

Система вода–порода занимает особое место в развитии окружающего мира. Автор доказывает, что не только верхняя оболочка, но и вся земная кора создана в результате эволюции этой системы.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА “ВОДА–ПОРОДА”

С. Л. Шварцев

Многие специалисты полагают, что на начальном этапе развития Земля была сложена большей частью алюмосиликатами основного состава базальтоидного типа. Они при взаимодействии с водой и углекислым газом обеспечили эволюцию геологических процессов и явлений. Следовательно, система вода–эндогенные алюмосиликаты обусловила становление окружающего мира на начальных этапах (после появления воды) геологической истории планеты. К тому же система обладает рядом свойств, делающих ее особенно интересной. К последним относится способность к непрерывному геологически длительному развитию с образованием новых соединений и геохимических типов воды, к физико-химической и геологической эволюции с перераспределением огромного количества элементов. С позиции синергетики при наличии  $\text{CO}_2$  система обладает основными признаками самоорганизующейся материи [1]. Результатом ее эволюции являются все осадочные и метаморфические породы, все геохимические типы воды, большинство месторождений полезных ископаемых, многие минералы, да и сама жизнь.

Новые данные позволяют ставить вопрос о фундаментальных свойствах процессов взаимодействия воды с горными породами. Они прослеживаются во всех дочерних системах, включая биологические, и определяют многие основы самоорганизации материального мира на надмолекулярном уровне.

*Равновесно-неравновесное состояние – важнейший фактор самоорганизации.* Долгое время специалисты полагали, что из-за низкой растворимости большинства минералов происходит быстрое насыщение ими воды и растворение прекращается. Для возобновления взаимодействия требуется изменение каких-либо параметров среды. В этом случае растворение может какое-то время продолжаться. При таком подходе считалось, что в подавляющей части земной коры вода находится в равновесии с горными породами.

ШВАРЦЕВ Степан Львович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий Томским отделением Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН.

Только в самой верхней, незначительной по мощности зоне (первые сотни метров) сохранялась неравновесность вследствие активного водообмена. (Он выносил химические элементы из зоны взаимодействия.)

По-другому к этой проблеме подошел академик Д.С. Коржинский [2]. Анализируя геологические факты, он пришел к выводу, что неравновесный характер системы распространяется на большую часть земной коры. И только на значительных глубинах на ограниченных участках, где скорость движения воды настолько мала, что становится ниже скорости протекания химических реакций, устанавливается локальное равновесие.

Положение резко изменилось после внедрения методов равновесной термодинамики, разработки программы расчета равновесия воды с горными породами и принципов математического моделирования эволюции этой системы. Началось сопряженное изучение состава подземных вод и горных пород в конкретных геологических условиях (включая различные минеральные новообразования). Большое влияние на состояние исследований в этой области оказала книга американских геохимиков Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [3]. В ней разработаны подходы к установлению равновесия воды с горными породами и, в частности, алюмосиликатами на основе химической термодинамики Гиббса.

На базе методических приемов Р.М. Гаррелса, Ч.Л. Крайста, Х.К. Хелгесона, П.Б. Бартона и других началось систематическое изучение фактического состояния равновесия подземных вод с горными породами. Анализ результатов показывает, что независимо от глубины залегания, скорости движения и генетического типа воды, интенсивности водообмена, типа геологических структур, температуры, давления и т.д. растворы оказываются всегда неравновесными с некоторыми эндогенными минералами, но равновесными с другой, формирующейся в этих условиях, группой минералов.

