

WHAT THE MINERAL COMPOSITION OF GRANITE DEPENDS ON

L. V. MAKHLAEV

Numerous varieties of granitic rocks exist, but all they are characterized by a stable ratio of major minerals (quartz and feldspars) and, as a result, they are retained granites under all variations of their major minerals. Possible causes of such stability are discussed.

Несмотря на обилие разновидностей гранитных пород, все они характеризуются весьма выдержанными отношениями главных компонентов – кварца и полевых шпатов, а потому при всех вариациях остаются гранитами. В статье обсуждаются возможные причины этого постоянства.

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ГРАНИТОВ

Л. В. МАХЛАЕВ

Сыктывкарский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Граниты служат объектом повышенного внимания геологов почти полтора века. Интерес к ним временами ослабевал, но никогда не иссякал полностью. Сейчас мы переживаем очередной его подъем, о чем свидетельствуют не только публикации в геологических изданиях, но и появление соответствующих статей в “Соросовском Образовательном Журнале” [1, 2]. Граниты являются определяющим компонентом континентальной земной коры, формируя ту сушу, на которой мы живем и в пределах которой сосредоточено подавляющее большинство доступных для разработки месторождений полезных ископаемых. Континентальная кора отличается от океанической большей мощностью (ее толщина достигает 30 км и более, тогда как толщина океанической коры не превышает 10 км), но главное отличие заключается в присутствии в ее составе так называемого гранитного слоя. Океаническая кора лишена гранитов. Именно это, по современным представлениям, является главным геологическим различием между континентами и океанами. Поэтому совершенно очевидно, что, разобравшись в закономерностях происхождения гранитов, можно получить ключ и к решению гораздо более широкой проблемы происхождения континентов.

Несмотря на длительную историю изучения, граниты во многом все еще остаются загадочными и даже противоречивыми образованиями. Противоречия начинаются уже с интерпретации абсолютно надежных и тривиальных данных о составе этих пород. Это подмечено в первом же абзаце упомянутой выше статьи Л.Л. Перчука, который он начинает с утверждения, что в природе существует “большое разнообразие гранитов”, но тут же пишет, что 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 [1, с. 56]. И он прав – несмотря на постоянство соотношений первых трех главных минералов, именуемых силикатными, граниты очень разнообразны в составе темноцветной части: широко представлены в природе биотитовые, роговообманковые, диопсидовые, гиперстеновые, двуслюдяные граниты, известны и более

экзотические разновидности. Если добавить к этому вариации в составе плагиоклаза (Ca-Na-полевого шпата), взаимной смесимости натрового и калиевого полевых шпатов, степени их структурной упорядоченности, то количество видов гранита, различающихся минеральным составом, будет намного более сотни. Так в чем же причина такого многообразия, что предопределяет минеральный состав этих пород? И почему при всем многообразии гранитов всегда остается гранитом, то есть породой с теми самыми количественными соотношениями главных минералов, о которых сказано выше?

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФАКТОРАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВАРИАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ГРАНИТОВ

В петрологии есть немало версий, объясняющих причины широких вариаций минерального состава гранитов (особенно его темноцветной части), но в основном их можно свести к двум альтернативным концепциям. Основу первой составляет принцип Миясиро, известного японского петролога. В соответствии с этим принципом минеральный состав глубинных пород, включая и граниты, определяется лишь физическими факторами, в первую очередь соотношением температуры и давления. Вариации химизма системы сказываются только на количественных соотношениях минералов, но не на том, какие именно минералы представлены в породе. Определенные коррективы вносят парциальное давление воды и фугитивность кислорода [3]. Подчеркнем, что в соответствии с принципом Миясиро минеральный состав гранита определяется внешними по отношению к граниту факторами. Эту версию разделяют многие российские петрологи.

Альтернативную концепцию можно назвать принципом Чаппела, австралийского петролога. Согласно этому исследователю, “граниты – это слепок исходных пород”, которые претерпели плавление и иные преобразования, став в конечном счете гранитами. Различия в составе гранитов отражают поэтому вариации состава того материала, за счет которого эти граниты сформировались [4]. Впервые эта мысль была высказана моим учителем профессором Н.Г. Судовиковым, который еще в 1964 году писал, что именно “неоднородность субстрата... является главным фактором, определяющим вариации составов магматических гранитов”. Однако, как часто бывает в науке, это высказывание опередило время и не привлекло внимание коллег.

