

**ЭНЕРГЕТИКА ЗЕМНОЙ КОРЫ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ**

*Обсуждается проблема различных источников химически связанной в кристаллах и минералах энергии и ее роли в метаморфических процессах и формировании земной коры. Поддерживается идея о решающей роли энергии Солнца в ее образовании и развитии.*

*The article examines different sources of chemical energy bound in crystals and minerals and its role in metamorphic processes and the Earth's crust formation. The author justifies the idea of the key role of the solar energy in the formation and development of crust.*

**Ключевые слова:** геоэнергетика, метаморфизм, экзогенные источники, химические связи, роль Солнца.

**Keywords:** geoenergy, metamorphism, exogenous sources, chemical bonds, solar impact.

Проблема энергетики земной коры – это лишь часть исключительно важной и сложной общей проблемы энергетики геохимических процессов (геоэнергетики) Земли. В ее разработку внесли весомый вклад российские академики В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, Д. С. Коржинский, А. П. Виноградов, А. А. Маракушев и многие другие выдающиеся ученые. И все же во многих аспектах эта проблема все еще остается дискуссионной.

В ходе многолетних исследований магматических и метаморфических комплексов и глубинного строения литосферы Западного Тянь-Шаня и Памира [3; 11; 13 и др.] автор предпринимал определенные усилия в этом направлении и получил обнадеживающие результаты. Задача этой статьи – по возможности кратко и доступно осветить современное состояние проблемы энергетики земной коры и наметившиеся пути ее решения.

Наряду с традиционными представлениями о решающей роли эндогенной внутривоздушной энергии в формировании и развитии земной коры все большее значение приобретают и экзогенные ее источники, в конечном счете питаемые на поверхности Земли лучистой солнечной энергией. В их основе лежат давние представления В. И. Вернадского о том, что земная кора несет следы многих былых биосфер, и некоторых других ученых (К. Ранкамы, Т. Барта, В. П. Петрова, Е. К. Мархинина и др.) о том, что она представляет собой, в сущности, преобразованную гигантскую кору выветривания базальтоидной протокоры.

Особое внимание привлекает выдвинутая еще в середине прошлого века и развивавшаяся Н. В. Беловым и В. И. Лебедевым [1; 2; 7 и др.] оригинальная гипотеза «геохимических аккумуляторов». Суть ее состоит в том, что в зоне гипергенеза продукты физического и химического выветривания коренных пород претерпевают кристаллоструктурную перестройку с переходом ионов алюминия в кислородных полиэдрах алюмосиликатов из четверной (тетраэдрической) в шестерную (октаэдрическую) координацию с увеличением межатомных расстояний за счет поглощения лучистой солнечной энергии. Она переносится с осадочными толщами в недра Земли, где в результате экзотермических реакций их регионального метаморфизма, с возвращением ионов алюминия из октаэдрической координации в тетраэдрическую высвобождается и обуславливает развитие магматизма и тектонических движений в подвижных поясах и, в конечном счете, формирование земной коры.

К этой гипотезе в научных кругах возникло двойственное отношение. С одной стороны, она подверглась серьезной критике академика Д. С. Коржинского [5] и некоторых других исследователей, убедительно показавших ошибочность представлений В. И. Лебедева об экзотермическом характере реакций метаморфизма и изменений координации алюминия в алюмосиликатах. Справедливость этих замечаний, которым В. И. Лебедев [6] не смог ничего противопоставить, весомо подтверждена не только термодинамическими расчетами, но и калориметрическими измерениями [16]. С другой стороны, эта гипотеза (в связи с перспективностью самой идеи об аккумуляции солнечной энергии кристаллическим веществом в зоне гипергенеза) приобрела многочисленных сторонников, в том числе и автора этой статьи, прилагавших большие усилия по устранению ее недостатков и дальнейшему развитию.

