

Аномальные тренды распределения петрогенных оксидов в гранитах Приполярного Урала как индикаторы флюидного воздействия

Денисова Ю. В. 

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, yulden777@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты петрохимического изучения гранитов Приполярного Урала (Николайшорский, Малдинский, Кожимский, Бадьяуский и Яротский массивы), принадлежащих к различным генетическим типам Чаппела. На основе анализа изменений содержаний петрогенных оксидов относительно содержания кремнезема выявлены тренды, сопоставленные с эталонными закономерностями рядов Боуэна и принципами Гольдшмидта. Установлено, что для большинства массивов характерны аномальные тренды: снижение щелочности с ростом кремнезема, раннее насыщение расплава калием, увеличение магнетизма биотита в поздних сериях, а также нехарактерные для соответствующих типов гранитов вариации K_2O , Na_2O , MgO и TiO_2 . Выявленные аномалии являются результатом воздействия высокотемпературных флюидов, насыщенных калием, фтором и магнием, которые вызвали калиевый метасоматоз, вынос натрия и титана, а также вторичное изменение состава темноцветных минералов. Полученные данные свидетельствуют о существенной роли флюидного режима при формировании гранитов Приполярного Урала.

Ключевые слова: гранит, фракционная кристаллизация, ряд Боуэна, принципы Гольдшмидта, высокотемпературный флюид, Приполярный Урал.

Anomalous Distribution Patterns of Petrogenic Oxides in the Granites of the Polar Urals: Implications for Fluid-Induced Processes

Denisova Yu. V. 

Institute of Geology of Komi SC Ub Ras, Syktyvkar, yulden777@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of a petrochemical study of granites from the Subolar Urals (Nikolayshor, Maldin, Kozhim, Badyay and Yarot massifs) belonging to different genetic types according to the Chappell classification. Based on an analysis of variations in major oxide contents relative to silica content, trends have been identified and compared with the reference patterns of Bowen's reaction series and Goldschmidt's principles. It has been established that most of the plutons exhibit anomalous trends, including a decrease in alkalinity with increasing silica content, early saturation of the melt with potassium, an increase in biotite magnesian composition in the late series, as well as variations in K_2O , Na_2O , MgO , and TiO_2 that are uncharacteristic of the corresponding granite types. The revealed anomalies result from the influence of high-temperature fluids enriched in potassium, fluorine, and magnesium, which caused potassium metasomatism, sodium and titanium leaching, as well as secondary alteration of the composition of mafic minerals. The obtained data indicate a significant role of the fluid regime in the formation of granites in the Subpolar Urals.

Keywords: granite, fractional crystallization, Bowens reaction series, Goldschmidt's principles, high-temperature fluid, the Subpolar Urals.

Введение

В пределах западного склона Приполярного Урала широко распространены гранитные массивы, различающиеся по возрасту, форме залегания и характеру взаимодействия с вмещающими породами. Это разнообразие закономерно отражает различия в источниках магматического расплава и условиях его формирования. Фундаментальные исследования в изучении гранитоидов севера Урала были заложены трудами Л. В. Махлаева (Махлаев, 1996), который, базируясь на классификации Б. Чаппелла и А. Уайта (Chappel, White, 1974), впервые установил, что широко развитые в регионе раннефанерозойские гранитоиды принадлежат к А и I типам. При этом он также признавал присутствие небольшого количества S-гранитов, что в целом отражает сложную картину гранитообразования в регионе. M-граниты в пределах Центрально-Уральского поднятия не были обнаружены.

Вместе с тем, в работе Л. В. Махлаева отсутствует анализ петрохимических трендов для гранитов Приполярного Урала и их сравнение с трендами, типичными для соответствующего типа гранитов.

В качестве объектов изучения были выбраны граниты каждого имеющегося на исследуемой территории типа. В качестве S-типа были отобраны серо-зеленые среднезернистые раннепротерозойские граниты Николайшорского массива, наблюдаемого в бассейне ручья Николай-Шор. Типичными I-гранитами на севере Приполярного Урала, согласно Л. В. Махлаеву (Махлаев, 1996), являются вендские светло-серые среднезернистые граниты Малдинского массива, расположенного между хребтом Малдынырд и водоразделом рек Лимбеко-Ю и Балбан-Ю. Граниты А-типа в проведенном исследовании представлены породами Кожимского, Бадьяюского и Яротского массивов. В пределах Кожимского массива, обнажающегося на берегах реки Кожим, отобраны позднерифейские розово-серые среднезернистые граниты. Самые молодые – поздневенд-раннекембрийские розово-серые среднезернистые граниты – характерны для Бадьяюского и Яротского массивов: первый пересекает долины рек Малая и Большая Бадьяю, второй – реку Малую Яроту.