Исключительные возможности для исследования соотношений гранитов с исходными породами дает таймырская гранитная серия, которую я изучал более 15 лет. Отличная обнаженность позволяет на Таймыре шаг за шагом проследить переходы от гнейсов к магматическим гранитам. В итоге было установлено, что на всех стадиях такого преобразования, включая полное плавление и последующую

кристаллизацию магмы, граниты наследуют многие особенности исходного субстрата: относительную обогащенность (или обедненность) специфическими химическими элементами, количественные соотношения между ними или их комбинациями, что проявляется в минеральном составе гранитов и в особенностях слагающих их минералов. Наследование это столь отчетливо, что позволяет вполне корректно решать и обратную задачу – реконструировать по особенностям состава гранитов первичную природу исходных субстратов, когда прямые переходы наблюдать не удастся. Все это изложено в монографии [5], в которой впервые было сформулировано понятие об “изолитогенных гранитных рядах” – совокупности гранитоидов, сформированных за счет преобразования литологически однотипных исходных пород, и даны отличительные признаки рядов, наиболее распространенных в природе. Почти в те же годы независимо друг от друга наследование коровыми гранитами особенностей состава субстрата было показано на примере различных регионов И.Б. Щербаковым (Киев), В.С. Шкодинским (Якутск) и В.А. Макрыгиной (Иркутск). Однако достоянием мировой науки “принцип наследования” сделал конечно же Б. Чаппел [6], который сумел четко обосновать его, привлекая для этого новейшие аналитические методы и результаты наблюдений по всем континентам.

Чаппеловские группы крупнее моих изолитогенных рядов. Их всего четыре. Первые три составляют продукты преобразования и плавления земной коры: S-граниты, сформированные за счет первично-осадочных пород (в основном метаморфизованных глинистых осадков); I-граниты, образованные за счет метаморфизованных магматических пород (в основном метабазальтов), и A-граниты, которые развиваются по породам, уже претерпевшим раннее гранитизацию – по гранито-гнейсам основания гранитного слоя. Породы четвертой группы (M-граниты) не являются коровыми – это дифференциаты негранитных мантийных магм: андезитовой и базальтовой. Группы хорошо распознаются, и приложение этой схемы к конкретным регионам дает обычно интересные и далеко идущие выводы. В этом отношении показательны работы Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН на севере Урала в последние 10 лет. В этом регионе представлены гранитоиды трех чаппеловских групп: A-, I-, и M-типы. Они отчетливо различаются по геохимическим особенностям. Каждый гранитный массив можно уверенно отнести к тому или иному из этих типов. После такой идентификации была выявлена отчетливая зональность их распространения (рис. 1).

M-граниты локализованы в пределах восточного склона Урала на продолжении Тагильского прогиба, в зоне зарождающейся (незрелой) континентальной коры. Граниты I- и A-типа расположены в Центрально-Уральском поднятии, характеризующемся

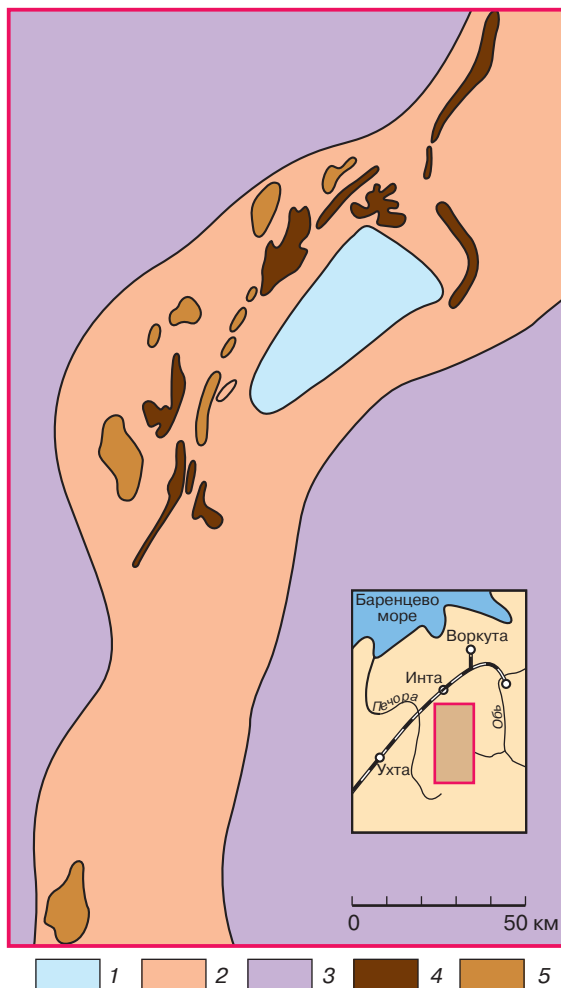


Рис. 1. Схема размещения гранитных массивов Приполярного Урала: 1 – протерозойские гнейсы, 2 – рифейские сланцы, 3 – палеозойские отложения, 4 – А-граниты, 5 – I-граниты

