

Определяющая роль воды в формировании и эволюции Земли*

А.П.ЛИХАЧЕВ (ЦИНГРИ)

Данные, известные в литературе, и результаты собственных исследований позволили предположить, что вода играет решающую роль в процессах формирования и эволюции Земли [8, 21]. Этот вопрос рассматривается в настоящей статье, не преследуя цели опровержения существующих взглядов по затрагиваемой тематике, а обсуждая события, в которых вода могла быть определяющим фактором.

В излагаемых суждениях учитываются следующие общие закономерности состояния, поведения и взаимодействия веществ, находящихся в термоградиентных условиях при повышенных и высоких ($100\text{ }^\circ\text{C}$) температурах [4, 5, 19].

1. В условиях температурного градиента, свойственного всем природным системам, взаимодействие твердых, расплавных и флюидных веществ сопровождается проявлением химических транспортных реакций — образованием подвижных в газовых и жидких средах простых и сложных (комплексных) соединений и переносом их из одной температурной области в другую. При этом летучие компоненты выполняют роль лигандов L (например, OH^- , Cl^- , F^- , NO_2 , NH_3 , H_2O и др.) — переносчиков элементов растворяемых веществ M ($\text{M} \rightarrow \text{L} \rightarrow \text{ML} \rightarrow \text{M} \rightarrow \text{L}$).

2. Находясь в едином объеме, флюиды циркулируют между высокотемпературной (горячей) и относительно низкотемпературной (холодной) зонами (рис. 1). В горячей зоне вещества растворяются (образуются простые и комплексные соединения), а в холодной они отлагаются с последующим возвращением освободившихся лигандов (флюидов) в зону растворения и новым повторением процесса вплоть до полного переноса вещества из одного места в другое. Отложение веществ в холодной зоне вызывается распадом комплексных соединений (потерей их устойчивости) вследствие изменения температуры и pH среды.

3. Процессы растворения, переноса и отложения (кристаллизация) веществ определяются рядом факторов [4, 5, 19]: 1) величиной свободной энергии образования ионов и комплексных соединений элементов в растворах; 2) силой (энергией) связи (устойчивостью) элементов в растворяемых твердых и расплавных соединениях; 3) количественным соотношением между раствором и растворяемым веществом; 4) состоянием растворяемого вещества и характером его взаимоотношения с раствором; 5) количеством и характером распределения компонентов в исходном веществе.

4. Главные — энергетические факторы. Каждый химический элемент имеет индивидуальные энергетические свойства. Наиболее отчетливо эти свойства проявляются в свободной энергии образования соединений — энергии Гиббса ($G = H - TS$), изобарно-изотермическом потен-

циале. По величине G химические элементы располагаются в определенной последовательности [4, 19], формируя единый термодинамический ряд (рис. 2). Положение элемента в этом ряду обычно остается постоянным — не меняется с изменением вида соединений и состояния веществ. Каждый правостоящий элемент термодинамического ряда образует более прочные связи с другими элементами по сравнению с левостоящими. Поэтому левостоящие раньше и при более низких температурах переходят из твердого соединения в раствор и расплав, чем правостоящие, если данному процессу не мешают другие факторы. Они же менее устойчивы в растворах (соединениях с флюидами) и потому в условиях температурного перепада выпадают из растворов раньше и ближе к зоне растворения, чем правостоящие элементы.

5. Химический транспорт веществ не зависит от расстояния и времени, а определяется устойчивостью соединений и степенью изменения физико-химических параметров среды, в частности, величины температурного градиента.

6. В циркуляционном термоградиентном процессе сравнительно небольшое количество флюидов (5—10%) может производить полный перенос твердого вещества из одного места в другое за весьма короткое время (в течение несколь-

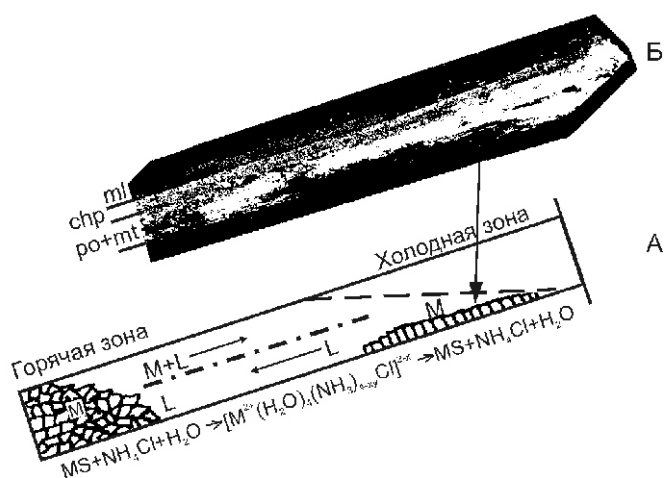


Рис. 1. Схема осуществления химических транспортных реакций:

А — схема переноса вещества: M — элемент растворяемого вещества, L — лиганд растворителя, стрелки — направление движения раствора; внизу — возможная форма переноса металлов сульфидного вещества (MS) раствором хлорида аммония; Б — экспериментально полученные продукты последовательного переполнения медно-никелевых руд в порядке Fe (пирротин-магнетитовый слой, po mt) Cu (халькопиритовый слой, chp) Ni (миллеритовый слой, ml); масштаб 1:0,5

*Доклад на XXXII Международном геологическом конгрессе. Флоренция, Италия, 20—28 августа 2004 г.

$$-\Delta G_{(298)}^0, n \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$$

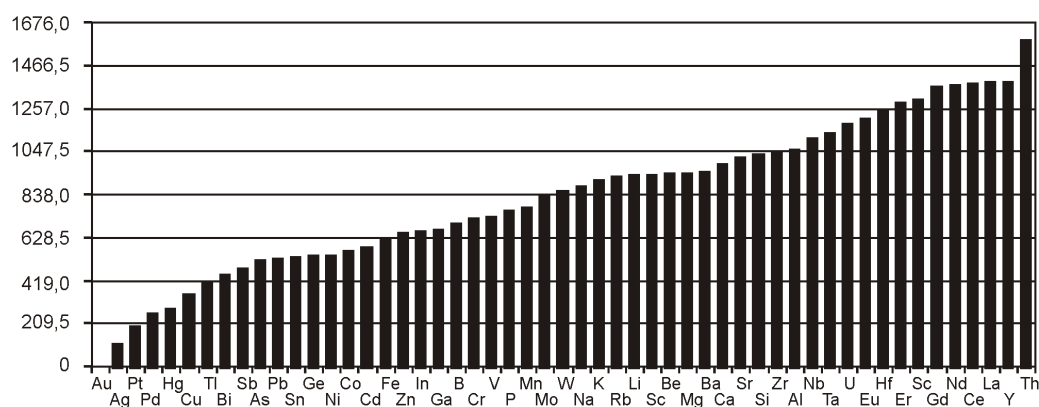


Рис. 2. Термодинамический ряд химических элементов:

обобщенные значения свободной энергии образования известных соединений каждого элемента, рассчитанные по отношению к Au, величина G которого принята за нулевую (расчеты выполнены на основе конкретных данных [4, 5, 19])

ких часов). Например, в наших экспериментах по переотложению веществ на расстоянии 30 см скорость химического транспорта железа сульфидов в растворе хлорида аммония при температуре в горячей зоне ~ 300 С достигала 10% в час от массы исходного (растворяемого) вещества (см. рис. 1).

Процессы образования и эволюции Земли. На пути формирования и эволюции Земли ее вещество проходит три стадии глобального преобразования, определяющие специфическую особенность планеты и возможность существования на ней жизни: раннюю гидратацию, дегидратацию и позднюю (завершающую) гидратацию [8, 21].

Ранняя гидратация. Ранняя гидратация вещества планет происходит во время его нахождения в газовой-пылевой среде, окружающей звезды. Она однотипно реализуется как в варианте нагрева звездой исходно холодного вещества, так и в случае охлаждения звездной плазмы.

В ходе теплового воздействия звезды на окружающее газовой-пылевое вещество газовая составляющая оттесняется на периферию околозвездной «туманности». В ближайших к звездам областях остаются в основном те летучие компоненты, которые входят в состав твердых соединений, устойчивых в определенных температурных интервалах и находящихся на определенных расстояниях от звезды. В интервале 350—500 С происходит массовая гидратация железомagneзических силикатов с образованием преимущественно серпентина ($\text{Mg}_3\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5[\text{OH}]_4$), связывающего значительное количество воды (до 15%). За счет этого гидратированного материала на определенном расстоянии от звезды формируется в дальнейшем водная планета, подобная Земле.