Цель представленного исследования – определение петрохимических трендов в гранитах Приполярного Урала, выявление возможных аномалий и установление их причины.

Материалы и методы

Содержания петрогенных оксидов для пород Николайшорского, Кожимского, Бадьяюского и Яротского массивов получены с помощью силикатного анализа (40 анализов) (ЦКП «ГеоНаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, аналитик О. В. Кокшарова), с которым можно ознакомиться в работах автора (Денисова, 2020, 2021, 2023, 2024). Данные петрохимии для гранитов Малдинского массива взяты из работ М. В. Фишмана, Б. А. Голдина (Фишман, Голдин, 1963) и А. А. Соболевой (Соболева, 2004).

S-I-A-M классификация с возможными дополнениями

Согласно первоначальной классификации Б. Чаппелла и А. Уайта, граниты можно разделить по типу исходного субстрата: I-(igneous – магматические) граниты, развивающиеся за счет преобразования апомагматических пород, и S-(sedimentary – осадочные) граниты, сформированные при переплавлении апоосадочных пород. Позже М. Лоизелл и Д. Уонес (Loiselle, Wones, 1979) предложили дополнить исходную классификацию еще одним типом – А-(anhydrous – сухими, alkaline – щелочными, апогенными – анорогенными) гранитами, субстратом для которых, как позже предположил Б. Чаппелл, являлись породы, уже претерпевшие ранее ультраметаморфизм и гранитизацию (Whalen, Currie, Chappell, 1987). А. Уайтом (White, 1979) в геохимическую классификацию были добавлены М-(mantle – мантийные) граниты, главной чертой которых была генерация материнского расплава в мантии при плавлении субдущируемой океанической коры (White, Chappel, 1983). Эту классификацию также предлагалось дополнить такими типами гранитов, как Н-(hybrid – гибридный) гранит (Castro et al., 1991) и С-(charnockite – чарнокитовый) гранит (Kilpatrick, Ellis, 1992). Однако специалистами эти типы не были приняты.

I-граниты образуются в результате плавления коровых пород (амфиболитов, гранулитов, древних гранитоидов) под воздействием высокотемпературных базальтовых магм, насыщенных водой и летучими компонентами, с последующим смешением мантийного и корового расплавов. Вновь образованная гибридная ($Al_2O_3/(CaO+Na_2O + K_2O) < 1,1$) гранитная магма с мантийным изотопным следом ($^{87}Sr/^{86}Sr \sim 0,704-0,709$) продвигается в более высокие структурные уровни земной коры, где медленно остывает, образуя батолит на активной континентальной окраине, в пределах вулканических островных дуг (кордильерский тип I-гранита, с более магниезильным составом) или в постколлизийных орогенных поясах (каледонский тип I-гранита, с более высоким содержанием калия) (Pitcher, 1993). Для этого типа гранита типичными являются тренды фракционной кристаллизации (Bowen, 1922). С увеличением SiO_2 , количество TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , P_2O_5 уменьшается, но K_2O и Rb увеличивается (Торупз et al., 2010).

Формирование S-гранитов связано с процессами, происходящими при коллизии, в результате которых происходит утолщение и погружение континентальной коры в нижнюю кору при резком

увеличении давления (5–15 кбар). Повышение температуры (650–850 °С) происходит за счет радиоактивного распада в утолщенной коре и, возможно, адвекции от нижележащих основных расплавов, что позволяет рассматривать S-граниты как типично коровые образования ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.705\text{--}0.710$). Метаморфизованные осадочные породы (пелиты (глинистые сланцы, филлиты, парагнейсы), метаграувакки) под воздействием воды, содержащейся в глинистых минералах, подвергаются дегидратационному плавлению с образованием первичного гранитного расплава, пересыщенного глиноземом ($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > 1.1$). Этот расплав может кристаллизоваться вблизи источника ассоциируясь с мигматитами (S1 – автохтонные S-граниты), так и передвигаться на значительные расстояния (S2 – аллохтонные S-граниты), образуя граниты дайковой и жильной фации, залегающие в зонах разломов (S2S – стресс-S-граниты), или формируя пластообразные залежи (S2D – дуплекс-S-граниты) (Гусев, 2014; Villaros et al., 2009). Для S-гранитов характерны тренды, которые противоположны трендам гранитов I-типа. По мере увеличения кремнезема в расплаве содержание Al_2O_3 , Na_2O и K_2O снижается. Концентрации CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 и MgO обычно остаются относительно неизменными (Meuser et al., 1994).