мощной и зрелой континентальной корой. При этом в западной части поднятия расположены I-граниты, а в осевой и восточной – А-граниты. В соответствии с чапеловской моделью субстратом первых должны быть метабазиты, а вторых – гранитизированные породы. Геофизические исследования, проведенные в те же годы, показали, что основание гранитно-метаморфического слоя под западной частью Центрально-Уральского поднятия действительно сложено гранулитно-базитовым комплексом, а под осевой и восточной – гранито-гнейсовым [7]. Таким образом, распределение гранитоидов различных групп на уровне современного эрозионного среза дает ключ к познанию особенностей глубинного строения литосферы в изучаемом регионе. Установлены также явные различия в рудной специализации этих гранитов: с породами М-типа сопряжены железорудные месторождения и

медная минерализация, с А-гранитами – редкоземельная и редкометалльная минерализация, а с I-гранитами ассоциируется недавно выявленная весьма перспективная для региона золото-платиновая минерализация. И причина этих различий также заключается в специфике состава исходного материала гранитоидов разных типов.

ПОЧЕМУ ПРИ ВСЕХ ВАРИАЦИЯХ СОСТАВА ГРАНИТ ВСЕГДА ОСТАЕТСЯ ГРАНИТОМ

Рассмотрим второй из поставленных во введении вопросов: 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. Рассмотрим этот процесс на простейшем примере. Температура плавления кварца около 1600°C, температура плавления альбита (натрового полевого шпата) на 200° ниже. Как будет плавиться смесь этих минералов? Логично предположить, что добавка более легкоплавкого компонента облегчает плавление. Так и происходит на самом деле. Обозначим на схеме (рис. 2) точкой T_q температуру плавления чистого кварца, а точки q_1, q_2 и q_3 – соответственно температуры плавления и составы смесей кварца с 10%-, 20%- и 30%-ной добавкой альбита. Если мы соединим эти точки, то получим плавно изгибающуюся кривую, каждая точка которой, расположенная левее, то есть отвечающая большему содержанию альбита, располагается ниже предыдущих, что соответствует снижению температуры плавления смеси. 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.

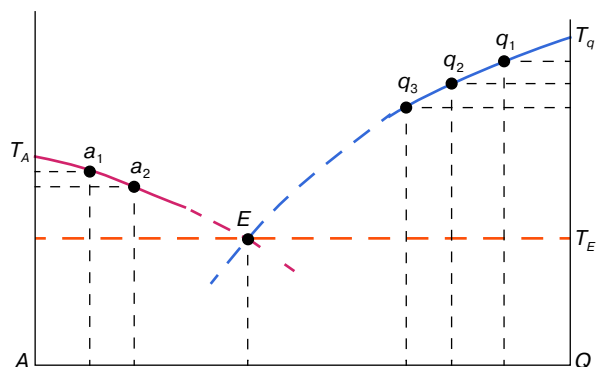


Рис. 2. Схема построения диаграммы плавления системы с эвтектикой E, состоящей из компонентов A и Q (пояснения даны в тексте)

Сравним соответствующие данные для чистого альбита и его смесей с 10%- и 20%-ной добавкой кварца. Обозначим их составы и температуры плавления на графике точками T_A , a_1 , a_2 . Оказывается (хотя некоторым это может показаться странным), добавка к альбиту более тугоплавкой примеси (кварца) на первых порах не повышает, а тоже снижает температуру плавления: соединив эти точки, мы получим кривую, похожую на кривую $T_q - q_3$, но наклоненную ей навстречу. Если продолжим эти кривые, то они пересекутся в некоторой точке E , отвечающей смеси с такими соотношениями альбита и кварца, которая будет плавиться при наименьшей температуре. Такую смесь называют эвтектической или просто эвтектикой. Исходя из диаграммы следует, что наиболее легкоплавкой будет смесь с 40% кварца и 60% альбита. Это и будет кварц-альбитовая эвтектика.

