

А.М. СУГОРАКОВА

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)*

## К ПРОБЛЕМЕ ГРАНИТИЗАЦИИ НА ЗЕМЛЕ

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.

Рис. 3. Библ. 3 назв. С. 30–36.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: Грант № 13-05-00181 и по Государственному заданию ТувИКОПР СО РАН, научная тема 222020400035-4*

A.M. SUGORAKOVA

*Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)*

### THE PROBLEM OF GRANITOGENESIS ON THE EARTH

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, eutectics.

Figures 3. References 3. P. 30–36.

При взгляде на геологическую карту Тувы привлекает внимание, что вся восточная её часть окрашена в красные цвета разных оттенков — цвета гранитоидов. Там выделяются Каахемский, Бийхемский, Хамсаринский, Восточно-Таннуольский гранитоидные батолиты общей площадью более 60 тыс. км<sup>2</sup>.

Наиболее крупный из них, Каахемский, площадью более 30 тыс. км<sup>2</sup>, 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) получены принципиально новые результаты, которые позволили выделить Каахемский магматический ареал, включающий:

1. Собственно Каахемский аккреционно-коллизийный гранитоидный батолит с синплутоническими габброидами и синхронными игнимбритами.
2. Обрамляющие батолит более древние гранитоиды офиолитовых и островодужных ассоциаций.
3. А также сквозь структурную зону 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? Что вызвало такое масштабное по объёму и длительности гранитообразование?

Прежде чем ответить на эти вопросы, необходимо разобраться с проблемами гранитогенеза на Земле. Таких значительных масс континентальной коры нет на других планетах.

На современном уровне выделяются 4 группы гранитов. Первые три составляют продукты преобразования и плавления земной коры:

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

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

A-граниты, которые развиваются по породам, уже претерпевшим ранее гранитизацию, — по гранито-гнейсам основания гранитного слоя.

Породы четвёртой группы (M-граниты) не являются коровыми — это дифференциаты негранитных 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.

**Итак, первое утверждение: нет литогенеза — нет гранитогенеза.**

Из всех известных планет Солнечной системы только Земля имеет мощный осадочный чехол и гранитный слой в составе литосферы. Случайно ли это? Нет ли связи между процессами литогенеза и гранитогенеза, несмотря на принадлежность первого к поверхностным (экзогенным) явлениям, а второго к внутренним — эндогенным?

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

Что ещё характерно для Земли? Присутствие атмосферы со свободным кислородом и парами воды, гидросферы в виде океанов, морей, рек, озёр 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 (Марсе, Венере). Однако в их литосфере нет гранитного слоя, аналогичного земному. Видимо, одного воздействия глубинных флюидов недостаточно, чтобы преобразовать базальтовое вещество в гранитное, чтобы за счёт материала первичной базальтовой протокоры получить существенные объёмы гранитов.

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  $\text{SiO}_2$ , главного компонента гранитов, от базитовых компонентов — Mg, Ca, Fe. При химическом выветривании минералы базальта силикаты магнезия, железа и кальция (оливин, пироксен, основной плагиоклаз) разлагаются, и, после серии последовательных преобразований, слагающие их элементы переходят в той или иной форме в водный раствор. Если из магматического расплава, кристаллизующегося при температуре около  $1000^\circ\text{C}$ , 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. Са и Mg реагируют с растворённым в воде углекислым газом и образуют карбонаты — кальцит и доломит, являющиеся главными минералами карбонатных осадочных пород: известняков, доломитов, писчего мела. Fe, соединяясь с O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, даёт гидрооксиды — гётит и гидрогётит, но может образовывать и карбонаты — сидерит, анкерит. Кремнезём даёт хемогенные и биохемогенные кремнистые осадки — кремнистые илы, кремнистые сланцы. Алюминий связывается в гидрооксидах (диаспор, гидраргиллит), либо в слоистых алюмосиликатах (каолинит, гидрослюда), являющихся главными компонентами глин.

Таким образом, в приповерхностных условиях пути бывших компонентов базальта расходятся, из некогда единого вещества образуются породы разного состава. Если в типичных базальтах содержание SiO<sub>2</sub> незначительно и колеблется около 50 %, то в формирующихся за счёт выветривания базальтов осадочных породах оно может варьировать от нуля (известняки, доломиты) почти до 100 % (кремнистые осадки). Магматическая дифференциация такого эффективного разделения не даёт.

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 её как атмосферу «венерианского типа»). В таких условиях химическое выветривание повсюду должно было происходить даже интенсивнее, чем в современных тропиках. Химическое разложение силикатов приводило к высвобождению и выносу из подвергавшихся выветриванию пород протокры огромных объёмов кремнезёма, а также магния, кальция, железа. При впадении рек в моря (среду с иными значениями pH, Eh, иной солёностью) происходило разделение выносимых продуктов выветривания. В непосредственной близости к континентам осаждался гель кремнезёма, сорбирующий щёлочи и глинозём, 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 ещё так много?

