

ГРАНИТООБРАЗОВАНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ПРИМЕРЕ КААХЕМСКОГО МАГМАТИЧЕСКОГО АРЕАЛА (ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

А.М. Сугоракова

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия



Последовательно обосновывается связь литогенеза и гранитогенеза. Показана роль атмосферы и гидросферы в максимальной эффективности экзогенных процессов, приведших к дифференциации базальтовой коры и формированию осадочной коры. Объяснено происхождение воды и кислорода на Земле. Показана роль эвтектики в формировании гранитного расплава всегда одинакового состава и, как следствие, формирование межгранулярного эвтектоидного гранитного расплава, способствующего непрерывному процессу гранитообразования при соответствующих термодинамических и геодинамических условиях.

Ключевые слова: литогенез, гранитизация, расплав, флюиды, термодинамические условия, эвтектика.

При взгляде на геологическую карту Тувы бросается в глаза, что вся восточная часть карты окрашена в красные цвета разных оттенков – цвета гранитоидов. Там выделяются Каахемский, Бийхемский, Хамсаринский, Восточно-Таннуольский гранитоидные батолиты общей площадью более 60 тыс. км².

Наиболее крупный из них, Каахемский, площадью более 30 тыс. км², представляет собой совокупность разнообразных магматических образований, сформированных за длительный период времени с венда по пермь (570–290 млн лет) в бассейне р. Малый Енисей (Каа-Хем).

При исследованиях центральных и восточных частей Каахемского полиформационного батолита [Сугоракова, 2015; Сугоракова, Хертек, 2017] получены принципиально новые результаты, которые позволили выделить Каахемский магматический ареал, включающий:

- собственно Каахемский аккреционно-коллизийный гранитоидный батолит с синплутоническими габброидами и синхронными игнимбритами;
- обрамляющие батолит более древние гранитоиды офиолитовых и островодужных ассоциаций;
- сквозь структурную зону более позднего бимодального щелочного магматизма.

Так откуда взялись такие огромные массы гранитов и почему они формировались в одних и тех же местах в течение длительного времени – с венда по пермь и что вызвало такое масштабное по объему и длительности гранитообразование? Прежде чем ответить на эти вопросы, необходимо рассмотреть проблемы гранитогенеза на Земле. Таких значительных масс континентальной коры нет на других планетах.

На современном уровне выделяют четыре группы гранитов. Первые три составляют продукты преобразования и плавления земной коры [Chappell, White, 1974]:

– S-граниты, сформированные за счет первично-осадочных пород (в основном метаморфизованных глинистых осадков);

– I-граниты, образованные за счет метаморфизованных магматических пород (в основном метабазальтов);

– A-граниты, образованные также из корового материала, но со значительным участием мантийного вещества.

Породы четвертой группы (M-граниты) не являются коровыми – это дифференциаты мантийных магм – андезитовой и базальтовой. Они составляют весьма незначительную часть гранитных пород. Мы с трудом находим плагиограниты-дифференциаты среди пород базит-ультрабазитовых массивов для геохронологических исследований.

Прежде чем излагать далее, приведем главные понятия и определения процессов гранитообразования.

Гранитообразование (гранитогенез) – это геологическое явление, определяющее формирование гранитного слоя литосферы и выражающееся в образовании гранитоидов, состав и распространенность которых определяются совокупностью геологических, геохимических и физико-химических факторов, позволяющих подразделить гранитообразование в целом на симатического и сиалического рядов литогенеза [Рудник, 1969, 1973, 1975].

1. Гранитообразование симатического (базальтоидного) ряда литогенеза определяется развитием следующих процессов: а) фракционной дифференциации первичной базальтоидной магмы, являющейся прямой выплавкой из вещества верхней мантии [Taylor, White, 1965; Шейнманн, 1970]; б) ассимиляции базальтовой магмой на глубине древних горных пород гранитоидного состава [Vogt, 1935]; в) фракционного плавления вещества верхней ман-

тии в присутствии воды [Hamilton, 1964; O'Hara, 1965]; г) фракционного плавления эклогитов, погружившихся в мантию, в результате которого возникают андезитовые и более кислые расплавы известково-щелочного ряда [Грин, Рингвуд, 1968]. В данной статье такие гранитоиды не рассматриваются.

2. Гранитообразование сиалического ряда литогенеза (коровое) определяется развитием процессов метаморфизма, метасоматизма и ультраметаморфизма в пределах гранитного слоя земной коры. Оно приводит к формированию главной массы гранитоидов литосферы, в том числе и гранитоидов батолитовых форм.