Рассмотрим теперь, как будет плавиться смесь с какими-то случайно заданными соотношениями этих минералов, например смесь M_2 (рис. 3). По мере нагревания до T_E такая смесь во всем объеме будет оставаться твердой, но при достижении этой температуры на стыках зерен кварца и альбита начнет формироваться расплав, в котором соотношения кварцевого и альбитового компонентов будут точно соответствовать их соотношениям в эвтектике. Чем ближе точка M расположена к точке E , тем большая часть смеси расплавится. Смесь состава E расплавится полностью. Чем ближе состав смеси будет к альбиту или кварцу (точке A или Q), тем меньше расплава образуется, но появится он в любой смеси, и состав его всегда будет эвтектическим. Разным для различных смесей будет лишь содержание жидкой фазы. Совсем не возникнет расплава

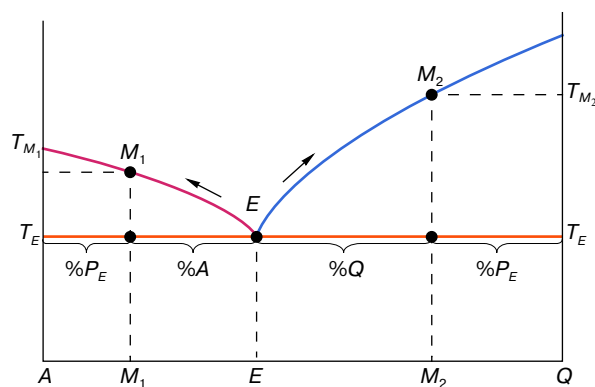


Рис. 3. Ход плавления кварц-альбитовых смесей на бинарной эвтектической диаграмме: A — альбит, Q — кварц, E — эвтектика, M_1 и M_2 — кварц-альбитовые смеси, T_{M_1} и T_{M_2} — их температуры плавления; $\%Q$ и $\%P_E$ — доля кварца и эвтектического расплава в смеси состава M_2 при температуре плавления эвтектики (T_E); $\%A$ и $\%P_E$ — доля альбита и эвтектического расплава в смеси состава M_1 при той же температуре

при достижении температуры T_E лишь в том случае, если мы будем нагревать чистый альбит или чистый кварц.

При дальнейшем притоке тепла температура смеси некоторое время не будет повышаться — до тех пор, пока не сформируется столько расплава состава E , сколько его может сформироваться в смеси состава M_2 . В конце этого процесса система будет состоять из расплава E (эвтектического) и той части кварца, которая в исходной смеси оказалась в избытке по сравнению с его эвтектической долей. Затем (при продолжающемся нагревании) температура вновь будет повышаться, а доля расплава расти за счет растворения в нем кварца. При этом состав расплава (в результате обогащения кремнеземом) будет постепенно смещаться от E к M_2 . Когда температура достигнет значения T_{M_2} , весь кварц перейдет в расплав и в результате сформируется однородная жидкость состава исходной смеси (M_2). Аналогично будет плавиться смесь состава M_1 , с той лишь разницей, что недоплавленная твердая фаза будет представлена здесь не кварцем, а альбитом. Однако и в этом случае расплав начнет формироваться при температуре T_E и состав его будет эвтектическим.

Конечно, реальные природные минеральные смеси (горные породы) крайне 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. Основной соответствующей диаграммы будет служить в данном случае треугольник с вершинами, отображающими состав этих минералов, а точка тройной эвтектики (точка E) будет лежать где-то внутри этого треугольника, более или менее близко к его середине. Механизм такого плавления обстоятельно рассмотрен в уже упоминавшейся статье В.С. Попова [2]. 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 этих минералов, при нагревании ее до температуры плавления такой эвтектики обязательно появится гранитный расплав. Различным будет лишь его количество: в темных сланцах, богатых магнезиально-железистыми силикатами, это могут быть всего лишь доли процента, в гнейсах среднего состава — проценты и десятки процентов, а гнейсы, богатые кварцем и полевыми шпатами, могут расплавиться полностью.

Таким образом, любая порода порождает при частичном плавлении гранитную магму. Вопрос лишь в том, как собрать ее в крупные тела, объем которых может измеряться многими сотнями кубических километров. Обычно предлагается механизм фильтр-прессинга — нечто вроде отжимания сывротки под прессом сквозь сито. Пресс представить в

природе несложно, его роль может играть любой блок жестких пород. Но где взять сито? А без сита невозможно отделить воду даже от макарон: чуть шель окажется побольше и они потекут вместе! Так и взвесь недоплавленных реликтов в новорожденном расплаве (мигма) течет как единая масса и в конечном итоге образует такие же интрузивные (внедренные) 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 справедливо отмечал, что при классическом метасоматозе количество минералов в преобразуемых породах последовательно сокращается и конечный продукт всегда мономинерален — гранит же полиминерален. Странно 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 выносятся, а Ca привносятся. 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 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 эвтектичный расплав — нарождающаяся гранитная магма. Эта интерстиционная (межзерновая) магма играет роль посредника между гранити-

зирующими флюидами [1] и гранитизируемой породой. В силикатном расплаве, как и в воде, молекулы растворимых 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 эвтектичное плавление.