Миллиарды лет назад в холодном газопылевом облаке, со временем сгустившемся, уплотнившимся и ставшем Землёй, уже содержалась вода. Скорее всего, она была в виде ледяной пыли. Это подтверждают исследования Вселенной. Установлено, что исходные элементы для образования воды — водород и кислород — в нашей Галактике принадлежат к шести самым распространённым элементам космоса.

Многолетними исследованиями геологических процессов, происходящих на нашей планете, академик АН Украины Н.П. Семененко (1990) установил, что именно вода и составляющие её элементы играли определяющую роль во всей геологической истории Земли. Исследуя содержание кислорода в составе земной коры, учёный сделал вывод, что в образовании протоземли участвовали громадные количества воды. Помимо этого, её элементы входили в состав основных компонентов исходного облака: водород — в состав гидридов металлов, кислород — в состав оксидов.

Согласно теории академика А.П. Виноградова (1961), протоземное облако постепенно уплотнялось и саморазогревалось. Источником необходимой энергии служили процессы радиоактивного распада и уплотнения первичного вещества планеты. С незапамятных времён в недрах планеты происходят глубинные физико-химические процессы. Там развиваются чудовищные давления и температуры; исходные вещества при этом испытывают сложные превращения. В результате образуются паро- и газообразные соединения, причём большинство из них состоит из воды или составляющих её элементов.

Согласно геохимической модели нашей планеты (рис. 1), созданной Н.П. Семененко (1990), земная кора, состоящая из окисленных пород, является свое-

образным 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.

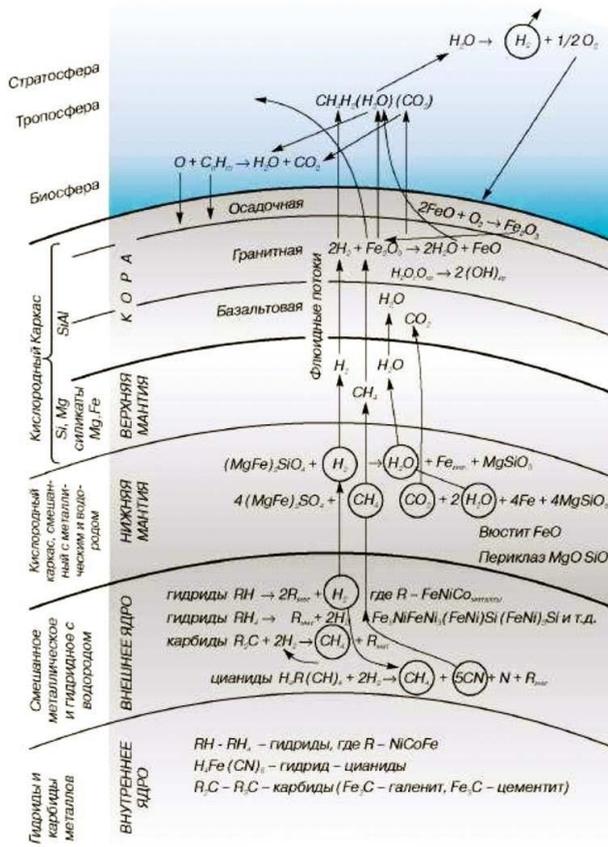


Рисунок 1. Сферы земли и их химический состав (по: Семененко, 1990)

Часть воды, перешедшая в паробразное 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).

**Ещё 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 же при всех вариациях состава гранит всегда остаётся гранитом?**

Почему гранит всегда характеризуется выдержанностью в соотношениях главных компонентов (кварца, плагиоклаза и калиевого полевого шпата), а потому всегда

остаётся гранитом? Ответ на этот вопрос дал знаменитый финский геолог П. Эскола, приложивший к гранитообразованию модель эвтектоидного плавления.

Рассмотрим этот процесс на простейшем примере — смеси минералов кварца и альбита.

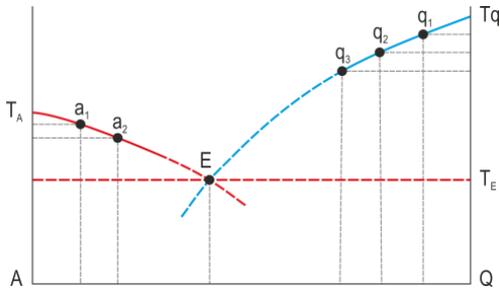


Рисунок 2. Схема построения диаграммы плавления системы с эвтектикой E, состоящей из компонентов А (альбита) и Q (кварца)

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.