В околозвездном окружении, как и вокруг других подобных звезд, газовая составляющая находилась в постоянной конвекции между ближайшей к Солнцу наиболее нагретой (горячей) и периферической (холодной) частями, а частицы твердого вещества двигались по своим орбитам вокруг Солнца (рис. 3).

Газовая конвекция сопровождалась химическими транспортными реакциями с образованием простых и комплексных соединений, которые обеспечивали перенос вещества твердых частиц из горячей зоны в холодную с концентрированием его на определенных расстояниях от Солнца в зависимости от температурных условий. По мере прогрева околозвездного пространства зоны растворения и отложения (концентрирования) веществ смещались в сторону его периферии.

Устойчивость газовых соединений сверху ограничивается температурой ~ 800 С, ниже которой они распадаются с образованием твердых фаз (рис. 4). Первый, наиболее вы-

сокотемпературный (~ 700 — 800 С) пояс отложения транспортируемого вещества находился в области Меркурия (см. рис. 3). Здесь концентрировались наименее стабильные в газовых растворах компоненты, значительную часть которых составляли левостоящие элементы термодинамического ряда (см. рис. 2), в т.ч. железо. Образующиеся при этом твердые соединения были безводными (см. рис. 4, I). Второй пояс отложения веществ располагался в области Венеры (см. рис. 3), где температура была порядка 600—700 С, а среди выпадающих компонентов присутствовали как левостоящие (рудогенные), так и правостоящие (петрогенные) элементы (см. рис. 2), которые формировали преимущественно безводные соединения (см. рис. 4, II). В третьем, земном, поясе, в интервале температур ~ 350 — 500 С выпадение растворенных компонентов сопровождалось массовым образованием водосодержащих твердых соединений, устойчивых ниже 500 С (в первую очередь серпентина). Здесь отлагались как рудные, так и петрогенные элементы с последующим формированием гидратированных масс (см. рис. 4, III), подобных веществу углистых хондритов CI (см. рис. 4, IV). В четвертом, марсианском, поясе отложились остатки околозвездного твердого вещества, растворяемого газами.

За пределами пояса Марса исходное твердое вещество околозвездной туманности не подвергалось химическому переотложению и дифференциации. Наибольшее скопление твердых веществ в области Венеры и Земли (более 90%, рис. 5) определялось температурными условиями, наиболее благоприятными для отложения компонентов, растворенных в газовой среде (см. рис. 3).

Большие массы твердого вещества, скопившиеся в области поясов Венеры и Земли, обеспечили их быстрое гравитационное концентрирование в крупные монопланетные образования. Тем самым Земля и Венера избежали длительной и интенсивной бомбардировки космическими телами, которая характерна для планет, формировавшихся в менее массивных поясах (Меркурий, Марс, Луна).

Дегидратация исходного материала, вызванная его разогревом в теле планеты, играла определяющую роль в первичной дифференциации Земли. Основной разогрев планеты вероятнее всего начинался с ее центральных частей. Он был связан преимущественно с гравитационной энергией, переходящей в тепло за счет агломерации и трения частиц исходного материала и в результате адиабатического сжатия веществ — уплотнения решетки минеральных фаз, сопротивление которому вызывает нагрев вещества. Адиабатический нагрев вещества увеличивается с

ростом давления. Поэтому наибольшие температуры приходились на наиболее сжатые (глубокие) части Земли. Радиоактивное тепло накапливалось медленно и распределялось равномерно по всему исходному объему планеты. Нагрев за счет ударов падающих тел был незначительным из-за большой массы и высокой степени концентрации исходного вещества в земном поясе, обеспечивших быстрое его скопление в единое тело.

На ранней стадии Земля имела «рыхлое» строение и сравнительно низкую плотность гидратированного материала (рис. 6, А), соответствующую углистым хондритам CI (~2,2 г/см³). Поэтому при разогреве Земли находящиеся в ней летучие компоненты имели возможность относительно свободно циркулировать в окружающей их среде. После того, как температура нагрева центральной части планеты достигла ~500—700 С (что могло произойти еще

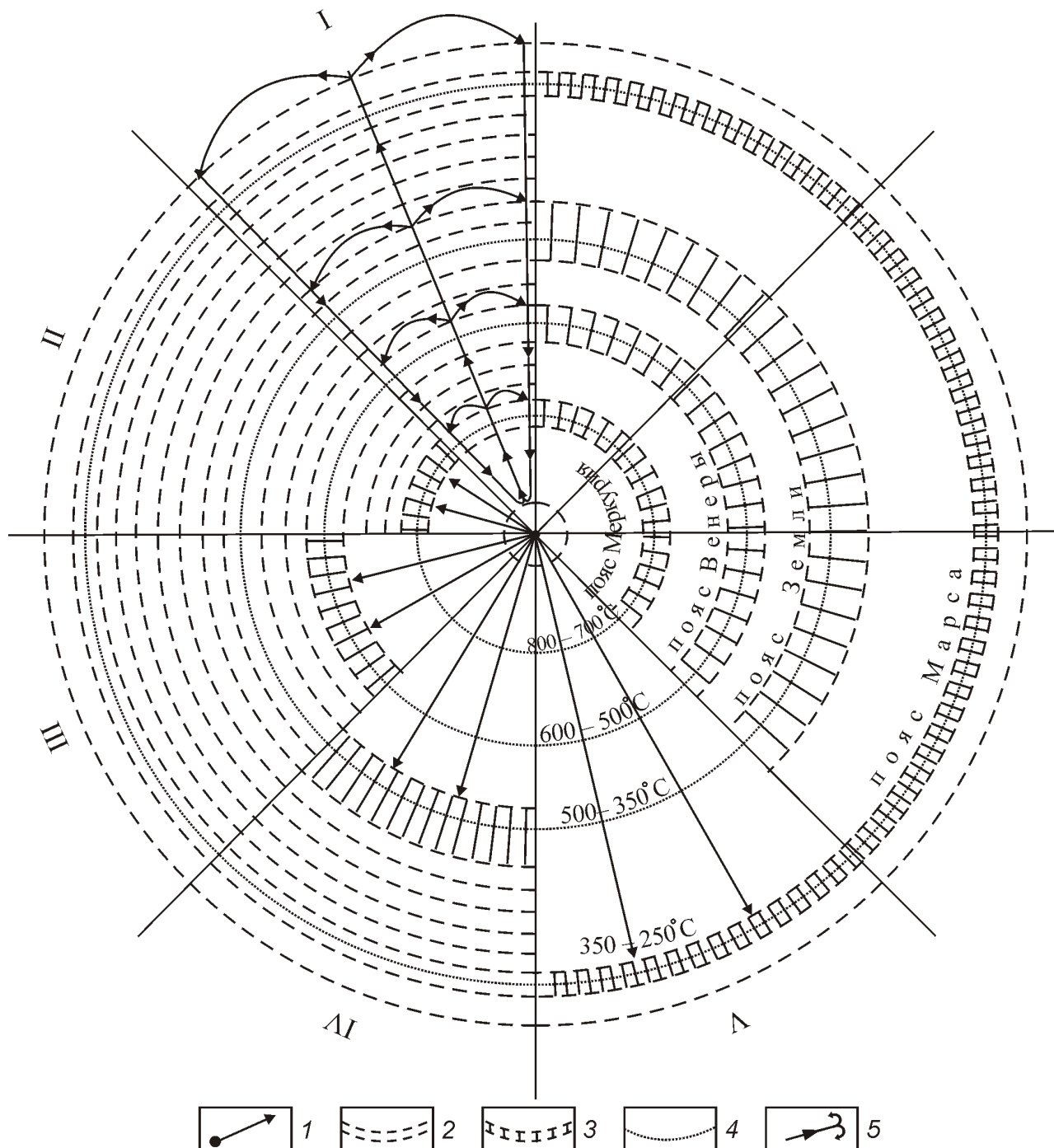


Рис. 3. Схема образования околосолнечных поясов:

1 — Солнце и его световые лучи; 2 — орбиты движения исходных твердых веществ; 3 — зоны отложения и концентрации веществ в ходе их химического транспорта с образованием сначала сфер, затем поясов планет земной группы; 4 — орбиты планет; 5 — конвекционные ячейки газовой фазы, смещающиеся к периферии по мере прогресса окружающей среды и образования поясов; температуры, существовавшие в областях формирования поясов, С; последовательность образования поясов: I — исходное состояние, II — Меркурия, III — Венеры, IV — Земли, V — Марса

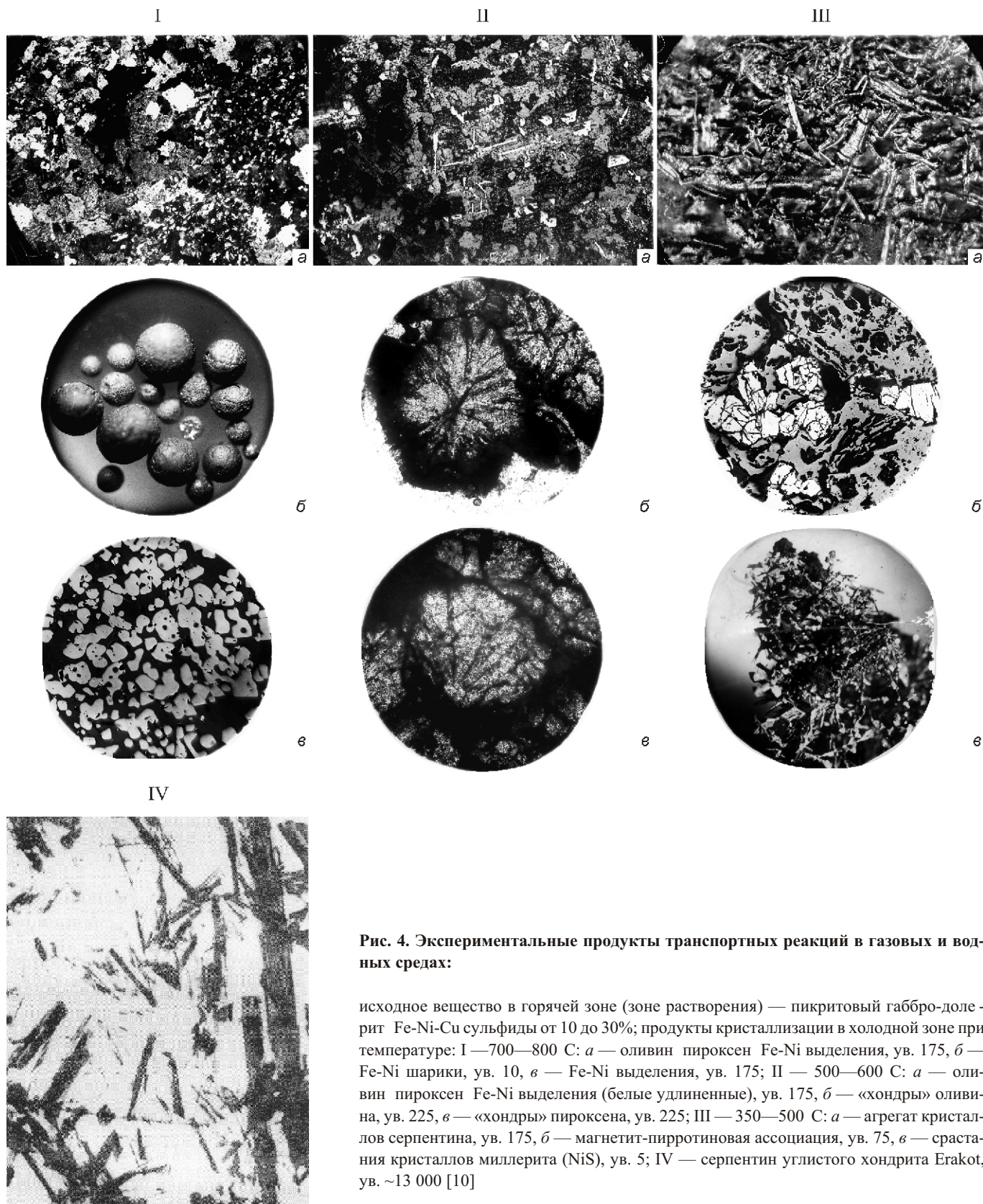


Рис. 4. Экспериментальные продукты транспортных реакций в газовых и водных средах:

исходное вещество в горячей зоне (зоне растворения) — пикритовый габбро-долерит Fe-Ni-Cu сульфиды от 10 до 30%; продукты кристаллизации в холодной зоне при температуре: I — 700—800 C: *a* — оливин пироксен Fe-Ni выделения, ув. 175, *б* — Fe-Ni шарики, ув. 10, *в* — Fe-Ni выделения, ув. 175; II — 500—600 C: *a* — оливин пироксен Fe-Ni выделения (белые удлиненные), ув. 175, *б* — «хондры» оливина, ув. 225, *в* — «хондры» пироксена, ув. 225; III — 350—500 C: *a* — агрегат кристаллов серпентина, ув. 175, *б* — магнетит-пирротиновая ассоциация, ув. 75, *в* — сростания кристаллов миллерита (NiS), ув. 5; IV — серпентин углистого хондрита Erakot, ув. ~13 000 [10]

до завершения роста Земли), начался глобальный процесс дегидратации ее вещества (см. рис. 6, Б). Фронт дегидратации распространялся по направлению от центра к периферии планеты по мере повышения температуры. Освобождаемая при этом вода, взаимодействуя с окружающей средой, превращалась в электролитный раствор. Температурный перепад способствовал движению данного раство-

ра от наиболее нагретых (горячих) к менее нагретым (холодным) частям (зонам) и обратно. При этом неизбежно проявляются химические транспортные реакции, обеспечивающие растворение (в горячей зоне), перенос и отложение (в холодной зоне) растворенных веществ.

Первыми должны были переходить в раствор элементы, наименее связанные в исходном веществе, которые зани-

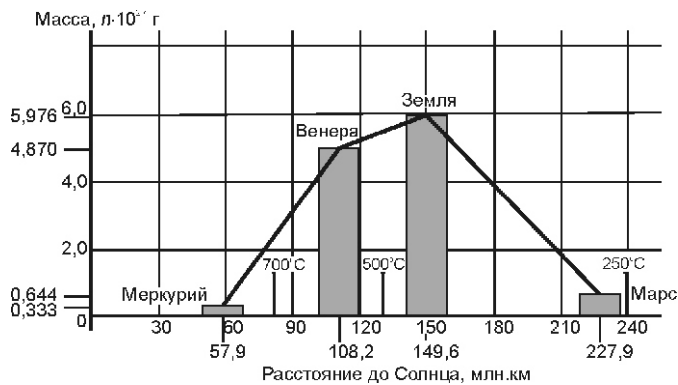


Рис. 5. Распределение масс вещества планет земной группы вокруг Солнца

мают левую часть термодинамического ряда (см. рис. 2), т.е. рудогенные компоненты. Среди них доминирует железо, преобладающее по количеству и имеющее наибольшую энергетическую предпочтительность нахождения в водном растворе (занимает правостоящее положение по отношению к другим рудным элементам).