Перечень минералов, с которыми вода равновесна и с которыми неравновесна, меняется в зависимости от конкретных условий. Это позволило обосновать принцип равновесно-неравновесного состояния системы вода–порода. Согласно ему, в земной коре независимо от глубины и

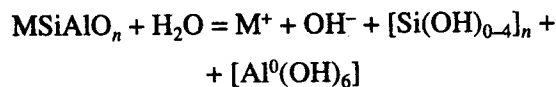
типа водного раствора всегда есть неравновесные с водой и поэтому непрерывно растворяющиеся минералы. На их месте формируются новые равновесные кристаллические соединения. Этот процесс идет везде, где есть вода и порода. Вторичный равновесный с водой минеральный комплекс складывается на протяжении всего взаимодействия воды с породой, а не только когда наступает локальное равновесие. Смена одного минерального комплекса другим нашла отражение в хорошо известных фактах стадийности вторичного минералообразования в рудообразующих, гидротермальных, метасоматических, гипергенных и других процессах.

По И. Пригожину и И. Стенгерс, в случае термодинамического равновесия системы ее элементы (молекулы) независимы друг от друга. Каждый из них "игнорирует" остальных и ведет себя пассивно. Такие элементы авторы предлагают называть гипнонами, то есть пребывающими в гипнотически-спящем состоянии. Переход в неравновесное состояние "пробуждает" гипноны. Между ними устанавливается когерентная связь. В этом случае система ведет себя так, как если бы она была вместительным дальнедействующим сил. Несмотря на то, что молекулярные силы – короткодействующие, система строится так, как если бы каждая молекула была "информирована" о состоянии системы в целом [4].

Для синергетики, в отличие от кибернетики, неравновесность – не источник гибели, не состояние деструкции, а, напротив, – основание становления упорядоченности, причина структурогенеза. Неравновесность – движущая сила эволюции, приводящая к изменению потоков энергии (и вещества), возникающих "при стремлении к равновесию закрытых мегасистем, включающих в себя как составную часть эволюционирующие открытые системы" [5]. С рассматриваемых позиций равновесно-неравновесный характер системы вода-порода выступает основным фактором эволюции минерального вещества, разнообразных процессов его самоорганизации и саморазвития.

Положение о равновесно-неравновесном состоянии является базовым в понимании механизмов самоорганизации. Главное заключается в том, что система внутренне противоречива. Неравновесность системы побуждает ее к непрерывному внутреннему саморазвитию и, как следствие, к формированию новых структурно-пространственных преобразований, возникновению синергетических явлений самоорганизации.

*Возникновение и усложнение пространственно-временных структур.* Непрерывное взаимодействие воды, углекислого газа и породы приводит к формированию минеральных фаз принципиально иного состава. Ведущим механизмом такого процесса выступает гидролиз алюмосиликатов:



или



где  $n$  – неопределенные атомные отношения;  $o$  и  $t$  – соответственно окта- и тетраэдрическая координация;  $M$  – металлические катионы;  $Al$ , изоморфный с  $Si$ , помещен в формулах между  $Si$  и  $O$ ;  $[Si(OH)_{0-4}]_n$  – более или менее минерализованные группы кремнезема, где координация  $Si$  относительно  $OH$  колеблется от 0 до 4 в зависимости от степени полимеризации.

Состав вновь образующейся фазы резко отличается от растворяющейся горной породы и определяется параметрами геохимической среды. В зоне гипергенеза это обычно глины, в зоне гидротермального метасоматоза – цеолиты, хлориты, серпентин, в зоне катагенеза – каолинит, хлорит, гидрослюда, альбит и т.д. Следовательно, одна твердая фаза, растворяясь по механизму гидролиза, дает начало другой твердой фазе. Последняя формируется либо на месте разрушаемого минерала, повторяя его структуру (псевдоморфное замещение), либо на некотором расстоянии от него.

В любом случае из двух компонентов – вода и порода – возникает третий. Мнение, что гидролиз алюмосиликатов приводит к разрушению структуры и дезинтеграции системы, неверно, так как вторичная минеральная фаза, создавая новые структурные элементы, придает развивающейся системе иные свойства. Одновременно меняется и состав водного раствора. Через полученные из породы и воды химические элементы он формирует новую геохимическую среду, воздействующую на характер вторичной минеральной фазы. Ее состав также меняется. Система еще более усложняется, так как появляется дополнительный структурный элемент, лучше приспособленный к конкретным условиям среды и отражающий энергетически более выгодное состояние системы.