A-граниты образуются при плавлении различных глубинных пород, которые были обеднены водой в ходе предшествующего высокотемпературного метаморфизма (гранулитовая фация). Плавление происходит под воздействием высоких температур (более 900–1000 °С) и галогенонасыщенных флюидов от поднимающейся мантии в обстановке растяжения (Гусев, 2013; Clemens, 2012; Finger et al., 2012). Причем граниты этого типа могут формироваться в разных геодинамических обстановках, а не только в анорогенных условиях. Согласно классификации Эби, A1-граниты образуются в условиях внутриплитного магматизма или континентальных рифтов из пород, схожих с базальтами океанических островов, расплавы которых возникают в результате дифференциации мантийных магм. A2-граниты формируются в постколлизийных обстановках в результате переплавления пород континентальной коры (фельзических метавулканитов (гранулитов, чарнокитов), метабазитов (амфиболитов)) (Eby, 1992). Для этого гранита характерны высокая концентрация SiO_2 , низкое содержание CaO , MgO , Al_2O_3 , высокая общая щелочность, сильная железистость пород. Типичными петрохимическими трендами являются тренды фракционной кристаллизации (Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987).

Происхождение M-гранитов напрямую связано с процессами в зонах субдукции. M-граниты часто рассматривают как подтип I-гранитов (Pitcher, 1993). Оба типа имеют магматические протолиты, но разные источники материнских расплавов. M-граниты – это почти чистый продукт дифференциации мантийного расплава, формирующийся на начальной стадии развития океанических островных дуг. I-граниты (зрелых окраин), представляющие собой гибридные мантийно-коровые расплавы, образуются на завершающей стадии становления активных континентальных окраин. Однако, петрохимически M- и I-граниты принадлежат к разным рядам (низкокалиевый тоналит-трондземитовый и известково-щелочной соответственно), поэтому их нельзя считать одним непрерывным эволюционным рядом (Bonin, 2007). Для гранитов этого типа характерны низкие содержания K_2O , TiO_2 , MgO , высокие Na_2O . По мере увеличения кремнезема в расплаве убывают концентрации TiO_2 , FeO , MgO , CaO , Al_2O_3 , P_2O_5 , что соответствует классическому тренду фракционной кристаллизации.

Рассмотрим также типы гранитов, которые не нашли особого применения.

По замыслу А. Кастро, к H-типу следует относить граниты, образованные в результате прямого смешения две (или более) магм разного происхождения, случившегося при внедрении более высокотемпературной и основной (мантийной) магмы в магматическую камеру, уже наполненную более холодной и кислой (коровой) магмой. Если температура будет достаточной, произойдет химическое и физическое смешение с образованием однородной гибридной магмы усредненного состава, если нет – то в кислой светлой породе будут отмечаться вытянутые включения основной темной породы. Такие граниты могут сформироваться в подвижных зонах земной коры, соответственно, они характерны как для коллизийных (столкновение континентов), так и для активных континентальных окраин (зоны субдукции) на поздних этапах развития орогенных поясов. Основные

претензии исследователей к новому типу гранитов, что он включает в себя большинство пород, ранее классифицированных как I-тип, и некоторые породы S-типа и не обладают четкими петрогеохимическими характеристиками.

В случае С-гранита попытались объединить породы разного происхождения без четких критериев. Причем, по мнению Л. Сяо и Дж. Д. Клеменса (Xiao, Clemens, 2007), гранит этого типа может быть как магматического, так и метаморфического происхождения. В первом случае породы образуются при частичном плавлении гранулитов на очень больших глубинах при высоких температурах, в результате чего формируются крупные плутоны, сложенные чарнокитами. Во втором случае происходит преобразование уже существующих гранитов или гнейсов в условиях гранулитовой фации метаморфизма при максимально высоких температурах и давлениях. Для С-гранитов также не выявлено уникальных петрохимических критериев. Высокие содержания K_2O , TiO_2 , типичные для чарнокитов, встречаются и в А-гранитах. Кроме того, для С-типа не определена своя геодинамическая обстановка, в отличие от общепринятых типов гранитов.