Флюидный раствор, насыщенный железом (частично и другими левостоящими элементами, в т.ч. никелем), поднимается вверх до уровня замыкания циркуляционных ячеек. Сбрасывая здесь железо в виде магнетита (см. рис. 6, Б), он возвращается в горячую зону, где снова насыщается компонентами растворяемого вещества (преимущественно железом), а затем транспортирует их в холодную зону (зону кристаллизации), многократно повторяясь. В результате скапливаются большие массы железа, в значительной степени изолированные от окружающей среды. В

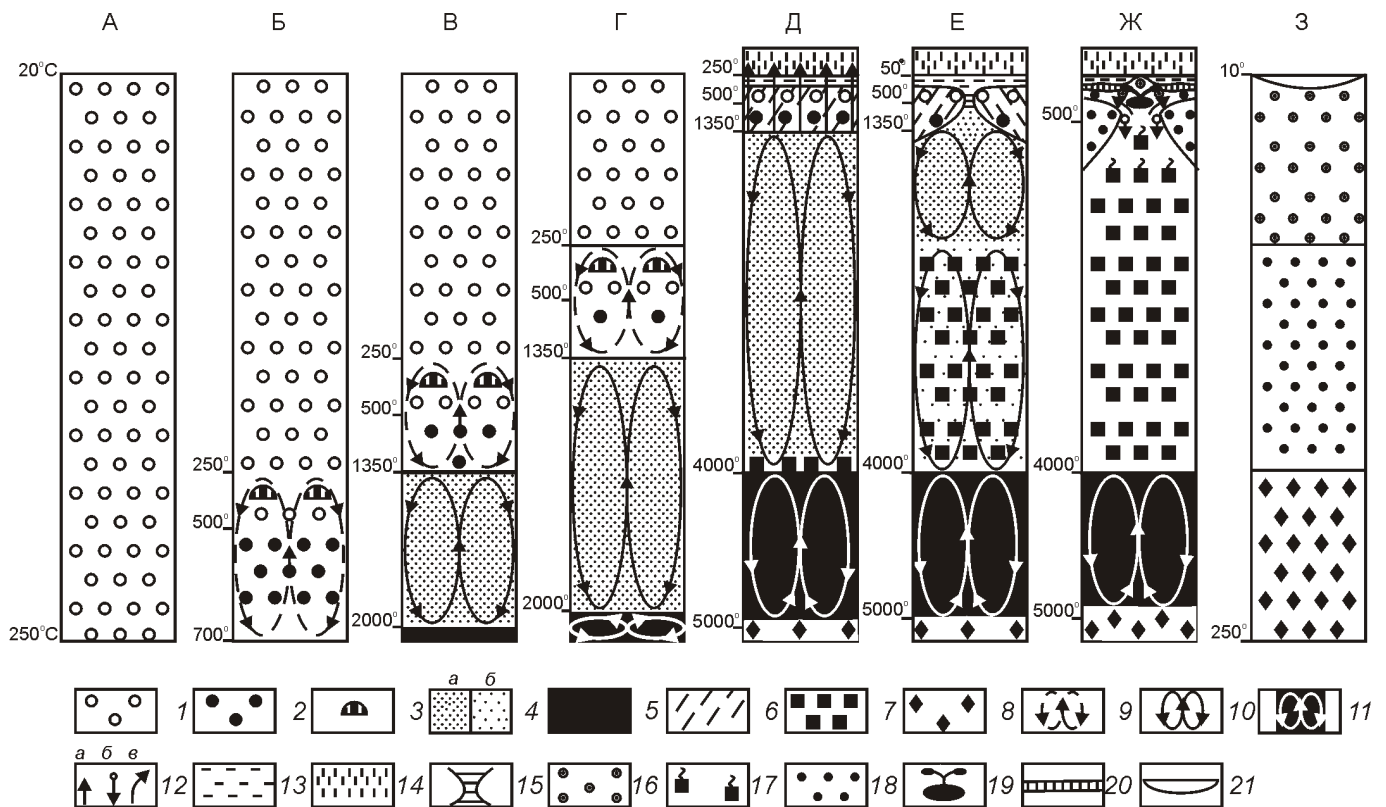


Рис. 6. Последовательность преобразования вещества Земли:

А — принятое исходное состояние; Б — начало дегидратации исходного вещества, появление конвектирующих флюидов и образование скоплений железа; В — появление конвектирующих силикатного и металлического преимущественно железного расплавов; Г — продвижение вверх фронтов дегидратации и плавления с увеличением объема расплавов; Д — выход флюидов на земную поверхность, начало образования первичной коры, гидросферы и атмосферы, начало кристаллизации расплавов мантии и ядра; Е — окончание стадии дегидратации, начало сжатия («скупивания» и «гофрирования») первичной коры за счет уменьшения объема кристаллизующейся мантии, возникновение «расплавного» спрединга океанического дна; Ж — начало стадии завершающей гидратации, приводящей к декомпрессионному плавлению и конвекции материала мантии, раздвижению литосферных плит; З — окончание стадии завершающей гидратации, исчезновение водных бассейнов; 1 — исходное гидратированное вещество Земли; 2 — материал дегидратации исходного вещества; 3 — области флюидной концентрации железа; 4 — силикатный расплав: а — без кристаллических фаз, б — с продуктами кристаллизации; 5 — металлический расплав; 6 — материал первичной коры; 7 — продукты кристаллизации силикатного расплава; 8 — продукты кристаллизации металлического расплава; 9 — конвекция флюидов; 10 — конвекция силикатного расплава; 11 — конвекция металлического расплава; 12 — направления движений: а — флюидов, б — воды, в — твердых масс; 13 — вода земной поверхности; 14 — атмосфера; 15 — участок раздвижения коры; 16 — материал стадии завершающей гидратации вещества Земли; 17 — вещество мантии, подвергнутое декомпрессионному плавлению; 18 — рудитовый материал; 19 — скопленные расплава декомпрессионного плавления мантии; 20 — океаническая кора; 21 — сухие бассейны земной поверхности

последующем это дает возможность железу сформировать самостоятельный расплав и сконцентрироваться в центре планеты (прямое плавление исходного вещества не может обеспечить обособление железа, т.к. оно должно полностью раствориться в силикатном расплаве).

С дальнейшим повышением температуры и началом плавления вещества, нижнее замыкание циркуляционных ячеек флюидов располагалось около верхней границы расплавной зоны, а верхнее находилось несколько выше фронта дегидратации вещества (см. рис. 6, В).

При котектическом составе вещества происходило его последовательное (фракционное) плавление с переходом в расплав сначала легкоплавких, а затем тугоплавких составляющих исходного материала. В результате вначале появлялись расплавы маломagneзиальные относительно кислые, обогащенные щелочными, редкоземельными и радиоактивными элементами, а затем высокомагнезиальные. Значительная часть наиболее кислой фракции проникала в вышележащие, еще нерасплавленные, породы и постоянно находилась на фронте плавления вещества, накапливаясь и перемещаясь с ним вверх. Именно этот «сгон» легкоплавкой фракции существенно обогатил ею верхние слои Земли.

Продвижение фронтов плавления и дегидратации приводило к смещению циркуляционных ячеек флюидов вверх (см. рис. 6, В, Г). При этом в область плавления попадали участки флюидной концентрации железа. Температура их плавления (1500 С для магнетита) превышала температуру плавления основной массы окружающей силикатной среды (1100—1400 С), в связи с чем тяжелые рудные (железные) «глыбы» погружались в силикатный расплав и опускались к центру планеты, переходя в дальнейшем в расплавленное состояние и обогащая центральную часть железом. Вместе с магнетитом опускались и сульфидные соединения железа и других элементов. Погружение железных масс сопровождалось выделением большого количества тепловой энергии (до ~2093,5 Дж/кг) [25], которая вносила значительный вклад в общий разогрев планеты (существенная часть этой энергии тратилась на плавление опускающихся железных тел).

В объеме расплава действовали конвекционные течения, возникшие при самом раннем появлении расплавной жидкости и вызванные температурным градиентом. С обособлением железного ядра обособились и конвекционные течения расплавов, которые стали функционировать самостоятельно в ядре и вышележащей мантии (см. рис. 6, Г, Д, Е).

Продвижение фронтов плавления и дегидратации вещества мантии продолжалось до тех пор пока верхнее замыкание циркуляционных ячеек флюидов не достигло поверхности планеты (см. рис. 6, Д). После этого флюидный поток двигался преимущественно в одном направлении. Расплав стал сбрасывать растворенные в нем летучие компоненты, которые присоединялись к общему флюидному потоку и уносили тепло расплава, снижая его температуру. Большая часть общего флюидного потока и растворенного в нем вещества оставалась на поверхности Земли. Именно в этот период начали формироваться атмосфера и водные бассейны Земли.

Интенсивный отток флюидов остановил продвижение (подъем) фронта плавления исходного вещества, не позволил ему достичь поверхности планеты. Если бы это произошло, то Земля потеряла бы большую часть поверхностной воды вследствие ее диссипации в условиях высоких температур. Допускаемое в ряде работ [22 и др.] полное

плавление вещества Земли при температуре ее поверхности до 2000 С вывело бы воду и другие летучие компоненты за пределы гравитационного воздействия планеты, требуемого для их удержания. Земля осталась бы практически безводной.