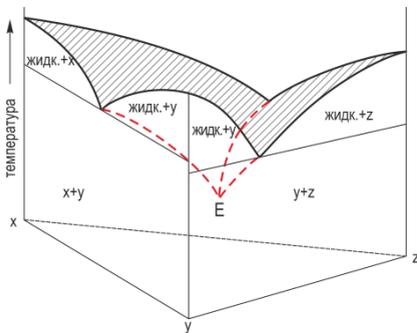


Рисунок 3. Тройная эвтектика

пар и углекислый газ. Эти соединения постоянно выделяются на поверхность через жерла вулканов, через всевозможные наземные и подводные трещины и разломы земной коры. Однако всё это происходит лишь до определённого 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. 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 трёх минералов эвтектика будет состоять из смеси всех этих трёх компонентов в определённой пропорции. Основой 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 (рис. 3). 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 её до температуры

Температура плавления кварца около 1600°C, температура плавления альбита (натрового полевого шпата) на 200°C 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 Tq температуру плавления чистого кварца, а точками q1, q2 и q3, соответственно, температуры плавления и составы смесей кварца с 10-, 20- и 30-процентной

Согласно геохимической модели нашей планеты (см. рис. 1), созданной Н.П. Семеновым (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

плавления такой эвтектики обязательно появится гранитный расплав. Различным будет лишь его количество: в тёмных 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 её в крупные тела, объём которых может измеряться многими сотнями кубических километров. Обычно предлагается механизм фильтр-прессинга — нечто вроде отжимания сыворотки под прессом сквозь сито. Пресс представить в природе несложно, его роль может играть любой блок жёстких пород. Но где взять сито? А без сита невозможно отделить даже макароны от воды: чуть крупнее отверстия, и они «убегут» вместе с жидкостью! Так и взвесь недоплавленных реликтов в новорождённом расплаве (мигма) течёт 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 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 привносится. Ещё 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 эвтектоидный расплав — нарождающаяся гранитная магма. Эта интерстиционная (межзерновая) магма играет роль посредника между гранитизирующими флюидами и гранитизируемой породой. В силикатном расплаве, как и в воде, молекулы растворяемых веществ диссоциируют на ионы, которые мигрируют в нём (в зависимости от градиента концентрации и иных факторов) и вступают в обменные реакции с контактирующей с расплавом твёрдой фазой, гранитизируя её. 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 буфера, способствуя удалению выносимых при гранитизации компонентов и отложению привносимых. Идёт гранитизация, одновременно растёт доля рас-

плава, но по составу он всегда остаётся эвтектическим, то есть гранитным. Это и является пределом метасоматических преобразований. Как только в субстрате формируются за счёт привносимых при гранитизации щелочей и кремнезёма новые полевые шпаты и кварц, они тут же переходят в расплав, причём переходят в тех же эвтектических соотношениях. Включение в эту систему расплава-буфера делает процесс гранитообразования саморегулирующимся: объёмные 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.

Ещё нагляднее будет обогащённость (или обеднённость) 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 определённых 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 всё 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 термодинамические условия. Именно это мы и наблюдаем в становлении Каахемского магматического ареала, где установлено не менее 15 импульсов гранитообразования в течение четырёх этапов геодинамических условий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: Грант № 13-05-00181  
и по Государственному заданию ТувИКОПР СО РАН, научная тема 222020400035-4*

#### ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов А.П. О происхождении вещества земной коры // Геохимия. – 1961. – № 1. – С. 3–29.
- Семененко Н.П. Кислородно-водородная модель Земли / Акад. наук Укр. СССР. Ин-т геохимии и физики минералов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 246 с.
- Сугоракова 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. докт. экон. наук Г.Ф. Балакина. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2015. – С. 166–168.

#### REFERENCES

- Vinogradov A.P. O proiskhozhdenii veshchestva zemnoy kory [The origin of the matter of the Earth's crust]. *Geokhimiya = Geochemistry*, 1961, no. 1, pp. 3–29. (In Russ.)
- Seenenko N.P. *Kislородno-vodorodnaya model' Zemli* [Oxygen-hydrogen model of the Earth] / Academy of Sciences of the Ukrainian USSR. Institute of Geochemistry and Physics of Minerals. Kyiv: Naukova Dumka, 1990, 246 p. (In Russ.)
- Sugorakova A.M. Novyye geokhronologicheskiye i izotopnyye dannyye k voprosu o vozraste assotsiatsiy Kaakhemskogo magmaticheskogo areala (Vostochnaya Tuva) [New geochronological and isotope data on the age associations of the Kaakhemsky magmatic area (Eastern Tuva)]. *Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura = Regional economy: technologies, economics, ecology and infrastructure: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 20<sup>th</sup> anniversary of TuvIENR SB RAS (14–15.10.2015, Kyzyl)* / Ed. by doctor economic sciences G.F. Balakina. Kyzyl: TuvIENR SB RAS Publ., 2015, pp. 166–168. (In Russ.)