 1984. — 349 с.
22. Семенов Н.П. Кислородно-водородная модель Земли. — Киев: Наук. думка, 1990. — 247 с.
23. Соботович Э.В. Космическое вещество в земной коре. — М.: Атомиздат, 1976. — 160 с.
24. Справочник физических констант горных пород. — М.: Мир, 1969. — 543 с.
25. Уолкер Дж.С.Дж. Некоторые соображения об эволюции атмосферы, базирующиеся на модели возникновения Земли путем негомогенной аккреции // Ранняя история Земли. — М.: Мир, 1980. — С. 535–546.
26. Харрис П., Кеннеди У., Скарф К. Соотношение вулканизма и плутонизма в свете вариаций химического состава горных пород // Механизм интрузий магмы. — М.: Мир, 1972. — С. 160–173.
27. Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. — Львов: ЗУКЦ, 2005. — 364 с.
28. Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Бартницкий Е.Б. и др. Геохронологическая шкала докембрия. — К.: Наукова думка, 1989. — 142 с.
29. Юпитер (атмосфера, ионосфера) / Под ред. Т.Гарелса (в 2 т.). Том 2. — М.: Мир, 1979. — 509 с.
30. Carroll M.R., Wyllie P.J. Exhtrimental phase relations in the system tonalite-peridotite-H<sub>2</sub>O at 15 kb; implication s for assimilation and differentiation processes near the crust-mantle boundary // J. of Petrology. — 1989. — **30**, № 6. — P. 1351–1382.
31. Luth W.C., Jahus R.H., Tuttle O.F. The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars // J. Geoph. Res. — 1964. — **69**, № 4. — P. 759–773.

Поступила в редакцию 24.10.2011