Из оставшейся нерасплавленной толщи исходного материала формировалась первичная кора (см. рис. 6, Д). Она подверглась глубоким преобразованиям под воздействием флюидных потоков и проникновений сравнительно кислых расплавов, скопившихся на фронте плавления в результате длительного «сгона» легкоплавкой фракции. Вследствие наложенных преобразований и насыщенности флюидами первичная туфообразная кора имела меньшую плотность, чем нижележащий мантийный расплав. Поэтому она плавала на его поверхности (рис. 6, Е).

Конвекция мантийного расплава перемещала плавающую кору от мест подъема циркуляционных потоков к местам их погружения. Над восходящей ветвью циркуляционных ячеек первичная кора раздвигалась и формировалась ранняя океанская кора (см. рис. 6, Е). В предельном случае (при возможном возникновении единой циркуляционной системы в мантии) вся первичная кора могла собраться на одной стороне поверхности Земли в месте погружения конвективного потока расплава мантии. Это изначально определило асимметричное положение континентов на земной поверхности. Скопившиеся относительно холодные массы коры вызывали на себя приток из мантии большого количества тепловой энергии, что приводило в дальнейшем к неоднократной смене направления конвективного потока мантийного материала и к раздвижению блоков коры. Подобные процессы, но связываемые с экранирующим действием субконтинентальной мантии, рассматриваются в работах В.П. Трубицына, В.В. Рыкова [12] и др.

При конвекции расплавов в ядре и мантии сравнительно холодное вещество верхних частей циркуляционных ячеек опускалось в области более высоких температур и давлений, подвергая их охлаждению. Со временем снижение температуры и действие давления, повышающее температуру солидуса веществ, привели к кристаллизации расплавов ядра и мантии в их нижних частях (см. рис. 6, Д, Е). Возможно, кристаллизация расплава нижних частей мантии началась до того, как фронт плавления достиг своего верхнего предельного уровня. Поэтому фронт кристаллизации расплава мантии мог двигаться за фронтом плавления исходного материала. В результате Земля, претерпев почти полное плавление, могла никогда не находиться в состоянии полностью расплавленного тела.

С формированием первичной океанской коры начался процесс охлаждения планеты (см. рис. 6, Е), который со временем привел к полной кристаллизации расплава мантии и началу завершающей гидратации мантийного вещества (см. рис. 6, Ж).

Таким образом, на стадии дегидратации произошла основная дифференциация исходного вещества Земли, приведшая к образованию ядра, мантии, первичной коры, гидросферы и ранней атмосферы.

Завершающая гидратация. Завершающая гидратация связана с общим охлаждением земного вещества, вызвавшим смещение изотермы 500 С и продвижение воды от поверхности в глубь Земли (см. рисунки 6, Ж; 7, А, Б). С этого времени Земля перешла в состояние остывающего тела и стала эволюционировать по термической нисходящей линии, т.е. в обратном направлении, стремясь прийти

к равновесию в изменяющихся условиях. Эволюция Земли на данной стадии в основном определяется кристаллизацией остывающего расплава ядра и гидратацией закристаллизованного материала мантии.

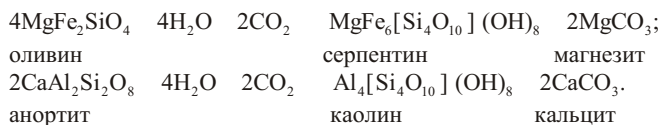
Кристаллизация ядра поддерживает его внешнюю часть в жидком состоянии и вместе с ней обогревает вышележащие слои Земли, обеспечивая поступление тепла к земной поверхности.

Массовая гидратация началась с пород коры и продолжилась в остывающих до 500 С горизонтах верхней мантии — местах проникновения в них поверхностной воды (см. рисунки 6, Ж; 7, А, Б). Она сопровождается увеличением объема (до 28%) твердых масс, подвергающихся гидратации, и значительным выделением тепловой энергии (H серпентина $9736,9 \cdot 10^3$ Дж/моль).

Вода следует за изотермой 500 С вне зависимости от глубины ее опускания. Это обусловлено тем, что между фронтом и тылом области гидратации существует температурный градиент, который обеспечивает движение воды к фронту гидратации практически независимо от физического состояния гидратированной массы.

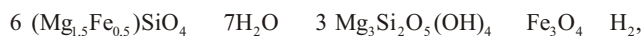
С началом процесса массовой гидратации пород коры стал изменяться состав первичной атмосферы Земли, на-

сыщенной CO_2 , подобно атмосфере Венеры. Реакции гидратации минералов связали большую часть CO_2 в твердые карбонатные соединения:



Атмосфера обогатилась кислородом океанов, в которых со временем зародилась жизнь. В результате (при наличии воды и процессов гидратации) Земля избежала участи Венеры, которая осталась безжизненной, плотно окутанной удушливой атмосферой CO_2 .

Проникновение воды в мантию приводит к гидратации преимущественно оливина, протекающей, вероятно всего, по следующей реакции:



которая сравнительно легко воспроизводится в экспериментах [7] и реально наблюдается в природе, например, в поле Рейнбоу Срединно-Атлантического хребта [2]. Гидратация оливина сопровождается освобождением содер-

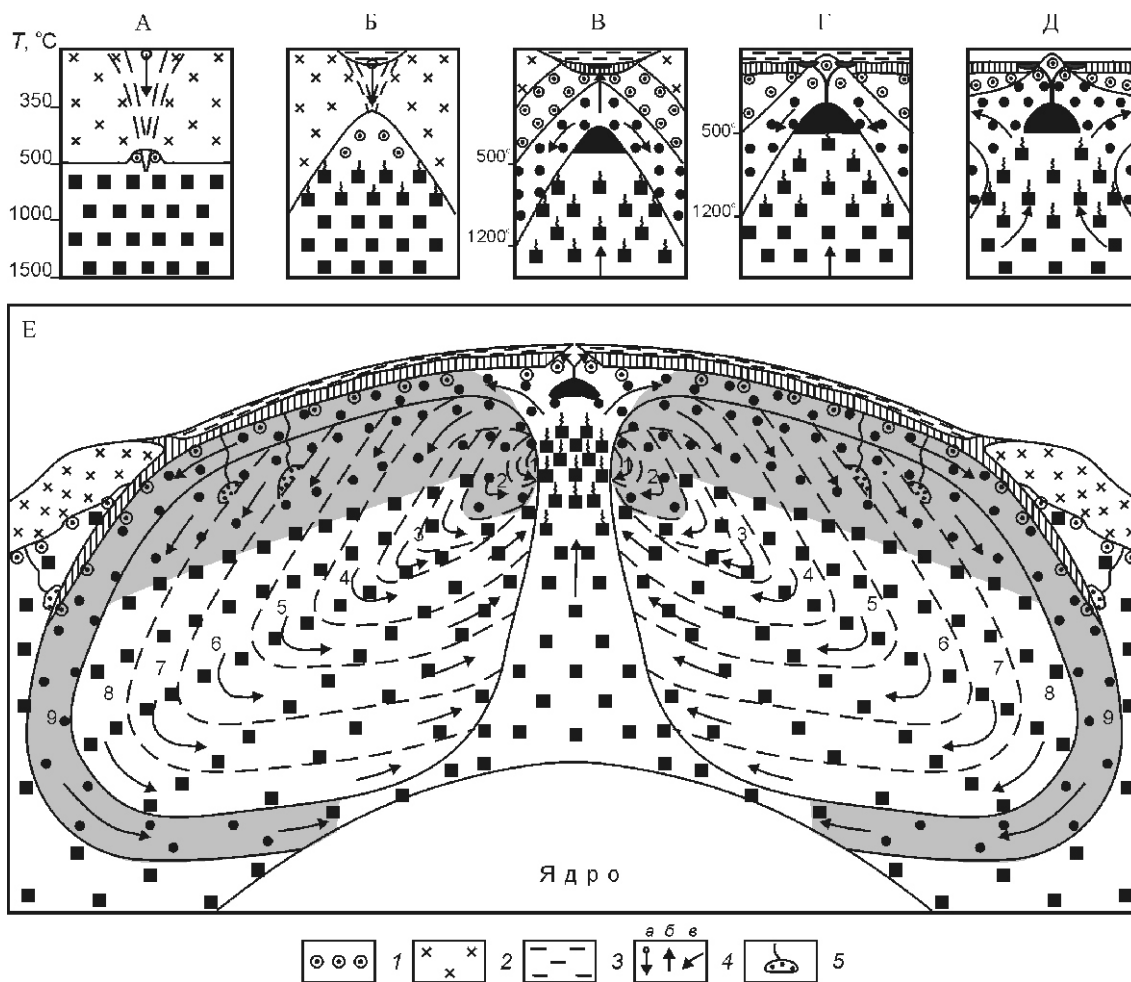


Рис. 7. События стадии завершающей гидратации земного вещества:

А—Д — последовательность подъема мантийного материала вследствие его гидратации, Е — общая схема гидратации и конвекции вещества мантии; 1 — гидратированное вещество мантии; 2 — материки; 3 — вода океана; 4 — направления движения: а — воды, б — материала мантии, в — литосферных плит — «слэбов» (slabs); цифры около линий — последовательность опускания слэбов; 5 — области флюидно-термического плавления; остальные услов. обозн. см. на рис. 6

жащихся в нем никеля и кобальта и вызывает подъем и декомпрессионное плавление мантийных масс, приводящих к расколу и раздвижению вышележащих толщ (см. рисунки 6, Ж; 7, Б—Г).

С развитием процесса гидратации и увеличением притока мантийных масс поднимающийся материал начинает распространяться в горизонтальном направлении (см. рисунки 6, Ж; 7, Д). Затем он в охлажденном виде опускается в мантию под своей тяжестью, напором воздымающихся масс и вследствие затягивания веществом мантии,двигающимся к области его гидратации и подъема (см. рис. 7, Е). Вещество мантии движется не во всем ее объеме, а локально, в виде отдельных слоев, подобных современным «слэбам». В конвекционном потоке они последовательно удаляются от центра гидратации и декомпрессии мантийного материала (см. рис. 7, Е).

Одновременная конвекция всего вещества мантии невозможна из-за недостаточности энергетических ресурсов Земли, находящейся в состоянии непрерывно остывающего тела. Теплоемкость твердого мантийного материала (C_p оливина $\sim 117,2$ Дж/моль К) и его масса ($\sim 70\%$ общей массы Земли) превышают таковые расплава ядра (C_p Fe $\sim 25,1$ Дж/моль К). Поэтому, в случае проявления общей конвекции твердого вещества мантии, Земля должна была охладиться полностью в более ранний период своего существования.

С распространением поднимающихся масс в горизонтальном направлении охлажденный (обратный) поток вещества последовательно смещает место погружения в мантию (см. рис. 7, Е), что обеспечивает перемещение континентов. Без смены места погружения обратной ветви конвекционной ячейки (океанической плиты) дрейф континентов практически не происходит.

Субдукция литосферных плит в одном и том же месте может приводить в основном к наращиванию континента и в итоге закрытию океана. Такая ситуация наступает при максимальной длине конвекционной ячейки (см. рис. 7, Е, поток 9). Достижение литосферной плитой границы ядро—мантия может служить одной из причин остановки спрединга океанического дна. Массовая гидратация вещества мантии под океанами сопровождается выделением большого количества тепла, которое компенсирует недостаток радиоактивного тепла по отношению к континентам.

Геологические события, зафиксированные в континентах. Значительная часть геологических событий Земли зафиксирована в составе и строении континентов. Как известно, основная масса континентов ($\sim 75\%$) сложена сравнительно кислыми породами гранитоидного ряда. Большая часть этих пород ($\sim 80\%$) сформирована в ранний период (до ~ 2500 млн.лет) эволюции Земли [11 и др.].

Массовое и повсеместное (на всех континентах) распространение однотипных по составу и возрасту гранитоидов указывает на то, что их образование связано с глобальными, синхронно протекающими, процессами, приводящими к концентрации в верхних частях планеты кремния, щелочей и других легкоплавких и летучих компонентов. Прямым плавлением вещества мантии (перидотита) такие концентрации не достигаются [9]. Они могут быть получены в результате последовательной, неоднократно повторяющейся дифференциации легкоплавкой составляющей мантийного вещества. В глобальном масштабе это могло происходить при рассмотренном выше гидротермальном и расплавленном «сгоне» к земной поверхности наи-

более подвижных компонентов и легкоплавкой фракции исходного вещества планеты в ходе его общего разогрева (см. рис. 6, Б—Д). В результате первичная кислая кора в дальнейшем составила основу континентов.

Превращение первичной коры в континенты происходило путем ее «скупивания» и «гофрирования» при уменьшении объема Земли вследствие кристаллизации расплавленной мантии и в процессе последующих воздействий на нее мантийного вещества. Воздействие вещества мантии на земную кору проявляется в поступлении из мантии в кору магматических расплавов и сопровождающих их флюидных потоков.

Магматические расплавы, внедряющиеся в земную кору, могут поступать непосредственно из первично расплавленной мантии или сначала зародиться в твердой мантии, а потом внедряться в земную кору. Первый вариант мог проявляться на ранних этапах формирования земной коры, когда мантия находилась в расплавленном состоянии; второй характерен для последующих периодов ее развития. В обоих случаях внедрение магм в земную кору происходит в ответ на поступление веществ в мантию, среди которых важную роль играет вода. Зарождение магм осуществляется путем «термического», «флюидного» и «декомпрессионного» плавления веществ с возможным совмещением одного варианта с другим.

Термическое и флюидное плавление и магмообразование реализуется при погружении холодных масс океанических плит в относительно горячую мантию. На начальной стадии и при неглубоком погружении плит магмы образуются в основном за счет плавления опускающегося материала вследствие его нагрева и благодаря присутствию воды, понижающей температуру перехода вещества в расплав (флюидно-термическое плавление). При этом выплавляется наиболее легкоплавкая составляющая плит с образованием магм преимущественно среднего и основного составов, свойственных зонам субдукции — островодужному магматизму.

В дальнейшем магмы формируются в результате плавления материала мантии. В плите, продолжающей погружаться, остается преимущественно ультрамафическая часть, более тугоплавкая, чем вещество мантии. Опускаясь на большие глубины, она привносит туда воду и другие летучие компоненты, которые сохраняются в погружающемся материале из-за сравнительно медленного его прогрева и образования новых водных фаз, устойчивых до глубин 1500 км и более [24]. Флюиды, привнесенные в недеплетированную мантию, вызывают ее плавление (флюидное плавление) в результате снижения температуры солидуса с образованием мафит-ультрамафических магм, характерных для горячих точек.

В случае погружения плит до границы ядро—мантия (рис. 7, Е, поток 9), зарождающиеся здесь высокотемпературные расплавы при подъеме и тепловом воздействии на окружающую среду производят термическое плавление вещества в вышележащих горизонтах мантии. При этом проявляется наиболее объемный магматизм, присущий термическим плюмам [7].

К продуктам термического и флюидного магматизма (горячих точек и термических плюмов) относятся известные на континентах магматические образования мафит-ультрамафитового ряда. Среди них преимущественно эффузивные толщи зеленокаменных поясов, интрузивные (Бушвельд, Стиллиуотер, Дулут и др.) и эффузивно-интрузив-

живные комплексы (например, Печенгско-Варзугская структура на Кольском полуострове, траппы Сибири и др.). Причем, магматизм зеленокаменных поясов и интрузивных комплексов вероятнее всего связан с действием горячих точек, а крупных эффузивно-интрузивных трапповых полей — с термическими плюмами [7]. В районах проявления магматизма горячих точек и термических плюмов обычно формируются наложенные компенсационные прогибы нередко с опущенной границей Мохо, которым не свойственны рифтовые структуры, характеризующиеся выпуклым профилем границы М.

Декомпрессионное плавление и маглообразование происходит в результате прямого поступления в мантию воды, вызывающей гидратацию, диапировый подъем и разуплотнение мантийных масс, подвергающихся (в процессе декомпрессии) частичному плавлению. Диапировый подъем мантийных масс приводит к образованию рифтовых структур и свойственных им магматических комплексов — офиолитовых в пределах океанской коры и щелочно-ультраосновных на континентах. Для этих структур характерна выпуклая граница Мохо. В зонах палеоспрединга океанического дна она может быть опущенной вследствие гидратации вещества мантии на стадии отмирания (прекращения) процесса спрединга.