Вторичная фаза равносильна по своему значению размножению, хотя и имеются существенные отличия. Но в любом случае это отражает качественный скачок в развитии исходной системы и образовании дочерних подсистем.

Механизм воздействия вторичных фаз на систему таков: геохимическая среда контролирует

состав формирующейся вторичной минеральной фазы, но, когда та выпадает из раствора, меняется и среда. Измененная среда приводит к выпадению другой минеральной фазы, что сказывается на характере самой среды. Растворяющаяся порода, в свою очередь, также влияет на среду, восстанавливая связанные вторичной фазой химические элементы (например, кремний и алюминий), формирующие каолинит. Таким образом, среда выступает как неразрывная часть эволюции самой системы, как ее продукт, эволюционирующий вместе с ней.

Образование вторичной минеральной фазы представляет собой зарождение качественно новой системы, состоящей из дополнительных структурных элементов. Они более упорядочены, приспособлены к условиям среды и поэтому из локальной области (точки зарождения), постепенно расширяясь, отвоевывают новое геологическое пространство. Таковыми, например, являются латериты, оккупировавшие тропические области зоны гипергенеза; глинистые продукты выветривания, широко развитые в условиях умеренного климата; железисто-марганцевые конкреции, отвоевавшие себе центральные части дна океанов; карбонатные кальклеты, развитые в степных ландшафтах, и т.д. К этому же типу относятся мощные зоны хлоритизации, монтмориллонитизации в осадочных бассейнах, зоны гидротермально-измененных пород околорудных изменений и т.д. Зарождение и распространение вторичной минеральной фазы – типичный пример нуклеации как начального этапа процесса формирования диссипативных структур.

Вода, проходя по горным породам, через определенное время концентрирует необходимое для составления вторичной фазы количество элементов в растворе. С этого момента и начинается формирование новой фазы. Следующий объем воды также попадает в точку, где начался процесс нуклеации, в насыщенном состоянии и продолжает минералообразование. И так до тех пор, пока существенно не изменится геологическая обстановка и, соответственно, пути движения воды.

*Механизм геологической саморегуляции состояния системы вода–порода.* Образование вторичной минеральной фазы приводит систему в принципиально иное состояние, в синергетике получившее название стационарного [4]. Таких состояний, последовательно сменяющих друг друга, может быть очень много. Однако система стремится закрепиться в стационарном состоянии и вырабатывает механизмы стабилизации, обеспечивающей ей самозащиту. В чем их суть?

Возникновение минеральной фазы как центра нуклеации приводит к разрыву установившихся связей, к механической изоляции реагирующих

исходных составляющих системы. Чтобы взаимодействие продолжалось, свежие порции воды вынуждены поступать к месту реакции через сформировавшийся вторичный минерал и с ним взаимодействовать физически и химически. Молекулы воды, растворяя вторичный минерал, изменяют формирующуюся геохимическую среду в строго определенном направлении и содействуют стабилизации уже возникшей фазы. В этом проявляется, во-первых, свойство системы воспроизводить себе подобные формы, что помогает сохранить исходную организацию вещества, ее целостность и возможность саморазвития и распространения в пространстве; во-вторых, в унаследованности кроются механизмы регулирования отношений системы со средой. Последняя, трансформируясь, способствует росту такой минеральной фазы, которая при растворении влияет на геохимическое состояние среды. Наконец, в-третьих, система может ослаблять или исключать случайные взаимодействия, стабилизировать эволюционный процесс на определенной стадии развития и тем самым защищать себя от внешних случайностей.

Все вышеперечисленное позволило ввести понятие о саморегуляции системы вода–порода. Это свойство системы сохранять возникающие стационарные состояния, характеризуемые пространственными структурами, способными к саморазвитию и распространению во времени и пространстве. Причем система сохраняет структурно-функциональные параметры и способна к дальнейшему развитию, хотя и перешла в энергетически более выгодное состояние.