Наиболее весомый вклад в поддержку и совершенствование экзотермической идеи внесли Л. В. Пустовалов, В. М. Синицын, П. Ф. Швецов, П. Н. Панюков, В. Е. Хаин, А. И. Перельман, Л. А. Назаркин и другие известные ученые [10; 17 и др.]. Интерес к ней еще более активизировался после опубликования

П. П. Тимофеевым и А. В. Щербаковым [18; 19 и др.] серии статей, в которых обстоятельно рассмотрены механизмы аккумуляции и трансформации лучистой солнечной энергии в зоне гипергенеза, процессов осадконакопления и седиментогенеза в современном Мировом океане. Они вызвали многочисленные отклики, которым был посвящен даже специальный выпуск журнала «Литология и полезные ископаемые» – №4 за 1981 г.

К середине 1980-х гг. гипотеза геохимических аккумуляторов Н. В. Белова и В. И. Лебедева кардинально преобразилась и от нее, в сущности, осталась только основная идея об аккумуляции лучистой солнечной энергии продуктами гипергенеза. Основным механизмом этой аккумуляции считается механическая дезинтеграция вещества с возрастанием поверхностной энергии дисперсных частиц и коллоидов в пределах  $9,45 \cdot 10^{11} - 1,42 \cdot 10^{12}$  Вт [10; 17 и др.], а вторым по значимости – захоронение в осадках органического вещества, несущего большие запасы биогеохимической энергии за счет фотосинтеза «былых биосфер» [10]. Структурная перестройка вещества с изменением координационного числа алюминия, процессы гидратации-дегидратации, окисления-восстановления, химической дифференциации и фракционирования твердого и растворенного речного стока рассматриваются ниже как механизмы не аккумуляции, а преобразования лучистой солнечной энергии в другие виды. Показано также, что высвобождение аккумулярованной в осадочных толщах солнечной энергии происходит не при региональном метаморфизме, а при более ранней литофикации осадков с возникновением положительных геотермальных аномалий в седиментационных бассейнах, что стимулируется темпом осадконакопления [10; 22]. Наконец, вслед за Д. С. Коржинским [5] признан эндотермический характер регионального метаморфизма с сопутствующими кристаллоструктурными перестройками, дегидратацией и декарбонизацией исходных пород с поглощением, в зависимости от их состава, от 16,3 до 1096,7 Дж/г энергии из внешних источников [18; 19 и др.]. Это подтверждено, как отмечалось выше, термодинамическими расчетами и непосредственными калориметрическими измерениями [16]. В связи с этим земная кора подразделена [17] на три группы геохимических зон:

- 1) гипергенеза и седиментогенеза – с преобладающим воздействием солнечной энергии;
- 2) диагенеза и катагенеза – переходная, с воздействием как экзогенной так и эндогенной энергии;
- 3) метагенеза и регионального метаморфизма – с воздействием эндогенной внутриземной энергии.

Таким образом, наметился явный прогресс в познании энергетики земной коры – в части обоснования решающей роли лучистой солнечной энергии в процессах гипергенеза, осадконакопления и литогенеза и конкретизации механизмов ее аккумуляции. Однако эффективность некоторых из них еще нуждается в доизучении, а вопрос о механизмах высвобождения аккумулярованной солнечной энергии остается открытым. Разнообразные геологические процессы формирования земной коры рассматриваются с традиционных, но, как выясняется, не совсем верных позиций эндогенной энергетики.

Прежде всего, незаслуженно принижена значимость структурной перестройки кристаллического вещества в зоне гипергенеза. Она проявляется в тесной взаимосвязи с его механической дезинтеграцией с увеличением координационного числа катионов, межатомных расстояний и молекулярных объемов и в совокупности представляет собой единый механизм аккумуляции солнечной энергии. Действительно, наиболее богатые поверхностной энергией тонкодисперсные пелитовые продукты гипергенеза, составляющие до 60 % объема осадочных толщ, сложены самыми энергоемкими, глинистыми минералами, окислами, гидроокислами и др. Большинство химических элементов в них, преимущественно амфотерных и переменной валентности, характеризуются максимальными валентностями, атомными объемами и межатомными расстояниями. Следовательно, микроструктурные и химические преобразования вещества в зоне гипергенеза происходят не только на молекулярном (минеральном), но и на атомном уровнях. При этом многие химические элементы переходят на более высокие энергетические уровни, чем в метаморфических и магматических породах, и приобретают гипертрофированные химические свойства и связи.