Гранитизация представляет собой частный случай проявления процесса гранитообразования в условиях изменения вещественного состава перерабатываемых горных пород в направлении приближения его к гранитному. Характерной общей особенностью гранитизации является: 1) значительное изменение вещественного состава перерабатываемых горных пород (расплава) в процессе привноса одних (кремнезем, щелочи, главным образом калий др.) и выноса других (Mg, Fe, Ca и др.) химических компонентов; 2) высокая активность щелочей при вполне подвижном поведении, кроме них, воды и углекислоты. В зависимости от участия в гранитизации расплава и его роли выделяют три ее генетических типа: метасоматическая, палингенно-метасоматическая и инфильтрационно-анатектическая. Промежуточные ступени развития процесса отражаются терминами «гранодиоритизация», «диоритизация» [Судовиков, 1950, 1964].

Гранитоиды – совокупность горных пород, согласно Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, включающая граниты, гранодиориты, плагиограниты и их разновидности, переходные к сиенитам, кварцевым диоритам и диоритам [Левинсон-Лессинг, 1955]. Используется также для характеристики нерасчлененных, недостаточно изученных или не поддающихся расчленению комплексов. Понятие «гранитоиды» является наиболее приемлемым для описания генетически разнотипных продуктов гранитообразования [Рудник, 1975].

Литогенез – совокупность природных процессов образования и дальнейших изменений осадочных горных пород. Главные факторы литогенеза – тектонические движения и климат. Понятие о «литогенезе» впервые было введено в 1893–1894 гг. немецким ученым Й. Вальтером, который выделил в процессе образования осадочных пород пять основных фаз: выветривание, денудацию (включая перенос исходного материала осадков), отложение, диагенез и метаморфизм.

Итак, первое утверждение: Нет литогенеза – нет гранитогенеза.

Из всех известных планет Солнечной системы только Земля имеет мощный осадочный чехол и

только Земля имеет гранитный слой в составе литосферы. Случайно ли это и нет ли связи между процессами литогенеза и гранитогенеза, несмотря на принадлежность первого к поверхностным (экзогенным) явлениям, а второго к внутренним – эндогенным?

В конечном счете, любая модель гранитогенеза должна ответить на главный вопрос: как из базальтового вещества первичной земной коры были сформированы граниты?

Что еще характерно для Земли? Присутствие атмосферы со свободным кислородом и парами воды, гидросферы в виде океанов, морей, рек, озер и пр., а также биосферы в виде растений, животных, микробов, вирусов и т.д.

Многие полагают, что селективному плавлению базитов предшествуют их метаморфическая перекристаллизация с последующей переработкой (гранитизацией) продуктов этого метаморфизма (метабазитов) под воздействием восходящих флюидных потоков глубинного происхождения. В ходе гранитизации в метаморфизованных и перекристаллизованных базальтах развиваются кварц, калиевый полевой шпат, кислый плагиоклаз. Метабазальты преобразуются в гнейсы и гранитогнейсы, а уже при плавлении этих пород формируется гранитная магма. Не исключая возможности проявления подобных процессов на Земле, заметим, что нет никаких препятствий для их реализации и на других планетах (на Марсе, Венере). Однако в их литосфере нет гранитного слоя, аналогично земному. Видимо, одного воздействия глубинных флюидов недостаточно для преобразования базальтового вещества в гранитное, чтобы за счет материала первичной базальтовой протокры получить существенные объемы гранитов [Махлаев, 1998].

А вот если базальт подвергается глубокому химическому выветриванию с последующим разделением компонентов в экзогенных условиях – осадочной дифференциацией, эти экзогенные процессы обеспечивают гораздо более эффективное отделение SiO_2 , главного компонента гранитов, от базитовых компонентов – Mg, Ca, Fe. При химическом выветривании минералы базальта – силикаты магния, железа и кальция (оливин, пироксен, основной плагиоклаз) разлагаются и после серии последовательных преобразований (автометаморфизм, гидролиз, выветривание и пр.) слагающие их элементы переходят в той или иной форме в водный раствор. Если из магматического расплава, кристаллизующегося при температуре около 1000°C , все эти компоненты выделяются практически одновременно, формируя названные выше минералы, то выпадение их из водных растворов (в приповерхностных условиях при значительно меньшей температуре) подчиняется иным законам и правилам. Ca и Mg реагируют с рас-

творенным в воде углекислым газом и образуют карбонаты – кальцит и доломит, являющиеся главными минералами карбонатных осадочных пород: известняков, доломитов. Fe, соединяясь с O_2 и H_2O , дает гидрооксиды – гётит и гидрогётит, но может образовывать и карбонаты – сидерит, анкерит. Кремнезем дает хемогенные и биохемогенные кремнистые осадки – кремнистые илы, кремнистые сланцы. Алюминий связывается в гидроксидах (диаспор, гидраргиллит) либо в слоистых алюмосиликатах (каолинит, гидрослюда), являющихся главными компонентами глин [Махлаев, 1998].