Возникновение вторичной минеральной фазы стабилизирует систему. Она длительное время целенаправленно воспроизводит новообразованный минерал. Его количество растет и, постепенно накапливаясь, он оккупирует геологическое пространство. Приведу несколько геологических примеров: образование гипса – латеризация, каолинита – каолинизация, оксидов кремния – окремнение, кальцита – карбонатизация, серпентина – серпентинизация, оксидов Fe и Mn – конкрециообразование и т.д.

Из сказанного вытекают, по крайней мере, два следствия. Первое состоит в том, что с появлением вторичной фазы возникает противоречие между развитием системы (формирование новых минеральных фаз и геохимических типов воды) и ее стабилизацией в конкретном стационарном состоянии. Борьба этих тенденций чаще всего завершается переходом системы в новое состояние. Однако стабилизация на конкретном уровне может продолжаться геологически длительное время. Соотношение тенденций по времени определяется конкретными гидрогеологическими условиями региона.

Второе следствие связано с появлением вторичной фазы и изменением характера взаимодействия в основной системе. Происходит это по следующим причинам: 1) образование вторичной фазы воздействует непосредственно на характер среды и 2) вторичная фаза создает механический барьер между движущимся водным раствором и исходной горной породой. Рассмотрим последнее более подробно.

При отсутствии вторичной фазы вода без помех взаимодействует с исходной алюмосиликатной породой и в идеальном случае получает химические элементы только из горной породы, с которой она взаимодействует. При появлении вторичной фазы непосредственный контакт воды с первичной породой затруднен. Прежде чем попасть в коренные породы, вода проходит через вторичную минеральную фазу и, растворяя последнюю, меняет скорость движения и свой химический состав, что непосредственно сказывается на характере и интенсивности взаимодействия получившегося раствора с первичной горной породой и, в частности, на соотношении выносимых и накапливаемых элементов в растворе и вторичной фазе.

*Эволюция взаимодействия, усложнение состава вторичных образований и водного раствора.* Итак, из первичного минерала, воды и CO<sub>2</sub> стадийно образуется гамма вторичных продуктов, ассоциирующих со строго определенными геохимическими типами воды. Например, из анортита может получиться гиббсит, бемит, каолинит, монтмориллонит, кальцит, альбит, хлорит, разнообразные цеолиты, эпидот, ломонтит, флюорит и т.д. Формирование каждой последующей фазы – строгая закономерность, обусловленная степенью накопления химических элементов в воде за счет растворения исходной горной породы. Начальный этап растворения имеет конгруэнтный характер, при котором все химические элементы переходят в раствор.

С момента образования вторичной фазы растворение исходного минерала становится инконгруэнтным, и, соответственно, накопление элементов в растворе происходит неравномерно: одни элементы выпадают из раствора, а другие продолжают в нем накапливаться. Со временем в результате непрерывного взаимодействия твердых фаз становится все больше, но и в растворе количество накапливаемых элементов увеличивается (рис.1).

В геохимии элементы, связанные вторичными фазами, принято называть концентрирующимися, а те, что оказываются в растворе, рассеивающимися. Значит, система вода–порода обладает способностью концентрировать одни элементы и рассеивать другие, что в конечном итоге приво-