Как показывают результаты исследований Д. Н. Трифонова [20], такие перестройки электронных оболочек атомов в зоне гипергенеза претерпевают более 70 % химических элементов. В связи с этим представления А. Ф. Капустинского [4] о земной коре (перисфере) как зоне нормального химизма нуждаются в уточнении. В частности, поверхностную зону гипергенеза целесообразно выделить в самостоятельную «гиперсферу» вырожденного химизма, гипертрофированного под воздействием солнечной радиации. В ней и Периодическая система Д. И. Менделеева приобретает иной вид, с пятью периодами вместо семи.

По расчетам А. П. Виноградова, Земля представляет собой холодное космическое тело со средней температурой 277° К (4°С). Эндогенная (внутриземная) ее энергия, около 80 % которой приходится на радиогенное тепло ( $4,26 \cdot 10^{20}$  кал/г), в основном реализуется стационарным кондуктивным тепловым потоком, почти одинаковым в океанических ( $2,96 \pm 0,2 \cdot 10^{20}$  Вт/м<sup>2</sup>) и континентальных ( $2,52 \pm 0,2 \cdot 10^{20}$  Вт/м<sup>2</sup>) областях. Он варьирует в пределах  $0,7 - 2,2 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с (в среднем  $1,05 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с) и обеспечивает нормальный геотермический градиент от 6°С/км в древних щитах платформ до 150°С /км в молодых орогенных поясах.

Стационарность теплового потока обусловлена тем, что генерация радиогенной и другой эндогенной энергии (адиабатического гравитационного сжатия, приливного трения, поглощения нейтрино и др.), достигающая  $7 \cdot 10^{27}$  Эрг, компенсируется тепловым длинноволновым излучением поверхности Земли ( $9 \cdot 10^{27}$  эрг). Из этого следует, что она обеспечивает лишь общий геотермический фон, а метаморфизм вулканогенно-осадочных толщ и другие геологические процессы совершаются за счет энергии из каких-то других источников.

К их числу относится и возможное воздействие энергонасыщенных ювенильных «сквозьмагматических растворов» (по Д.С. Коржинскому). В их новой интерпретации А.А. Маракушевым [9], эти глубинные флюиды образуются в результате импульсной водородной дегазации внешнего жидкого ядра Земли под океанической корой. В верхней мантии они частично окисляются кислородом силикатов с образованием воды, способствующей снижению температуры плавления мантийного вещества и возникновению базальтовых магматических очагов астеносферы. Эти импульсные газовые струи обуславливают периодическую активизацию спрединга в срединно-океанических хребтах, с сопряженным тангенциальным сжатием и диастрофизмом в окраинно-океанических подвижных поясах. Достигая стратосферы, они способствуют разрушению озонового слоя, возникновению ледяных «перламутровых облаков», повышающих альбедо Земли и приводящих к периодическим кризисам в биосфере и материковым оледенениям.

Воздействие глубинных газовых флюидов ограничено пространствами с океанической корой, а эндогенной энергии (из всех известных источников) недостаточно для геологических процессов формирования континентальной коры: по расчетам [21 и др.], только на региональный метаморфизм осадочных толщ требуется в 3 раза больше энергии, а коровые магматизм и структурообразование еще более энергоемки. Поэтому существующие представления об эндогенной природе всех этих процессов, вроде бы подтверждаемые эндотермическим характером регионального метаморфизма, оказываются не вполне убедительными.

Важное значение приобретает тот факт, что сами осадочные толщи обладают огромной внутренней энергией, в основном за счет аккумулированной в зоне гипергенеза эффективной солнечной радиации. Она оценивается в  $1,36 \cdot 10^{24}$  кал/год, что на три порядка (примерно в 5000 раз) превышает эндогенную энергию. Это подтверждается и расчетами энергетического баланса Земли, показавшими значительный избыток энергии ( $3,5 - 7,0 \cdot 10^{20}$  кал/год) в земной коре.