Результаты и обсуждение

Изучая петрохимические особенности гранитов Приполярного Урала (Денисова, 2025) (рис. 1) отмечаем, что для пород Николайшорского массива характерны минимальные концентрации содержания TiO_2 , что типично для S-гранитов, т. к. породы, образованы путем переплавления гнейсов няртинского комплекса, обедненных титаном. Но имеется и аномалия: в отдельных точках отбора образцов отмечаются высокие содержания CaO , что больше подходит для I-гранитов, что указывает на сильное влияние постмагматического процесса. Для гранитов Малдинского массива наблюдаются наибольшие содержания TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , что стандартно для I-гранитов. Породы Кожимского, Бадьяюского и Яротского массивов характеризуются наименьшими содержаниями CaO , что является характерной чертой А-гранитов, что связано с плавлением «обезвоженных» гранулитов, обедненных кальцием, и высокогалогенным флюидным режимом, препятствующим сохранению кальция в расплаве. Резкое снижение уровня TiO_2 в породах Кожимского массива указывает на точечное воздействие постмагматического высокотемпературного флюида, который осуществил вынос оксида титана из породы.

При обсуждении результатов будем учитывать, что вариации оксидов с ростом SiO_2 позволяют делать выводы о поведении соответствующих минералов. K_2O характеризует калиевый полевой шпат, Na_2O – плагиоклаз, анортитовая составляющая которого контролируется содержанием CaO . Общая сумма щелочей (K_2O+Na_2O) определяет не только уровень щелочности в породе, но и изменение доли полевых шпатов в минеральном составе породы. FeO , MgO , TiO_2 преимущественно сконцентрированы в биотите, что позволяет говорить об изменении процентного содержания этой слюды в граните, а также степени его магнезиальности, титанистости (Макрыгина, 2011). Ряды Боуэна описывают последовательность кристаллизации минералов из охлаждающегося силикатного расплава, определяя минералы, которые удаляются из магмы на каждом этапе фракционной дифференциации, типичной для I- и А-гранитов. Наглядно это можно выразить следующими трендами: для непрерывного ряда – $SiO_2 \uparrow$: $Na_2O \downarrow$, $CaO \downarrow$, $K_2O \uparrow$ (полевые шпаты), для дискретного ряда – $FeO \downarrow$ (биотит) (Bowen, 1922). Принципы Гольдшмидта, основанные на правилах изоморфизма и геохимической классификации элементов, характеризуют поведение петрогенных оксидов при магматической дифференциации ($SiO_2 \uparrow$: $K_2O+Na_2O \uparrow$, $K_2O \uparrow$, $CaO \downarrow$, $FeO \downarrow$, $MgO \downarrow$, $TiO_2 \downarrow$) (Goldschmidt, 1937).

Анализируя взаимосвязь кремнезема с другими петрогенными оксидами, для изученных гранитов Приполярного Урала были установлены следующие тренды (рис. 1):

- Николайшорский массив (S-тип): $SiO_2 \uparrow$: $K_2O+Na_2O \uparrow$, $K_2O \uparrow$, $Na_2O \downarrow$, $CaO \downarrow$, $MgO \uparrow$, $FeO \downarrow$.
- Малдинский массив (I-тип): $SiO_2 \uparrow$: $K_2O+Na_2O \downarrow$, $K_2O \downarrow$, $FeO \downarrow$.
- Кожимский массив (А-тип): $SiO_2 \uparrow$: K_2O+Na_2O (не меняется), $K_2O \uparrow$, $Na_2O \downarrow$, $TiO_2 \downarrow$.
- Бадьяюский массив (А-тип): $SiO_2 \uparrow$: $K_2O \downarrow$.
- Яротский массив (А-тип): $SiO_2 \uparrow$: $Na_2O \uparrow$.