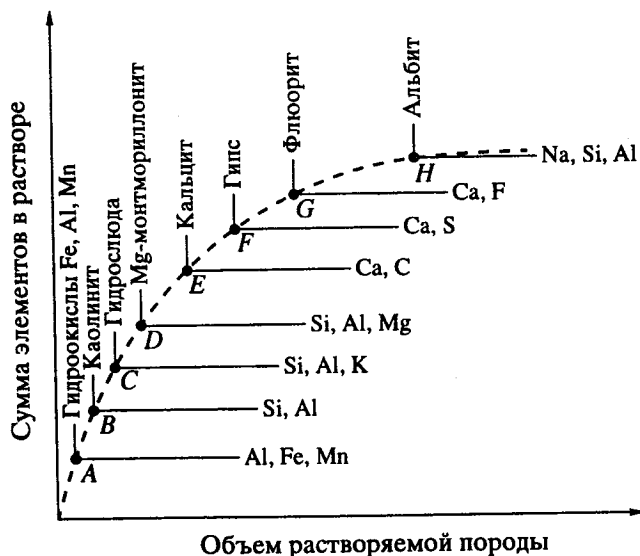


Рис. 1. Схема соотношения химических элементов, накапливаемых в растворе и концентрируемых твердой фазой. А–Н – точки, отражающие начало образования вторичной фазы и перехода системы в иное стационарное состояние

дит к изменению их соотношения в разных минеральных фазах и геохимических типах воды. Неравномерность накопления элементов в водном растворе и твердых фазах приводит к появлению так называемых избыточных элементов в воде, служащих источником рудообразования. Отсюда следует, что и рудогенерирующее свойство при- сущее рассматриваемой системе [6].

Непрерывное изменение соотношения концентрируемых и рассеиваемых элементов – еще одно фундаментальное свойство эволюционного развития системы вода–порода. Оно определяет конкретное проявление форм и механизмов взаимодействия и многопланового усложнения состава водного раствора и минеральных систем.

Главная причина “размножения” и усложнения водно-минеральных систем заключается в стремлении к физико-химическому равновесию. Неравновесные части системы медленно преобразуются и разрушаются, равновесные формируются. Означает ли это окончание взаимодействия, как это вытекает из положений синергетики? Чтобы разобраться в данном вопросе, приведем конкретный пример.

Взаимодействие воды с анортитом может приводить в зависимости от конкретных условий среды, как уже было сказано, к формированию гиббсита, каолинита, Са-монтмориллонита, кальцита и

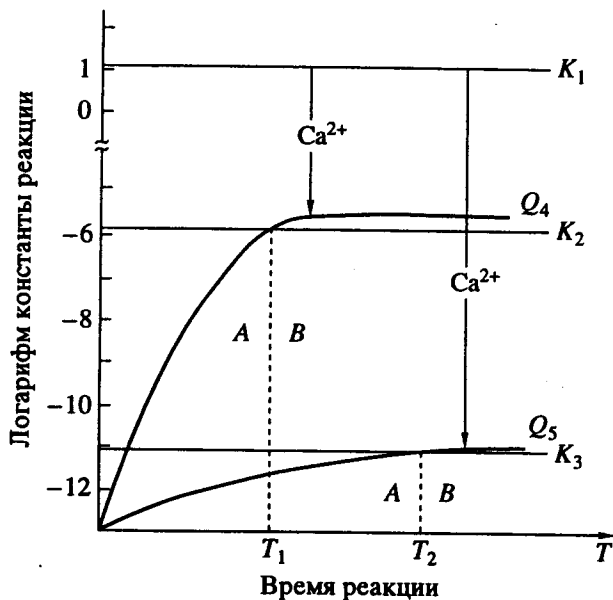
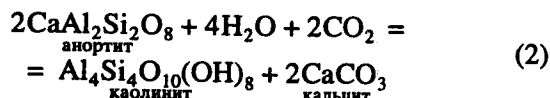


Рис. 2. Соотношение констант и квантов ( $Q$ ) реакций растворения анортита ( $K_1$ ), кальцита ( $K_2$ ) и флюорита ( $K_3$ ). А – рассеивающий, В – концентрирующий этапы взаимодействия

т.д. Возьмем случай с кальцитом, образующимся по реакции:



Чтобы в этой системе формировался кальцит, вода должна длительное время взаимодействовать с анортитом и накопить такое количество  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ , произведение которых превысит константу равновесия реакции растворения кальцита (рис. 2). Как видно из рисунка, система носит четко выраженный равновесно-неравновесный характер.