Таким образом, в приповерхностных условиях пути бывших компонентов базальта расходятся, из некогда единого вещества образуются породы разного состава. Если в типичных базальтах содержание SiO_2 незначительно и колеблется около 50%, то в формирующихся за счет выветривания базальтов осадочных породах оно может варьировать от нуля (известняки, доломиты) до почти 100% (кремнистые осадки). Магматическая дифференциация такого эффективного разделения не дает.

В настоящее время на базальтах в зоне тропического климата развиваются мощные латеритные коры выветривания. В раннем докембрии атмосфера Земли была горячей и высококислотной (теперь мы определили бы ее как атмосферу «венерианского типа»). В таких условиях химическое выветривание повсюду должно было идти даже интенсивнее, чем в современных тропиках. Химическое разложение силикатов приводило к высвобождению и выносу из подвергавшихся выветриванию пород протокры огромных объемов кремнезема, а также магния, кальция, железа. При впадении рек в моря (среду с иными значениями pH, Eh, иной соленостью) происходило разделение выносимых продуктов выветривания. В непосредственной близости к континентам осаждался гель кремнезема, сорбирующий щелочи и глинозем, преобразовывавшийся при диагенезе в хемогенные кремнистые осадки и глины. Эти осадки при метаморфизме стали кварцитогнейсами и гнейсами, гранитизация и частичное плавление которых породили первые в истории Земли гранитоиды.

Итак, гранитный слой мог образоваться только на планете с атмосферой и гидросферой, преобразующими энергию солнечных лучей посредством климатических процессов в геологическую работу. Небесные тела, лишённые атмосферы и гидросферы (Луна, Марс), по-видимому, не имеют аналогов земной континентальной коре.

Так откуда же взялась вода на Земле, да еще так много?

Миллиарды лет назад в холодном газопылевом облаке, со временем сгустившемся, уплотнившимся

и ставшем планетой Земля, уже содержалась вода. Скорее всего, она была в виде ледяной пыли. Это подтверждают исследования Вселенной [Рингвуд, 1982; Сафронов, 1987; Сорохтин, 2007 и др.]. Установлено, что исходные элементы для образования воды – водород и кислород – в нашей Галактике принадлежат к шести самым распространенным элементам космоса (H, He, O, Si, Fe, Mg).

Многолетними исследованиями геологических процессов, происходящих на нашей планете, академик АН Украины Н.П. Семененко [Семененко, 1990] установил, что именно вода и составляющие ее элементы играли определяющую роль во всей геологической истории Земли. Исследуя содержание кислорода в составе земной коры, ученый сделал вывод, что в образовании протоземли участвовало громадное количество воды. Помимо этого, ее элементы входили в состав основных компонентов исходного облака: водород – в состав гидридов металлов, кислород – в состав оксидов [Семененко, 1990].

Согласно теории академика А.П. Виноградова [Виноградов, 1961], протоземное облако постепенно уплотнялось и саморазогревалось. Источником необходимой энергии служили процессы радиоактивного распада и уплотнения первичного вещества планеты. С 4 млрд лет в недрах планеты происходят глубинные физико-химические процессы. Там развиваются высокие давления и температуры; исходные вещества при этом испытывают сложные превращения. В результате образуются паро- и газообразные соединения, причем большинство из них состоит из воды или составляющих ее элементов.

Согласно геохимической модели нашей планеты (рис. 1), созданной Н.П. Семененко [Семененко, 1990], земная кора, состоящая из окисленных пород, является своеобразным кислородным каркасом, а ядро планеты слагают гидриды нескольких металлов и частично карбид железа. В зонах самых высоких давлений и температур выделяются, преимущественно, водород и углеводороды. Дальше от центра планеты эти вещества взаимодействуют с окисленными породами – образуются водяной пар и углекислый газ. Эти соединения постоянно выделяются на поверхность через жерла вулканов, через всевозможные наземные и подводные трещины и разломы земной коры.

Часть воды, перешедшая в парообразное состояние, покинула планету. Оставшаяся часть воды составила гидросферу Земли. В связи с тем, что с парами воды выделялись также другие соединения, в частности соединения азота, серы, фосфора, они вместе с углеродом, кислородом и водородом составили основу жизни. Ведь, как известно, жизнь на Земле зародилась в водной среде (см. рис. 1).