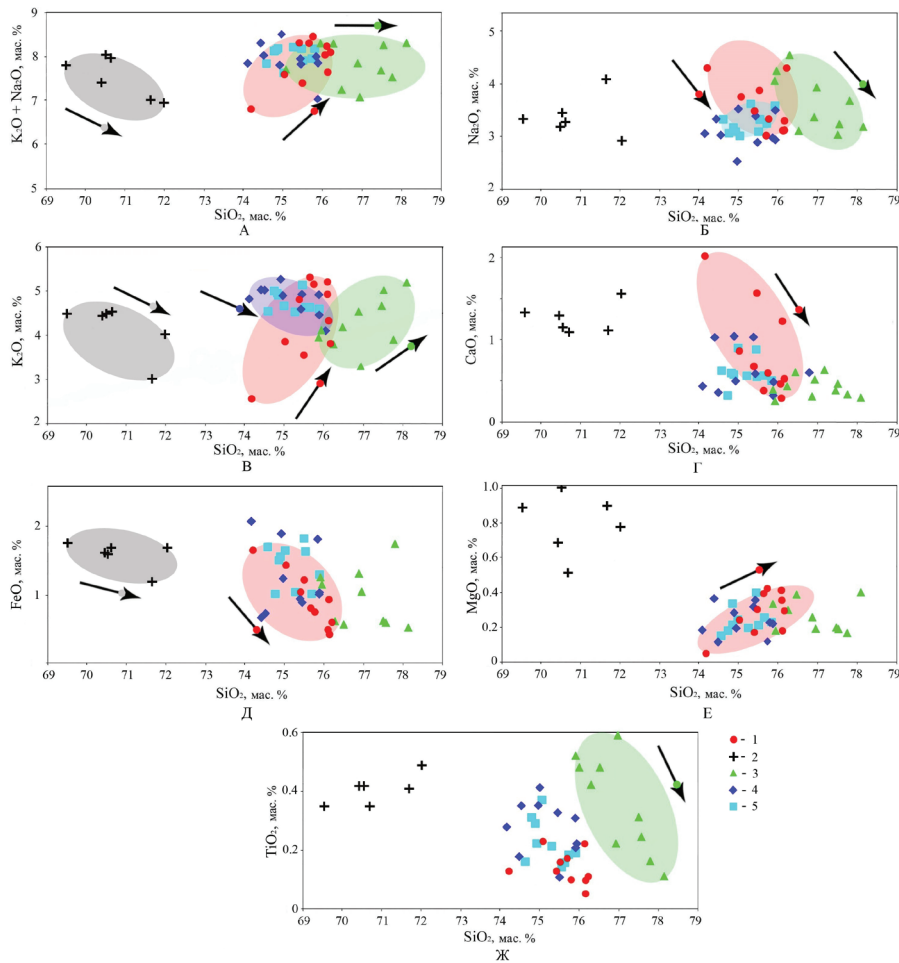


Рис. 1. Тренды главных оксидов для гранитов Приполярного Урала. Массивы: 1 – Николайшорский, 2 – Малдинский, 3 – Кожимский, 4 – Бадьяюский, 5 – Яротский

Fig. 1. Trends of the main oxides for granites of the Subpolar Urals. Massifs: 1 – Nikolaishor, 2 – Maldin, 3 – Kozhim, 4 – Badyayu, 5 – Yarot

Наибольшей упорядоченностью состава характеризуются породы Николайшорского массива. Причем наблюдаемые тренды для этих пород соответствуют трендам фракционной кристаллизации, нетипичным для S-гранитов, образованных в результате частичного плавления метаосадочных пород. Отмечается резкое увеличение содержания K_2O в поздних сериях породы до уровня, более характерного для A-гранитов, что указывает на воздействие высокотемпературного калий-насыщенного флюида, способного сместить состав полевых шпатов вдоль плагиоклазового ряда Боуэна в сторону равновесных соотношений. Наблюдаемое увеличение концентрации MgO в породе при снижении содержания SiO_2 и FeO указывает на более высокую магнезиальность позднего биотита, что нарушает принципы Гольдшмидта, согласно которым магний легче входит в структурную решетку биотита при высоких температурах. Такие высокие концентрации оксида магния в биотите объясняются привнесом этого оксида, что возможно, если массив испытывал воздействие высокотемпературного постмагматического флюида, насыщенного фтором, калием и магнием, который изменил состав темноцветных минералов (Коржинский, 1952).