Приведенный пример раскрывает некоторые общие механизмы эволюционного развития. В-первых, взаимодействие в системе вода–первичный алюмосиликат характеризуется относительно поведения любого растворяемого элемента двумя этапами. На первом этапе (рис. 2, поле А) элемент переходит в водный раствор и мигрирует вместе с ним. Его содержание в растворе растет по мере увеличения времени взаимодействия. После начала формирования вторичной фазы наступает следующий этап (рис. 2, поле В), когда элемент связывается формирующейся фазой и концентрации в водном растворе не растут. Поэтому первый этап взаимодействия может быть назван рассеивающим, а второй – концентрирующим. Так как в процессе растворения породы участвует много химических элементов, то применитель-

но к системе таких этапов может быть выделено несколько.

Во-вторых, установившееся на втором этапе химическое равновесие не означает химического покоя, поскольку количество элементов вторичной фазы в системе продолжает увеличиваться. Кальций из анортита медленно, но непрерывно поступает в раствор, а из последнего в кальцит. Химическое равновесие в дочерней системе (вода–кальцит) резко сужает рамки ее развития.

**Передача информации.** Информация – один из основополагающих факторов синергетической теории самоорганизации материи. В соответствии с ее положениями эволюция не только органической, но и неорганической материи сопровождается постоянным ростом значимости информации, что приводит к развитию и усложнению самой материи. Возникновение и разрушение системы вода–порода – это информационные процессы, фиксирующиеся в структуре новообразований. Следовательно, структура системы выступает основным и практически единственным источником информации в неживой природе. Но каков же механизм получения, оценки и использования информации в эволюционном развитии системы? Ответ один – структура формирующихся вторичных образований. При этом нельзя забывать, что среди последних имеются твердые (минералы) и жидкие (геохимические типы воды). Кроме того, именно структура воды обладает способностью изменяться под воздействием многих факторов. Она, по мнению большинства исследователей, определяется соотношением групп молекул, имеющих водородные связи, с одиночными молекулами. Это соотношение зависит от факторов, среди которых важнейшее место принадлежит температуре и составу раствора. При их изменении закономерно меняются и структурные особенности воды.

Эволюция системы вода–порода приводит к избирательному концентрированию химических элементов в растворе, что определяет целенаправленное изменение структуры воды при одной и той же температуре. Такие изменения кодируют в себе информацию, приводящую к перемене поведения определяющих ионов в растворе. Уменьшение числа ионов или смена их связей между собой обуславливает структурную трансформацию раствора и прекращение процессов осаждения этих групп молекул. Если в это время другие химические элементы концентрируются в растворе, то они также меняют его структуру и тем самым формируют код, руководящий их дальнейшим поведением. Следовательно, во взаимодействии раствора с концентрирующимися в нем элементами через создание определенных структурных ячеек проявляется кодовая информация, обуславливающая пространственную и

временную координацию будущих событий и поведение системы в целом.

Можно прийти к выводу, что структурность раствора включает в себе механизмы использования, переработки и передачи информации. Многообразие структурных элементов, их изменчивость под воздействием внешних факторов выступает в качестве источника генерации новой информации, фиксирующейся в создаваемых формах. Исходя из сказанного, было выдвинуто положение о том, что основной код информации, контролирующей эволюционное развитие системы вода-порода, заложен в структурных особенностях водного раствора.

Учитывая непрерывный характер структурных изменений под действием концентрирующихся элементов и взаимосвязей ассоциантов с мономерными молекулами воды, нетрудно понять, что информационная связь между формирующейся твердой фазой и раствором имеет непрерывный направленный характер. Информация передается вещественно-энергетическим потоком, существующим между водой и растворенным веществом, между раствором и формирующейся вторичной фазой. Возникновение новой твердой частицы служит сигналом к превращениям самого раствора. Он, структурно изменяясь, направляет ход реакции образования твердой фазы того или иного состава. Следовательно, прямые и обратные связи совершаются посредством структурных изменений раствора. Структурная ячейка последнего выступает главным элементом кодовой информации, а структура воды в целом – источником зашифрованной информации. Отдельные элементы структуры водного раствора – части разнообразной информации.