Внутренняя энергия любого кристаллического вещества определяется количеством движения (импульсом) микрочастиц и интегрирует энергетические вклады поступательного и вращательного движений молекул и атомов, их взаимного притяжения и отталкивания, внутриатомной и внутриядерной энергии и др. Количество ее можно рассчитать по известному соотношению массы и энергии А. Эйнштейна:  $E = m \cdot C^2$  – либо более точному выражению релятивистской механики:

$$E = \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где:  $m_0$  – масса покоя тела;

$v$  – скорость его движения;

$C$  – скорость света.

Как оказалось, 1 грамм любого вещества эквивалентен  $9 \cdot 10^{20}$  эрг;  $9 \cdot 10^{13}$  Дж;  $2,15 \cdot 10^{15}$  ккал или 25 миллионам кВт/ч энергии, соизмеримой с годовой энергоотдачей крупной АЭС, достаточной для нагревания 200 тыс. т воды на  $100^\circ\text{C}$  от точки замерзания до кипения. Если учесть общую массу осадочных пород ( $2 \cdot 10^{24}$  г) и всей силикатической земной коры ( $3 \cdot 10^{26}$  г), то можно представить, какими астрономическими цифрами она исчисляется. Полностью она может выделиться только при аннигиляции вещества (к счастью, маловероятной даже во всей нашей Галактике), а в земных условиях она высвобождается лишь частично: при термоядерных реакциях синтеза элементов – 0,65%; ядерных (радиоактивный распад) – 0,09%; химических – всего  $5 \cdot 10^{-9}\%$ ; общего ее количества, тем не менее, вполне достаточно для всех природных химических преобразований вещества. Земная кора, как и вся Земля, представляет собой открытую термодинамическую систему, обменивающуюся веществом и энергией (в основном, через осадконакопление и вулканизм) как с подстилающей верхней мантией, так и с вышележащей зоной гипергенеза, а через нее и с космическим пространством.

Решающая роль регионального метаморфизма осадочных толщ в формировании земной коры общеизвестна. В связи с эндотермическим его характером большинство зарубежных и отечественных исследователей главным фактором его проявления считали тепловое воздействие и с повышением температуры выделяли серии последовательных фаций метаморфизма. Давление обычно рассматривалось как второстепенный вспомогательный фактор, осложняющий минералообразование, которое отображалось выделением групп фаций (фациальных серий) или формационных рядов

метаморфических и сопряженных с ними магматических образований высокого, умеренного и низкого давления.

Ранее автор при изучении метаморфических и магматических комплексов Западного Тянь-Шаня [3; 11–13 и др.] в развитие петрогенетических построений А. Мияширо, А.А. Маракушева и Н.Л. Добрецова, выделял четыре типа регионального метаморфизма, проявившихся в различных физико-химических условиях и геодинамических обстановках [21].

Вместе с тем результаты проведенных геолого-петрологических и особенно термо-барометрических исследований [3; 11–15 и др.] вынудили автора признать, что при метаморфизме давление играет доминирующую энергообразующую роль, а температура определяет лишь последовательность метаморфических реакций. С повышением давления по мере адиабатического сжатия пород часть внутренней энергии переходит из связанного в свободное состояние. Пока в системе нет потребителей этой энергии, она высвобождается в виде теплового хаотического движения микрочастиц и способствует повышению температуры пород. По мере достижения оптимального ее значения, пределов сжатия и прочности минералов за счет этой энергии происходит обратимая реакция преобразования ставшей метастабильной минеральной ассоциации в более устойчивую в новых P-T-условиях. Эта реакция продолжается до достижения физико-химического равновесия между начальными и конечными ее продуктами и минимального в этих условиях значения свободной энергии системы.

Подобные преобразования осадочных толщ наиболее полно и многообразно происходят, в сущности, по механизму «метаморфизма погружения» чарнокит-андалузит-сланцевого типа в окраинно-континентальных подвижных поясах и некоторых других геоструктурах. Они достаточно подробно и всесторонне рассмотрены ранее [3; 11–15 и др.], а здесь отметим лишь, что эти преобразования начинаются еще на стадии седиментогенеза с уплотнения и литофикации осадков под воздействием литостатического давления. По данным П.Ф. Швецова [22], наиболее интенсивно они проявляются на глубинах 3–5 км и сопровождаются высвобождением  $1,2 \cdot 10^3$  ккал/м<sup>3</sup> тепла с возникновением положительных геотермальных аномалий в нефтегазоносных бассейнах. Существенную роль при этом, как показал Л.А. Назаркин [10], играет темп осадконакопления.