Таким образом, межгранулярный расплав в гранитизируемых толщах играет роль своего рода буфера, 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. Вот тут и срабатывает принцип Миясиро, объясняющий степень основности (мафичности) расплава, но отнюдь не состав этой мафической добавки, который всецело будет зависеть от химизма исходных пород, в зависимости от которого одни граниты будут существенно железистыми, другие — кальциевыми, третьи — глиноземистыми и т.д.

Еще нагляднее будет обогащенность (или обедненность) теми или иными малыми элементами. Конечно, различия затрагивают и светлую (салическую) 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 специфических минеральных форм. И все же в любом случае продукт корового плавления будет представлен гранитом.

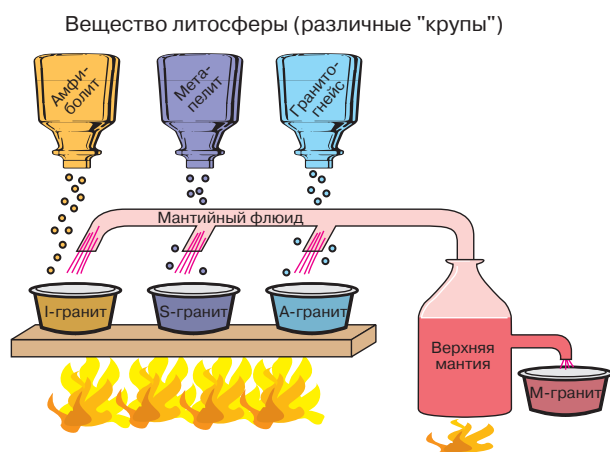


Рис. 4. “Кухня Плутона” – схема взаимодействия различных факторов в формировании гранитов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Какая из альтернативных концепций верна – принцип Миясиро или принцип Чаппела? Принцип Миясиро верен, поскольку он определяет состав гранитной “матрицы”: тип полевого шпата, количественные отношения полевых шпатов и кварца, общее содержание темноцветных минералов. Но верен и принцип Чаппела, объясняющий состав мафической части магмы, а в итоге набор темноцветных минералов, то есть петрохимический тип гранита. Взаимоотношения разных факторов в формировании гранитных магм показаны на схеме (рис. 4). Принцип Чаппела определяет также геохимическую специализацию гранитоидов и, следовательно, их потенциальную рудоносность. А вот реализация этой возможности зависит от определенных физико-химических условий – тут правит бал принцип Миясиро.

На рассмотренном примере в очередной раз можно убедиться в главной особенности большинства научных дискуссий: концепции, представляющиеся их участникам непримиримыми, как правило, вовсе не исключают, а дополняют друг друга, что и приводит в конечном счете к прогрессу науки и очередному продвижению к истине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перчук Л.Л. Глубинные флюидные потоки и рождение гранита // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 6. С. 56–63.
2. Попов В.С. Как образуются граниты // Там же. С. 64–69.
3. Беляев Г.М., Рудник В.А. Формационно-генетические типы гранитоидов. Л.: Недра, 1978. 168 с.
4. Chappell B.W., White A.J.R., Wyborn D. The Importance of Residual Source Material (Restite) in Granite Petrogenesis // J. Petrol. 1987. Vol. 28, № 6. P. 1111–1138.
5. Махлаев Л.В., Коробова Н.И. Генетические гранитоидные ряды докембрия Таймыра. Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1972. 158 с.
6. Chappell B.W., White A.J.R. Two Contrasting Granite Types // Pacific Geol. 1974. № 8. P. 173–174.
7. Махлаев Л.В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия: (Полярный и Приполярный Урал). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. 150 с.

* * *

Лев Васильевич Махлаев, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии Сыктывкарского государственного университета, член-корреспондент Российской академии естественных наук, зав. лабораторией петрографии Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. Области научных интересов – геология гранитов, процессы формирования континентальной коры. Автор более 100 научных статей, пяти методических работ и шести монографий.