Щелочность пород, а также общая доля полевых шпатов в минеральном составе гранитов Малдинского массива снижается в поздних сериях, что нарушает принципы Гольдшмидта, согласно которым щелочность должна возрастать с увеличением содержания кремнезема. На основании рис. 1, содержание калиевого полевого шпата в породе уменьшается с ростом кремнекислоты. Для I-гранитов такая закономерность является аномалией, поскольку по ряду Боуэна калиевый полевой шпат завершает непрерывный ряд силикатных минералов. Формирование калиевого поле-

вого шпата на раннем этапе свидетельствует о насыщении материнского расплава оксидом калия, что интерпретируется как результат синмагматического воздействия высокотемпературного флюида.

Образование А-гранитов Кожимского массива происходило по тренду фракционной кристаллизации: с ростом содержания кремнезема увеличивается доля калиевого полевого шпата и снижается количество плагиоклаза. Вместе с тем общее содержание полевых шпатов, а следовательно, и щелочность породы остаются практически неизменными, что противоречит принципам Гольдшмидта. Подобная закономерность может быть следствием неравномерного воздействия высокотемпературных постмагматических флюидов, вызвавших калиевый метасоматоз с выносом натрия.

Согласно Л. В. Махлаеву (Махлаев, 1996), Бадьяуский и Яротский массивы ранее составляли общий плутон, что делает правомерным рассмотрение полученных трендов в совокупности. С увеличением SiO_2 в породах Яротского массива повышается содержание плагиоклаза, а в породах Бадьяуского массива уменьшается доля калиевого полевого шпата, что также указывает на нарушение нормального хода фракционной кристаллизации, нетипичное для А-гранитов. Подобные тенденции отмечались и в породах Малдинского массива, что свидетельствует о том, что породы Бадьяуского и Яротского массивов также испытали воздействие высокотемпературного калий-насыщенного флюида в период их формирования.

Заключение

Проведенное изучение трендов главных оксидов для гранитов Приполярного Урала (Николайшорский, Малдинский, Кожимский, Бадьяуский и Яротский массивы) позволило выявить следующие отклонения от эталонных закономерностей рядов Боуэна и принципов Гольдшмидта. Для пород Николайшорского массива (S-тип) характерным является тренд фракционной кристаллизации, высокая магнезиальность поздних биотитов. В Малдинском массиве (I-тип) щелочность породы и доля калиевого полевого шпата снижаются с ростом кремнезема, калиевый полевой шпат начинает непрерывный ряд калиевых минералов по ряду Боуэна. Подобные тренды отмечаются и в породах Бадьяуского и Яротского массивов (A-тип). Щелочность пород Кожимского массива (A-тип) относительно постоянна по всему массиву, в отдельных точках отбора образцов отмечается резкая потеря титана. Выявленные аномалии указывают на то, что изученные граниты Приполярного Урала подверглись воздействию высокотемпературного флюида, насыщенного F, K, Mg, образовавшегося в период субдукционного цикла (Arevalo et al., 2009). В гранитах Николайшорского и Кожимского массивов это привело к локальному переплавлению пород, тогда как в Малдинском, Бадьяуском и Яротском массивах флюид вызвал синмагматическое обогащение материнского расплава.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» – 122040600012-2.

Литература

1. Гусев А. И. Постколлизийные и анорогенные гранитоиды Алтая: монография / А. И. Гусев; Российская академия естествознания [и др.]. Москва. Изд-во: Академия естествознания. 2013, 141 с.
2. Гусев А. И. S-тип гранитоидов: номенклатура, петрология и рудоносность на основе составов биотитов // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 3. С. 72–76. <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=34114>.
3. Денисова Ю. В. Петрохимия гранитов Яротского массива (Приполярный Урал): новые данные // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2020. № 1. С. 80–87. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2020-1-80-87>.
4. Денисова Ю. В. Петрохимические особенности гранито-гнейсов Николайшорского массива (Приполярный Урал) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2021. № 3. С. 32–40. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-3-32-40>.
5. Денисова Ю. В. Петрогеохимия гранитов Бадьяуского массива (Приполярный Урал) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 45. С. 39–54. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.39>.