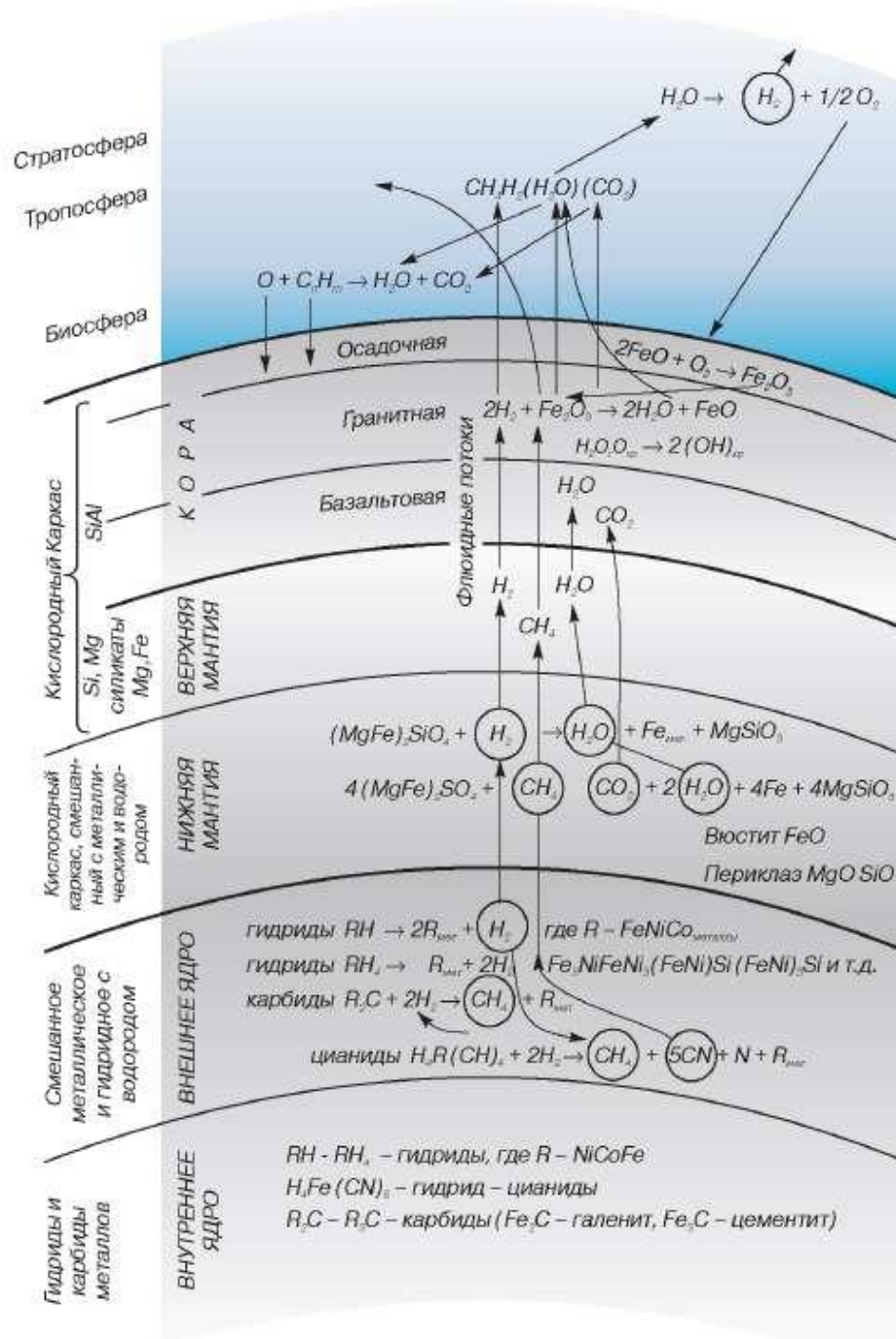


Рис. 1. Сферы Земли и их химический состав [Семененко, 1990]

Fig. 1. Spheres of the Earth and their chemical composition [Semenenko, 1990]

Еще одно утверждение: **Гранит – он и в Африке гранит (так шутят геологи).**

В природе существует большое разнообразие гранитов, но все они, в сущности, очень похожи друг на друга, поскольку более чем на 90% состоят из равных долей кварца, плагиоклаза и калишпата, к которым в небольшом количестве (5–7%) добавляются магнезиально-железистые силикаты, называемые темноцветными минералами.

Почему гранит всегда характеризуется выдержанностью в соотношениях главных компонентов (кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата), а потому всегда остается гранитом? Ответ на него дал знаменитый финский геолог П. Эскола, приложивший к гранитообразованию модель эвтектоидного плавления [Махлаев, 1998].