Последующие реакции метаморфизма принципиально отличаются от литогенеза тем, что достигают физико-химического равновесия. Последовательная серия этих реакций, фиксирующих скачкообразные переходы от самой низкотемпературной цеолитовой (филлитовой) фаций ко все более высокотемпературным фациям метаморфизма обусловлено пульсирующим высвобождением внутренней энергии осадочно-метаморфических толщ по мере прогрессирующего адиабатического их сжатия под воздействием литостатического давления. При этом происходят дегидратация и декарбонатизация пород с образованием метаморфогенных водных растворов, активно участвующих во всех этих преобразованиях как переносчики вещества и энергии.

При достижении условий гранулитовой фации ( $T=800-900^\circ\text{C}$  и  $P=5,5-6,0$  кб) метаморфические преобразования пород значительно усложняются и приобретают новую направленность [15 и др.]. Переломный их момент определяется окончательной дегидратацией пород и разложением гидроксилсодержащих слюд и амфиболов с образованием надкритических существенно калиевых кремнисто-щелочных флюидов. В связи с высокой энергонасыщенностью, усугубляемой диссоциацией воды, они проникают в вышележащие породы амфиболитовой фации, разогревают их и вызывают метасоматическую гранитизацию. По мере достижения ими фаз наиболее легкоплавких эвтектоидных составов происходит их селективное переплавление с образованием глубинных венитовых мигматитов и палингенной гранитной магмы, что приводит к увеличению объема и, следовательно, дислокационного давления. С термодинамической точки зрения плавление происходит потому, что гранитизированные породы уже достигли предела энергонасыщенности в твердом и кристаллическом виде и вынуждены перейти в более энергоемкое жидкое состояние. Возрастает и пластичность пород как за счет увеличения расплавной фазы, так и «механической их текучести» в связи с полиморфным переходом  $\alpha$ - $\beta$  кварца при  $T=573-600^\circ\text{C}$ . По мере достижения оптимальных значений всех этих параметров гранитизированные и магматизированные породы амфиболитовой фации приобретают способность к образованию гранито-гнейсовых куполов и валов на месте бывших седиментационных бассейнов подвижных поясов. Они воздымаются до уровня изостатического равновесия, обычно среди пород зеленосланцевой фации; в результате осмотической дистилляции и экзотермического растворения воды в расплаве претерпевают дополнительное разогревание, переплавление и гомогенизацию с образованием огромных очагов палингенной гранитной магмы. При избыточном давлении с ними связаны внедрение аллохтонных интрузивных тел и проявления вулканизма. Постепенно они теряют энергию и в конечном счете достигают термодинамического равновесия с вмещающей средой.

Зная элементарные изменения объема и температуры, можно количественно оценить величину свободной энергии, расходуемой на реакцию, а по известной температуре рассчитать обусловившую ее энергию теплового движения микрочастиц, используя выражение:

$$\left(\frac{dE}{dp}\right)_T = -T\left(\frac{dv}{dt}\right)_p - P\left(\frac{dv}{dp}\right)_T,$$

которое с изменением давления в определенном интервале от  $P_1$  до  $P_2$  в интегральной форме приобретает вид:

$$E = \int_{p_1}^{p_2} \left[ T\left(\frac{dv}{dt}\right)_p - P\left(\frac{dv}{dp}\right)_T \right] dp.$$

Энергию теплового движения частиц, идущую на повышение температуры системы, также можно рассчитать по выражению:

$$E = 3/2 KT,$$

где  $K$  — константа Больцмана,  $h = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/град. Отсюда  $T = \frac{2E}{3K}$ .