В синергетике часто фигурирует пример кристаллического минерала как самоорганизующейся системы атомов. Довольно подробно этот вопрос рассмотрен А.С. Щербаковым. Он считает, что кристаллу присуще свойство самоорганизации, в нем идут информационные процессы. Реализацией их выступает способность кристалла восстанавливать утраченные части, активно регулировать систему своих отношений со средой, вести отбор определенных атомов и даже «во взаимодействии с элементарным содержанием среды... проводить оценку и контроль свободных частиц. Он способен на основе каких-то присущих ему потенций совершать выбор, "решать вопрос" о том, может ли данный атом быть включен в строительство его структурной решетки или нет» [7, с. 76].

Механизмы селективного отбора атомов, регулирования информационных взаимосвязей со средой, самоорганизации кристаллической системы неясны и связаны с какими-то неизвестными потенциальными кристалла. Не вдаваясь в детали этого

вопроса, отмечу, что изложенные представления об информационном регулировании эволюционного развития системы вода-порода позволяют заключить, что в качестве самоорганизующегося начала выступает структура водного раствора. Раствор в силу уникальности своего строения (дисимметрия молекулы воды, водородные связи и т.д.), необычной химической активности формирует внутреннюю организацию поведения элементов и контролирует структурно-функциональные параметры взаимоотношения с кристаллом. Вместе с тем раствор не образует когерентной системы атомов, способной к самоорганизации без горной породы (минерала), выступающей донором и акцептором химических элементов. Без них структура водного раствора при прочих равных условиях остается постоянной. Недостаточно и одного минерала, конгруэнтное растворение которого может привести к установлению термодинамического равновесия в системе. Требуется именно горная порода, состоящая из нескольких минералов. Только в этом случае возникает неравновесно-равновесная внутренне противоречивая система, способная к накоплению и передаче информации, обладающая механизмом селекции твердых частиц определенного состава. Он и представляет собой информационный механизм самоорганизации системы вода-порода в целом.

Изложенное выше показывает, что система вода-порода характеризуется многими фундаментальными свойствами и механизмами взаимодействия, присущими окружающему миру, геологическим и биологическим системам. Отмеченные особенности делают систему вода-СО<sub>2</sub>-первичные алюмосиликаты одной из важнейших в истории развития Земли. Именно из нее возникло множество других систем. Сформированные в результате эволюционного развития этой системы вторичные минеральные фазы и геохимические типы воды постепенно захватывали все новые этажи литосферы, формировали геохимические среды. Они, в свою очередь, определяли образование новых минеральных фаз, влияющих на характер среды. Этот процесс геологически непрерывен и бесконечен.

Прямые связи многих геологических явлений с исходной системой вода-порода не выявлены, но, вне сомнения, существуют. Совершенно очевидно, что геологическим результатом эволюционного развития этой системы является формирование многочисленных минералов, горных пород, геологических тел, формаций, месторождений полезных ископаемых, геохимических типов воды, геологических оболочек, многочисленных процессов и явлений, а также возникшей позже биологической системы. Система вода-порода положила начало эволюции косного вещества, а затем биокосного и живого. В этом, в частности,

кроются истоки становления и развития окружающего нас мира.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-05-64918).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Шварцев С.Л.* К проблеме самоорганизации геологической системы вода–порода // Геология и геофизика. 1995. № 4.
2. *Коржинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982.
3. *Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968.
4. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1985.
5. *Голубев В.С.* Сопряженные процессы и эволюция // Идея развития в геологии: вещественный и структурный аспекты. Новосибирск: Наука, 1990.
6. *Шварцев С.Л.* Рудогенерирующие процессы в эволюционном развитии системы вода–порода. Геология рудных месторождений. 1994. № 3.
7. *Щербаков А.С.* Самоорганизация материи в неживой природе: философские аспекты синергетики. М.: Изд-во МГУ, 1990.