Температура плавления кварца около 1 600°C, температура плавления альбита (натрового полево-

го шпата) на 200° ниже. Добавка более легкоплавкого компонента облегчает плавление. Обозначим на схеме (рис. 2) точкой T_q температуру плавления чистого кварца, а точками q_1 , q_2 и q_3 , соответственно, температуры плавления и составы смесей кварца с 10%, 20% и 30%-й добавкой альбита. Если мы

соединим эти точки, то получим плавно изгибающуюся кривую, каждая точка которой, расположенная левее, т.е. отвечающая большему содержанию альбита, располагается ниже предыдущих, что соответствует снижению температуры плавления смеси.

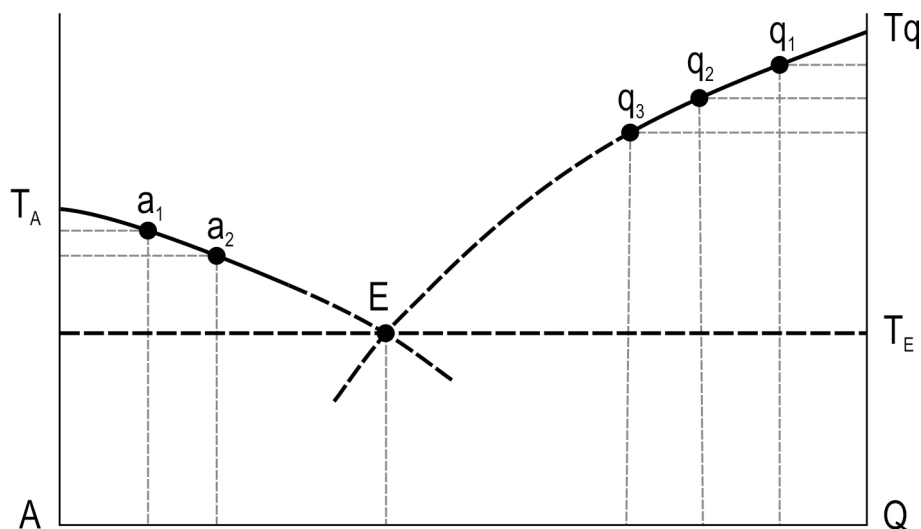


Рис. 2. Схема построения диаграммы плавления системы с эвтектикой E, состоящей из компонентов A и Q

Fig. 2. Diagram of a melting for a system with a eutectic E consisting of components A and Q

Однако все это происходит лишь до определенного предела. Существует такая смесь альбита и кварца, которая является наиболее легкоплавкой, и дальнейшее увеличение доли альбита уже не снижает, а повышает температуру плавления. Такую смесь называют эвтектической смесью или просто эвтектикой (точка E). Исходя из диаграммы следует, что наиболее легкоплавкой будет смесь с 40% кварца и 60% альбита. Это и будет кварц-альбитовая эвтектика.

Реальные природные минеральные смеси (горные породы) редко состоят из двух минералов. Обычно их значительно больше. Но главные закономерности остаются теми же. Для эвтектоидно плавящейся системы трех минералов эвтектика будет состоять из смеси всех этих трех компонентов в определенной пропорции. Как раз подобной тройной эвтектике и отвечают соотношения главных компонентов гранита (кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата), а это означает, что в любой породе, содержащей какое-то количество данных минералов, при нагревании ее до температуры плавления такой эвтектики обязательно появится гранитный расплав [Попов, 1997]. Различным будет лишь его количество: в темных сланцах, богатых магнезиально-железистыми силикатами, это могут быть всего лишь доли про-

цента, в гнейсах среднего состава – проценты и десятки процентов, а гнейсы, богатые кварцем и полевыми шпатами, могут расплавиться полностью.

Таким образом, любая силикатная порода порождает при частичном плавлении гранитную магму хотя бы в микроскопических количествах, даже на уровне межзерновых интерстиций. Вопрос лишь в том, как собрать ее в крупные тела, объем которых может измеряться многими сотнями кубических километров. Итак, при частичном плавлении взвесь недоплавленных реликтов в новорожденном расплаве (мигма) течет как единая масса и в конечном итоге образует такие же интрузивные тела, как и те, что образуются при внедрении чистого расплава. Однако состав слагающих их пород отнюдь не эвтектический: это гранитная эвтектика плюс недоплавленный остаточный материал, содержание которого в мигме может достигать 80% и даже более. Граниты же, напомним, по соотношению главных компонентов всегда отвечают эвтектике.

По мнению многих исследователей, эта проблема решается, если допустить предшествующее плавлению изменение состава субстрата под воздействием глубинных, существенно водных растворов (флюидов) – так называемую метасоматическую гранитизацию, приближающую состав субстрата к граниту.