Расчеты этих величин имеют смысл для конкретных реакций при определенных Р-Т-параметрах, так как варьируют в широких пределах в зависимости от вещественного и гранулометрического состава исходных толщ, количества захороненного в них органического вещества, градиента давления и других факторов. Общее представление о затратах внутренней энергии осадочных толщ на свой метаморфизм можно получить по эндотермическому его эффекту, который, по расчетам П.П. Тимофеева и А.В. Щербакова [18; 19], варьирует в пределах 16,3–1096,7 Дж/ч, что на всю их массу ( $2 \cdot 10^{24}$  г) составит  $3,26 \cdot 10^{25} - 2,19 \cdot 10^{27}$  Дж, или  $7,79 \cdot 10^{23} - 5,24 \cdot 10^{26}$  кал.

В дополнение к намеченной П.П. Тимофеевым и А.В. Щербаковым [18] широкой программы дополнительных исследований по рассматриваемой проблеме целесообразно было бы конкретизировать энергохимические эффекты хотя бы главнейших твердофазовых метаморфических реакций, выявить особенности термодинамического режима различных типов регионального метаморфизма и на этой основе рассчитать общий энергетический баланс земной коры.

#### Список литературы

1. Белов Н.В. Геохимические аккумуляторы // Тр. Ин-та кристаллографии АН СССР. 1952. Вып. 7. С. 73–80.
2. Белов Н.В., Лебедев В.И. Источники энергии геохимических процессов // Природа. 1957. №5. С. 11–20.
3. Геология и полезные ископаемые Республики Узбекистан. Ташкент, 1988.
4. Капустинский А.Ф. К теории Земли // Вопросы геохимии и минералогии. М., 1956.
5. Коржинский Д.С. Преувеличение роли солнечной энергии в энергетике земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1955. №1. С. 52–64.
6. Лебедев В.И. Еще раз о возможности поглощения солнечной энергии кристаллическим веществом Земли // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1956. №8. С. 91–101.
7. Лебедев В.И. Основы энергетического анализа геохимических процессов. Л., 1957.
8. Лебедев В.И., Синицын В.М. Солнечная энергия и проблема образования сиалического слоя земной коры // Бюлл. МОИП. Отд. Геология. 1968. Т. 43, №1.
9. Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М., 1999.
10. Назаркин Л.А. Влияние темпа седиментации и эрозионных срезов на нефтегазоносность осадочных бассейнов. Саратов, 1979.
11. Покровский А.В. Метаморфические комплексы Южного Узбекистана. Ташкент, 1974.
12. Покровский А.В., Федькин В.В., Кусельман А.Р. Термодинамический режим и условия формирования метаморфической толщи гор Каракатау (Южный Нуратау, Западный Узбекистан) // Узбекский геологический журнал. 1986. №2. С. 4–12.
13. Покровский А.В., Карасева Т.А., Кусельман А.Р. [и др.]. Метаморфические формации Западного Узбекистана и их рудоносность. Ташкент, 1988.
14. Покровский А.В. Петрогенетические типы регионального метаморфизма, основные из особенности и закономерности проявления // Узбекский геологический журнал. 1996. №3. С. 38–46.
15. Покровский А.В. Типы гранитоидов и роль экзогенных процессов в их формировании // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. Вып. 7. Естеств. науки. С. 7–19.
16. Резницкий Л.А. Калориметрия твердых тел. М., 1981.
17. Синицын В.Н. Сиаль. Историко-генетические аспекты. Л., 1982.
18. Тимофеев П.П., Щербаков А.В. Проблемы энергетике осадочного процесса // Литол. и полезн. ископ. 1979. №1. С. 3–22.
19. Тимофеев П.П., Щербаков А.В., Ильин В.А. Энергетика гипергенеза // Литол. и полезн. ископ. 1981. №4. С. 5–17.
20. Трифонов Д.Н. Границы и эволюция Периодической системы. М., 1963.
21. Файф У., Тернер Ф., Ферхуген Дж. Метаморфический реакции и метаморфические фации. М., 1962.
22. Швецов П.Ф. Геотермические условия мезо-кайнозойских нефтяных бассейнов. М., 1974.

**Об авторе**

А. В. Покровский — д-р геол.-минерал. наук, проф., РГУ им. И. Канта, phisgeo@mail.ru

**Author**

Prof. A. Pokrovsky, IKSUR, phisgeo@mail.ru