Во всех перечисленных случаях магмы зарождаются путем парциального плавления веществ в мантии, а проявленные в пределах земной коры разности магматических образований мафит-ультрамафитового ряда и связанные с ними рудные формации представляют собой фракции исходного материала, соответствующие определенной степени его плавления [3, 6, 20]. Существование зависимости состава и рудоносности магм от степени плавления исходного вещества мантии недавно было подтверждено выводами других исследователей [14].

Состав и рудоносность зарождающихся магм во многом определяются наличием воды. Присутствие воды в веществе, подвергающемся плавлению, в количестве 0,1% обеспечивает снижение температуры солидуса его силикатной составляющей до более низкого уровня, чем солидус содержащейся в нем сульфидной фракции (рис. 8). Этот эффект имеет принципиально важное значение. В отсутствии воды и при ее крайне низком содержании сульфидная составляющая исходного вещества начинает плавиться раньше силикатной и уносится вместе с последней в рассеянном виде, не образуя существенных рудных концентраций. При наличии же воды сульфидная фракция переходит в расплав после плавления и выноса в пределы земной коры мафической части исходного материала, что приводит к концентрации сульфидов в остающемся веществе мантии и зарождению при последующем его плавлении сульфидоносных магм, формирующих платино-медно-никелевые месторождения. Общая схема последовательности зарождения магм при наличии в исходном веществе воды выглядит следующим образом (см. рис. 8).

В наиболее низкотемпературной области (участок I), зарождаются бессульфидные и слабосульфидоносные мафические разности магм (MgO 8%), являющиеся наиболее ранними продуктами плавления вещества мантии, предваряющими зарождение и поступление в земную кору более магнезиальных и высокотемпературных сульфидоносных и бессульфидных магм. На участке II вслед за мафическими образуются сульфидоносные мезомафические магмы (MgO 8—33%), которые формируют платино-медно-нике-

левые и платиновые месторождения, изменяющиеся по составу в зависимости от степени плавления мезомафической части исходного вещества от менее магнезиальных и медистых до более магнезиальных, богатых никелем (см. рис. 8, IIa; IIб; IIв).

В пределах участка III зарождаются наиболее магнезиальные и высокотемпературные продукты (MgO 33%), формирующие слабосульфидоносные и бессульфидные ультрамафические образования, несущие наиболее тугоплавкие металлы платиновой группы — Pt, Ir, Ru, Os [20]. При плавлении недеплегированного мантийного вещества (в случаях проявления флюидного и термического магматизма) обычно содержится достаточное количество воды, чтобы сместить линию солидуса силикатного вещества в более низкотемпературную область, чем солидус сульфидной фракции. Поэтому эти два вида магматизма способны приводить к образованию платино-медно-никелевых месторождений. В случае же диапирового магматизма зарождение сульфидоносных магм обычно не происходит вследствие того, что плавление вещества осуществляется на сравнительно небольших глубинах, где эффект воды снижается и линия солидуса сульфидов располагается ниже солидуса силикатов (см. рис. 8).

Тенденция последующей эволюции Земли и дальнейших геологических событий вероятнее всего будет сводиться к тому, что по мере охлаждения планеты и смещения изотермы 500 С вниз гидратации подвергнутся все бо-

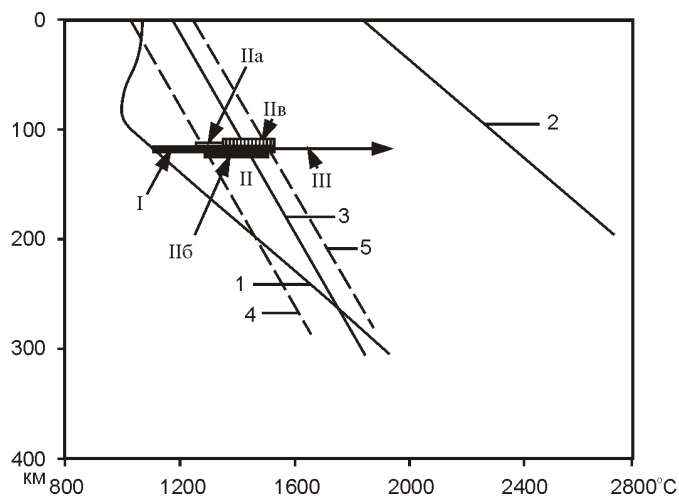


Рис. 8. Схемы формирования мафит-ультрамафитовых магм [18]:

типы и условия образования магм, линии: 1, 2 — солидуса и ликвидуса пиролита, содержащего 0,1% воды [26], 3 — солидуса пирротина [1, 23], 4, 5 — предполагаемые солидус и ликвидус сульфидов мантии; участки зарождения: I — сравнительно низкотемпературных бессульфидных магм мафического состава (MgO 8%); II — сульфидоносных магм: IIa — относительно низкотемпературных (MgO 8—10%), несущих богатые медью (по отношению к никелю) сульфиды ($Ni:Cu$ 1:3—4), IIб — среднетемпературных (Mg 10—15%), включающих всю сульфидную фракцию исходного вещества ($Ni:Cu$ 1:1,2—2,5), IIв — высокотемпературных (MgO 15—33%), содержащих бедные медью сульфиды ($Ni:Cu$ 1— 10:1); III — участок образования бессульфидных высокотемпературных магм ультрамафического состава (MgO 33%)

лее глубокие горизонты мантии. Этот процесс будет продолжаться до тех пор пока не исчерпается вода океанов (рис. 6, 3). Такой финал неизбежен по той причине, что реакция гидратации остывающего тела необратима, и протекает до практически полного исчерпания водной фазы. Подобное, вероятно, произошло на Марсе.

Из приведенных материалов статьи можно сделать следующие выводы:

1. Вода уникальна по свойствам и выполняемым функциям. Она обеспечивает формирование, длительную эволюцию и глубокую дифференциацию планет земного типа, создает необходимые условия для зарождения, существования и развития жизни.

2. Водные планеты, благоприятные для развития на них органической жизни и цивилизации людей, образуются в определенном температурном интервале (500—350 °C) и в соответствующем ему месте околозвездного пространства, где происходит массовая гидратация минеральных фаз, обеспечивающая накопление и сохранение воды в исходном веществе планеты.

3. Вода, сохранившаяся в исходном материале, определяет в дальнейшем специфику формирования и эволюции планеты. На стадии гравитационного разогрева планеты происходит дегидратация исходного материала, способствующая его дифференциации с образованием ядра, мантии, первичной коры, гидросферы и ранней атмосферы. Сменяющая ее стадия охлаждения сопровождается новой (завершающей) массовой гидратацией вещества, которая в итоге должна привести к «литификации» воды и исчезновению водных бассейнов.

4. Наблюдаемые (зафиксированные в земной коре) геологические процессы происходят в основном на стадии охлаждения планеты и преимущественно в процессе гидратации вещества мантии, вызывающей его подъем и плавление в срединно-океанических хребтах и дальнейшее погружение в мантию в зонах субдукции океанических плит.

5. Движение мантийного вещества, вызванное его гидратацией, приводит к проявлению четырех видов магматизма — декомпрессионного, флюидного, термического и флюидно-термического. Декомпрессионный обуславливается плавлением вещества мантии в результате его декомпрессии в зонах спрединга океанического дна и рифтовых структур континентов. Флюидный связан с плавлением мантийного вещества под воздействием воды и других летучих компонентов, привносимых в мантию погружающейся океанической плитой (магматизм горячих точек). Термический продуцируется плавлением вещества мантии за счет подъема горячих плюмов от внешнего ядра в результате проникновения к нему тугоплавкого реститового материала океанической плиты (магматизм термических плюмов). Флюидно-термический проявляется в зонах субдукции при плавлении погружающейся в мантию океанической плиты (островодужный магматизм). Декомпрессионному магматизму свойственно образование платиноносных и хромсодержащих ультрамафитовых тел офиолитовой формации, а также колчеданных руд, ассоциирующих с мафитовой частью магматизма и формирующихся за счет гидротермальной экстракции и концентрации рудных компонентов. В проявлениях двух других видов магматизма образуются месторождения платино-медно-никелевых, платиновых, хромовых и железных руд. Для четвертого типа магматизма характерны рудные формации островных

дуг (медно-порфиновые, золотомедные, золотосеребряные и др.).