Примеров таких преобразований описано множество. Однако, анализируя проявления гранитизации, один из основоположников физико-химической петрологии и минералогии академик Д.С. Коржинский [1952] справедливо отмечал, что при классическом метасоматозе количество минералов в преобразуемых породах последовательно сокращается и конечный продукт всегда мономинерален – гранит же полиминерален. Удивительно и другое. При метасоматозе какие-то компоненты привносятся, какие-то выносятся, что определяется их соотношениями в изменяемой породе и гранитизирующих флюидах. Чаще всего при гранитизации гнейсов выносятся Mg, Ca, Fe, а привносятся Si, K, Na, но при гранитизации лейкократовых гнейсов выносятся Na, а из пород, богатых мусковитом, – иногда даже K.

Часто можно прочесть, что при гранитизации всегда привносится Si. Однако в Восточной Сибири (Алданский щит) известны проявления гранитизации кварцитов, а на Украине, Южном Урале и Енисейском кряже – железистых кварцитов. При этом Si оказывается резко избыточным и выносится, а Ca привносится. Еще сложнее, когда гранитизируется толща, где тонко переслаиваются друг с другом породы разного состава, например кварциты и гнейсы. В этом случае из одних прослоев выносятся одни компоненты, а из других – другие. То же можно сказать и о привносе. Так что же это за флюиды, которые любой породе дают именно то, чего ей не хватает, чтобы стать гранитом, а отбирают то, что находится в избытке?

Дело, видимо, в том, что непосредственной средой гранитизационного метасоматического обмена является не вода и даже не надкритический водный флюид, а возникающий при начале плавления межзерновой эвтектоидный расплав – нарождающаяся гранитная магма. Эта интерстиционная (межзерновая) магма играет роль посредника между гранитизирующими флюидами [Перчук, 1997] и гранитизируемой породой. В силикатном расплаве, как и в воде, молекулы растворяемых веществ диссоциируют на ионы, которые мигрируют в нем (в зависимости от градиента концентрации и иных факторов) и вступают в обменные реакции с контактирующей с расплавом твердой фазой, гранитизируя ее. В итоге недоплавленные остатки субстрата все более приближаются по составу к граниту и неизбежно вовлекаются в эвтектоидное плавление.

Таким образом, межгранулярный расплав в гранитизируемых толщах играет роль своего рода бу-

фера, способствуя удалению выносимых при гранитизации компонентов и отложению привносимых. Идет гранитизация, одновременно растет доля расплава, но по составу он всегда остается эвтектическим, то есть гранитным. Это и является пределом метасоматических преобразований. Как только в субстрате формируются за счет привносимых при гранитизации щелочей и кремнезема новые полевые шпаты и кварц, они тут же переходят в расплав, причем переходят в тех же эвтектических соотношениях. Включение в эту систему расплава-буфера делает процесс гранитообразования саморегулирующимся: объемные соотношения фаз варьируют, но состав расплавной фазы все время будет гранитным, хотя с изменением условий плавления в ней и наблюдаются некоторые закономерные изменения. Так, повышение температуры в очаге плавления приводит к прогрессирующему обогащению расплава магнием, железом, кальцием и, соответственно, к смене гранитной магмы гранодиоритовой.

Еще нагляднее будет обогащенность (или обедненность) теми или иными малыми элементами. Конечно, различия затрагивают и калиевую часть гранитов. Во-первых, в зависимости от физико-химических условий, определяемых прежде всего глубиной, на которой протекали процессы плавления, а также характером гранитообразующих флюидов, могут меняться в определенных пределах количественные соотношения кристаллических фаз в гранитной эвтектической системе (кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата). Во-вторых, в зависимости от тех же параметров варьируют пределы смесимости калиевого и натрового полевых шпатов, степень их структурной упорядоченности, что приводит к появлению специфичных минеральных форм. И все же в любом случае продукт корового плавления будет представлен гранитом.

Таким образом, гранитообразование, раз начавшись, продолжается вновь и вновь, если в соответствующих сегментах земной коры создаются необходимые геодинамические и термодинамические условия. Именно это мы и наблюдаем в становлении Каахемского магматического ареала, где установлено не менее 15 импульсов гранитообразования в течение четырех этапов геодинамических условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (гранты № 13-05-00181, 16-05-00255).

ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов А.П. О происхождении вещества земной коры // Геохимия. 1961. № 1. С. 3–29.
Грин Д.Х., Рингвуд А.Э. Происхождение магматических пород известково-щелочного ряда. Происхождение базальтовых магм // Петрология верхней мантии. М., 1968. С. 118–227.
Коржинский Д.С. Гранитизация как магматическое замещение // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1952. № 2. С. 55–69.
Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Избранные труды. Т. IV: Петрология. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 446 с.