6. Денисова Ю. В. Петрология гранитов Кожимского массива (Приполярный Урал) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2024. № 3. С. 108–116. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2024-3-18-26>.
7. Денисова Ю. В. Петрохимические особенности гранитов Приполярного Урала // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. № 22. С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2025.22.010>.
8. Макрыгина В. А. Геохимия отдельных элементов. Новосибирск. Изд-во: Гео, 2011. 195 с.
9. Коржинский Д. С. Гранитизация как магматическое замещение // Известия АН СССР. Серия: Геология. 1952. № 2. С. 56–59.
10. Махлаев Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия. Полярный и Приполярный Урал / Л. В. Махлаев; Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Коми науч. центр, Ин-т геологии. Екатеринбург. Изд-во: УрО РАН, 1996. 148 с.
11. Перчук А. Л., Сафонов О. Г., Сазонова Л. В. и др. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. М. Изд-во: КДУ; Университетская книга, 2015. 472 с.
12. Соболева А. А. Вулканиды и ассоциирующиеся с ними гранитоиды Приполярного Урала. Екатеринбург. Изд-во: УрО РАН, 2004. 145 с.
13. Удоратина О. В., Шуйский А. С., Капитанова В. А. Гранитоиды Кожимского массива (Приполярный Урал): U-Pb, Lu-Hf данные // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2020. № 1. С. 96–105. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-1-96-105.
14. Фишман М. В., Голдин Б. А. Гранитоиды центральной части Приполярного Урала. М.- Л. Изд-во: АН СССР, 1963. 105 с.
15. Arevalo R., McDonough W. F., Luong M. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009. V. 278. P. 361–369.
16. Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects // *Lithos*. 2007. V. 97. P. 1–29.
17. Bowen N. L. The reaction principle in petrogenesis // *The Journal of Geology*. 1922. V. 30 (3). P. 177–198. <https://doi.org/10.1086/622871>.
18. Castro A., Moreno-Ventas I., De la Rosa J. D. H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature // *Earth-Science Reviews*. 1991. V. 31. P. 237–253, [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(91\)90020-G](https://doi.org/10.1016/0012-8252(91)90020-G).
19. Chappel B. W., White A. J. R. Two contrasting granite types // *Pacif. Geol.* 1974. V. 8. P. 173–174.
20. Clemens J. D., Finger F. Formation of high $\delta^{18}\text{O}$ fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, southern China // *Geology*. 2012. V. 40 (10). e277. <https://doi.org/10.1130/G33175C.1>.
21. Collins W. J., Beams S. D., White A. J. R., Chappell B. W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1982. V. 80. P. 189–200.
22. Eby G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // *Geology*. 1992. V. 20 (7). P. 641–644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2).
23. Goldschmidt V. M. The Principles of Distribution of Chemical Elements in Minerals and Rocks // *Journal of the Chemical Society*. 1937. P. 655–673. <https://doi.org/10.1039/jr9370000655>.
24. Kilpatrick J. A., Ellis D. J. C-type magmas: igneous charnockites and their extrusive equivalents // *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 1992. V. 83 (1). P. 155–164. <https://doi.org/10.1017/s0263593300007847>.
25. Loiselle M. C., Wones D. R. Characteristics and origin of anorogenic granites // *Abstracts of papers to be presented at the annual meetings of the Geological Society of America and Associated Societies*. 1979. V. 11. P. 468.
26. Meyer F. M., Robb L. J., Reimold W. U., De Bruijn H. Contrasting low- and high-Ca granites in the Archean Barberton Mountain Land, Southern Africa // *Lithos*. 1994. V. 32. P. 63–76. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0024-4937(94)90021-3).
27. Pitcher W. S. *The Nature and Origin of Granite*. Blackie Academic & Professional. 1993. 321 p.
28. Topuz G., Altherr R., Siebel W. et al. Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey) // *Lithos*. 2010. V. 116. P. 92–110. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.01.003>.
29. Villaros A., Stevens G., Moyen J.-F., Buick I. S. The trace element compositions of S-type granites: evidence for disequilibrium melting and accessory phase entrainment in the source // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2009. V. 158. P. 543–561. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0396-3>.
30. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987. V. 95. P. 407–419.
31. White A. J. R. Source of granite magmas // *Geol. Soc. Am. Abstracts*. 1979. P. 534.
32. Xiao L., Clemens, J. D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints // *Lithos*. 2007. V. 95. P. 399–414.