6. Дифференциация веществ и формирование месторождений связаны с парциальным плавлением, растворением и соответствующим фракционным отложением (кристаллизацией) материала мантии и коры, которые определяются проявлением индивидуальных энергетических свойств химических элементов, выраженных в их термодинамическом ряду и других химических и физических факторах.

7. Актуальны следующие виды работ, результаты которых позволят получить новые данные, касающиеся эволюции Земли, и использовать их в практических целях:

всестороннее исследование и общая количественная оценка проявлений процессов гидратации и дегидратации земного вещества и связанных с ними геологических событий в прошлом и настоящем;

изучение изотопного состава водорода и кислорода воды серпентина и других водных фаз ультрамафитовых пород различных возрастов. В ходе завершающей гидратации в остающейся воде, как и в породах, образующихся с ее участием, должен накапливаться тяжелый изотоп ^{18}O , имеющий менее прочные связи в твердых соединениях (являющийся энергетически менее предпочтительным), чем легкий изотоп ^{16}O . Эта закономерность подтверждается существующими данными. Так, установлено, что при серпентинизации оливина ультрамафитовых пород Полярного Урала накапливается легкий изотоп ^{16}O в твердых продуктах реакции — в серпентине [15], а циркон проявленных на Земле магматических образований мафит-ультрамафитового ряда имеет тенденцию обогащаться тяжелым изотопом ^{18}O от архея к протерозою и фанерозою: ^{18}O изменяется от 5 до 8‰ [16]. Подобным образом увеличивается содержание ^{18}O от древних к более молодым разностям в карбонатных породах Русской платформы [13], а также других районов мира с изменением ^{18}O от 21‰ в карбонатах и 23,5‰ в кремнях кембрия до 27 и 32‰, соответственно, мела [17];

определение времени, требуемого для последующей полной «литификации» воды и величины выделяемого при этом тепла, от которых зависит длительность существования жизни на Земле;

использование в хозяйственных целях тепловой энергии природной и искусственной гидратации минералов пород коры и мантии с получением цветных и благородных металлов методом авторазогрева [7];

поиск внеземных цивилизаций целесообразно вести около звезд солнечного типа на «земных» расстояниях от них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кеннеди Дж.Р., Рыженко Б.Н. Влияние давления на эвтектики в системах Fe-FeS // Геохимия. 1973. № 9. С. 1392—1396.
2. Леин А.Ю., Сагалевиц А.М. Курильщики поля Рейнбоу — район масштабного абиогенного синтеза метана // Природа. 2000. № 8. С. 44—53.
3. Лихачев А.П. О природе магматических месторождений // Советская геология. 1973. № 5. С. 33—47.
4. Лихачев А.П. Переотложение рудогенных и петрогенных компонентов водными растворами // Геохимия. 1975. № 10. С. 1459—1474.
5. Лихачев А.П. О поведении химических элементов в магматических и гидротермальных процессах // Зап. Всесоюз. минер. о-ва. 1975. Вып. 6. С. 649—663.

6. Лихачев А.П. Генетические модели сульфидно-никеленосных формаций в связи с другими эндогенными формациями / Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. — Новосибирск: Наука, 1988. С. 158—166.
7. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения: механизмы накопления, новые источники и методы получения рудных веществ // Руды и металлы. 2002. № 5. С. 9—23.
8. Лихачев А.П. Вода как определяющий фактор формирования и эволюции Земли // Руды и металлы. 2003. № 5—6. С. 76—77.
9. Майсен Б., Беттчер А. Плавление водосодержащей мантии. — М.: Мир, 1979.
10. Мэйсон Б. Метеориты. — М.: Мир, 1965.
11. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. — М.: Мир, 1988.
12. Трубицын В.П., Рыков В.В. Мантийная конвекция с плавающими континентами / Проблемы глобальной тектоники. — М.: ГЕОС, 2000. С. 7—28.
13. Щербина В.В. Основы геохимии. — М.: Недра, 1972.
14. Arndt N., Leshner M., Czamanske G. PGE contents of mafic-ultramafic magmas and the formation of Cu-Ni-PGE sulfide deposits // Abstracts 32nd International Geol. Congress. Florence, Italy. 2004. Part 1. P. 473.
15. Bryanchaninova N., Makeyev A.B. D/H ration in serpentinites of the Polar Ural // Abstracts 32nd International Geol. Congress. Florence, Italy. 2004. Part 2. P. 1108.
16. Crustal evolution and maturation in the Precambrian oxygen isotope evidence / J.Valley, J.Lackey, M.Basei et al. Abstracts 32nd International Geol. Congress. Florence, Italy. 2004. Part 2. P. 1084.
17. Degens E.T., Epstein S. Relationship between ¹⁸O/¹⁶O ratios in coexisting carbonates, cherts and diatomites // Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists. 1962. Vol. 46. P. 534—542.
18. Godlevsky M.N., Likhachev A.P. Types and distinctive features of ore-bearing formations of copper-nickel deposits // In Geology and Metallogeny of Copper Deposits, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1986. P. 124—134.
19. Likhachev A.P. Redeposition of ore-producing and petrogenetic components by aqueous solutions // Geochemistry Internat. 1976. Vol. 12. P. 101—113.
20. Likhachev A.P. The discovery of a new Maimecha-Kotuyskaya platinum bearing province in the north of the Siberian platform: prognosis and its practical corroboration // 8th International Platinum Symposium. Abstract. Rustenburg. 1998. P. 203—205.
21. Likhachev A.P. The crucial role of water in the formation and evolution the Earth // Abstracts 32nd International Geol. Congress. Florence, Italy. 2004. Part 2. P. 1087.
22. Ringwood A.E. Some aspects of the thermal evolution of the earth // Geochim. Cosmochim. Acta. 1960. Vol. 20. P. 241—259.
23. Sharp W.E. Melting curves of sphalerite, galena, and pyrrhotite and decomposition curve of pyrite between 30—65 kilobars // J. Geophys. Res. 1969. Vol. 74. № 6. P. 1645—1652.
24. Stability of hydrous phases in the lower mantle / E.Ohtani, A.Yokoyama, N.Hirao et al. — Abstracts 32nd International Geol. Congress. Florence, Italy. 2004. Part 1. P. 714—715.
25. Tozer D.C. Thermal history of the Earth. I. The formation of the core // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1965. Vol. 9. P. 95—112.
26. Wyllie P.J. Experimental limits for melting in the Earth's crust and upper mantle // Geophys. Monog. Ser. 1971. 14. P. 279—301.

УДК 553.98.061.3

А.Г.Репин, 2006

Флюидосети

А.Г.РЕПИН (ООО «ВНИИГаз»)

В данной статье не затронуты проблемы происхождения, преобразования углеводородов, а лишь обращено внимание на некоторые вопросы перераспределения флюидов в верхних частях осадочного чехла бассейнов.

В работе, вышедшей относительно недавно [2], мы показали возможность горизонтальной фильтрации флюидов вдоль пликвативно-дизъюнктивных образований — дизъюнктивов. Результаты, полученные по Западной Сибири,

оказались несколько необычными, поэтому была сделана попытка провести линеаментный анализ хорошо изученных территорий на основе материалов, доступных для широкого круга исследователей. В качестве таких территорий выбраны два известных нефтегазовых штата США — Оклахома и Техас.

Материалы дешифрирования территорий Техаса (см. рисунок), Оклахомы также показывают приуроченность многих месторождений к линейным тектоно-геологическим объектам, выраженным на поверхности земли в виде протяженных линейных образований, интерпретируемых как линеаменты. Они формируют при картировании своеобразные пространственные системы. К сожалению, дешифрировались единичные снимки, что не позволяет создать полную картину линейных объектов (на подобные эффекты автор указывал в работе [1]).

Соответственно, в качестве гипотезы, выдвигается предположение о существовании региональных систем «каналов» горизонтальной и вертикальной фильтрации флюидов в толще пород, и, соответственно, упорядоченности самой фильтрации, приводящей к закономерному пространственному распределению скоплений углеводородов в земной коре.

Карта-схема линеаментов, наложенная на карту продуктивных скважин штата Техас (США):

скважины: 1 — газовые, 2 — нефтяные, 3 — пустые