- Махлаев Л.В. От чего зависит минеральный состав гранитов? // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 11. С. 120–125.
- Перчук Л.Л. Глубинные флюидные потоки и рождение гранита // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 6. С. 56–63.
- Попов В.С. Как образуются граниты // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 6. С. 64–69.
- Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 293 с.
- Рудник В.А. Генетические типы гранитообразования // Материалы IV Всесоюзного петрографического совещания. Баку, 1969. С. 319–321.
- Рудник В.А. Гранитообразование // Геологический словарь. М., 1973. Т. 1. С. 188–195.
- Рудник В.А. Гранитообразование и формирование земной коры в докембрии. Л.: Недра, 1975. 415 с.
- Сафронов В.С. Происхождение Земли. М.: Знание, 1987. 48 с.
- Семененко Н.П. Кислородно-водородная модель Земли / Акад. наук Укр. СССР. Ин-т геохимии и физики минералов. Киев: Наукова думка, 1990. 246 с.
- Сорохтин О.Г. Жизнь Земли. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. 450 с.
- Сугорокова А.М. Новые геохронологические и изотопные данные к вопросу о возрасте ассоциаций Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию ТувИКОПР СО РАН (14–15.10.2015, Кызыл) / отв. ред. д-р экон. наук Г.Ф. Балакина. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2015. С. 166–168.
- Сугорокова А.М., Хертек А.К. Новые данные к вопросу о возрасте Каахемского магматического ареала (Восточная Тува) // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 50–60.
- Сугорокова А.М. К проблеме гранитизации на Земле // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. 18–20 октября 2017, г. Кызыл. Кызыл, 2017. С. 239–244.
- Судовиков Н.Г. Метасоматические граниты // Вестник ЛГУ. 1950. № 10. С. 78–110.
- Судовиков Н.Г. Региональный метаморфизм и некоторые проблемы петрологии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 550 с.
- Шейнманн Ю.М. Об условиях образования магмы // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1970. № 5. С. 31–50.
- Chappell B.W., White A.J.R. Two Contrasting Granite Types // Pacific Geol. 1974. No. 8. P. 173–174.
- Hamilton W.B. Origin of high-alumina basalt, andesite and dacite magmas // Science. 1964. V. 146. P. 635–637.
- O'Hara M.J. Primary magmas and the origin basalts // Scot. Geol. 1965. Is. 19. P. 19–40.
- Taylor S.R., White A.J. Geochemistry of andesites and the growth of continents // Nature. 1965. V. 208. No. 63. P. 271–273.
- Vogt I.H.L. On the theory of the parental magma of basaltic composition // Skriptor Norsk Vid. Akad. 1935. Bd. 2. P. 1–47.

Автор:

Сугорокова Амина Мидхатовна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.
E-mail:samina51@inbox.ru

Geosphere Research, 2019, 2, 27–34. DOI: 10.17223/25421379/11/2

A.M. Sugorakova

Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

GRANITE FORMATION IN THE EARTH'S LITHOSPHERE BY THE EXAMPLE OF THE KAAKHEM MAGMATIC AREA (EASTERN TUVA)

The link of lithogenesis with granitogenesis is gradually substantiated. The role of atmosphere and hydrosphere is pointed out in the maximum efficiency of exogenous processes that caused the differentiation of the basaltic crust and the formation of the sedimentary crust. The origin of water and oxygen on the Earth is explained. The role of the eutectic is described in the formation of like-composition granite melt and as consequence, the formation of an intergranular eutectoid granite melt that further the continuous process of granite formation under the certain thermodynamic and geodynamic conditions.

Keywords: lithogenesis, granitization, melt, fluids, thermodynamic conditions, eutectic.

References

- Vinogradov A.P. *O proiskhozhdenii veshchestva zemnoy kory* [On the origin of the substance of the earth's crust] // Geokhimiya. 1961. № 1. pp. 3–29. In Russian
- Grin D.KH., Ringvud A.E. *Proiskhozhdeniye magmaticheskikh porod izvestkovo-shchelochного ryada. Proiskhozhdeniye bazaltovyykh magm* [Origin of igneous rocks of lime-alkaline series. Origin of basalt magmas] // Petrologiya verkhney mantii. Moscow. 1968. pp. 118–227. In Russian
- Korzhinskiy D.S. *Granitizatsiya kak magmaticheskoye zameshcheniye* [Granitization as magmatic replacement] // Izvestiya AN SSSR. Ser. Geol. 1952. № 2. pp. 55–69. In Russian
- Levinson-Lessing F.YU. *Izbrannyye trudy. T. IV (Petrologiya)* [Selected Works. T. IV (Petrology)]. Moscow, Izd-vo AN SSSR. 1955. 446 p. In Russian
- Makhlayev L.V. *Ot chego zavisit mineral'nyy sostav granitov?* [What determines the mineral composition of granites?] // Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. 1998. № 11. pp. 120–125. In Russian
- Perchuk L.L. *Glubinnyye flyuidnyye potoki i rozhdeniye granita* [Deep Fluid Fluxes and Granite Birth] // Sorosovskiy Obrazovatel'nyy Zhurnal. 1997. № 6. pp. 56–63. In Russian

- Popov B.C. *Kak obrazuyutsya granity* [How are granites formed]// Sorosovskiy Obrazovatel'nyy Zhurnal. 1997. № 6. pp. 64–69. In Russian
- Ringvud A.Ye. *Proiskhozhdeniye Zemli i Luni* [Origin of the Earth and the Moon]. Moscow: Nedra. 1982. 293 p. In Russian
- Rudnik V.A. *Geneticheskiye tipy granitoobrazovaniya* [Genetic types of granite formation] // Materialy IV Vsesoyuz. petrograf. Soveshchaniya. Baku. 1969. pp. 319–321. In Russian
- Rudnik V.A. *Granitoobrazovaniye* [Granite formation]// Geologicheskii slovar'. T. 1. Moscow. 1973. p. 188–195. In Russian
- Rudnik V.A. *Granitoobrazovaniye i formirovaniye zemnoy kory v dokembrii* [Granite formation and formation of the Earth's crust in Precambrian. Leningrad, Nedra. 1975. 415 p. In Russian
- Safronov V.S. *Proiskhozhdeniye Zemli* [Origin of the Earth]. Moscow: Znaniye. 1987. 48 p. In Russian
- Semenenko N.P. *Kislorodno-vodorodnaya model' Zemli* [Oxygen-hydrogen model of the Earth]/ Akad. nauk Ukr. SSSR. In-t geokhimii i fiziki mineralov. Kiev: Naukova dumka, 1990. 246 p. In Russian
- Sorokhtin O.G. *Zhizn' Zemli* [The life of the Earth]. Moscow: NITS "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika. 2007. 450 p. In Russian
- Sugorakova A.M. *Novye geokhronologicheskiye i izotopnyye dannyye k voprosu o vozraste assotsiatsiy Kaakhemskogo magmaticheskogo areala (Vostochnaya Tuva)* [New geochronological and isotopic data on the question of the age of associations of the Kaakhem magmatic area (Eastern Tuva)]// Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 20-letiyu TuvIKOPR SO RAN (14–15.10.2015, Kyzyl) / Otv. red. dokt. ekon. nauk G.F. Balakina. Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN, 2015. pp. 166–168. In Russian
- Sugorakova A.M., Khertek A.K. The new data to the question of the age of associations Kaakhem magmatic area (Eastern Tuva) // Geosphere Research. 2017. № 3. pp. 50–60. DOI: 10.17223/25421379/4/7. In Russian
- Sugorakova A.M. *K probleme granitizatsii na Zemle* [On the problem of granitization on the Earth] // Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura / Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 18–20 oktyabrya 2017, g. Kyzyl. 2017. pp. 239–244. In Russian
- Sudovikov N.G. *Metasomaticheskiye granity* [Metasomatic granites]// Vestnik LGU. 1950. № 10. pp. 78–110.
- Sudovikov N.G. *Regional'nyy metamorfizm i nekotoryye problemy petrologii* [Regional metamorphism and some problems of petrology]. Leningrad, Izd-vo LGU. 1964. 550 p. In Russian
- Sheynmann Yu.M. *Ob usloviyakh obrazovaniya magmy* [On the conditions of magma formation]// Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli. 1970. № 5. pp. 31–50. In Russian
- Chappell B.W., White A.J.R. Two Contrasting Granite Types // Pacific Geol. 1974. No 8. pp. 173–174.
- Hamilton W.B. Origin of high-alumina basalt, andesite and dacite magmas // Science. 1964. V. 146. pp. 635–637.
- O'Hara M.J. Primary magmas and the origin basalts // Scot.Geol. 1965. Iss. 19. pp. 19–40.
- Taylor S.R., White A.J. Geochemistry of andesite's and the growth of continents // Nature. 1965. V. 208. No. 63. pp. 271–273.
- Vogt I.H.L. On the theory of the parental magma of basaltic composition // Skripter Norsk Vid. Akad. 1935. Bd. 2. pp. 1–47.

Author:

Sugorakova Amina M., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Scientific Collaborator, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia.
E-mail: samina51@inbox.ru