

ПЕТРОГРАФИЯ И ПЕТРОХИМИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ
И МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ»В. А. Минаев^{1,*} , А. Ю. Озерский^{2,3} , В. В. Полуэктов¹ , В. А. Петров¹  и К. Ю. Мурашов¹ ¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), Москва, Российская Федерация²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), Москва, Российская Федерация³АО «Красноярская горно-геологическая компания», Красноярск, Российская Федерация* **Контакт:** Василий Александрович Минаев, minaev2403@mail.ru

Аннотация: В 2023 году возобновлено геологическое изучение участка «Енисейский» (Красноярский край), на котором планируется создание пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Для обеспечения долговременной безопасности объекта критически важна детальная характеристика вещественного состава пород и, прежде всего, тектонических нарушений как потенциальных путей миграции радионуклидов. Целью работы являлась классификация наиболее значимых элементов строения массива пород участка с точки зрения минерально-деформационных преобразований, а также петрохимическая характеристика древних метаморфитов и пород дайкового комплекса для выяснения их генезиса. Исследования базируются на комплексном анализе керн 10 скважин (глубиной до 150 м), включая петрографическое изучение шлифов, атомно-эмиссионную спектрометрию для определения главных оксидов и редкоземельных элементов, а также статистическую обработку данных. Выделено два типа минерально-деформационных преобразований. I тип (высоко- и среднетемпературный) связан с залеченными зонами прототектоники, которые по свойствам близки к неизменному массиву. II тип (низкотемпературный) сформирован в процессе гидротермально-метасоматических преобразований и характеризует потенциально водопроницаемые палеотектонические нарушения. Построена схематическая геологическая модель, включающая в себя классификацию зон тектонических нарушений на основе анализа этих минерально-деформационных преобразований. Петрохимически установлено, что гнейсы (до 80% разреза) являются парапородами, сформированными по грауваккам и пелитам в обстановке активной континентальной окраины. Долериты (17%) относятся к внутримитным образованиям континентального рифта, а впервые выявленные лампрофиры (3%) – к известково-щелочному типу. Выполненная типизация тектонических нарушений позволяет дифференцировать их по степени гидрогеологической значимости: зоны с преобразованиями I типа признаются условно водонепроницаемыми, тогда как зоны дробления с преобразованиями II типа требуют детального гидрогеологического мониторинга как потенциальные пути миграции. Полученные петрохимические данные о генезисе пород являются основой для построения геологических и геомеханических моделей при обосновании безопасности ПГЗРО.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов, подземная исследовательская лаборатория, петрография, петрохимия.

Цитирование: Минаев В. А., Озерский А. Ю., Полуэктов В. В., Петров В. А. и Мурашов К. Ю. Петрография и петрохимия метаморфических и магматических пород участка «Енисейский» // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES1011. — DOI: 10.2205/2026es001063 — EDN: NKDVRO

<https://elibrary.ru/NKDVRO>

Получено: 24 марта 2025 г.

Принято: 10 сентября 2025 г.

Опубликовано: 31 марта 2026 г.



© 2026. Коллектив авторов.

Введение

В 2011 году вступил в силу Федеральный закон Российской Федерации №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», согласно которому «радиоактивные

отходы... подлежат обязательному захоронению в пунктах захоронения радиоактивных отходов». Принятие этого закона обеспечило законодательную базу для геологического изучения «Енисейского» участка, расположенного в пределах закрытого административно-территориального образования г. Железногорска, примерно в 50 км северо-восточнее Красноярска. Этот участок был выявлен в результате многолетних геологических исследований, проводившихся начиная с 1992 года в районе Нижнеканского гранитоидного массива (НКМ). Однако, сам участок не принадлежит к геологической структуре НКМ, а относится к его складчатому архейскому обрамлению, но в источниках и служебных документах Госкорпорации «Росатом» продолжает использоваться определение «участок „Енисейский“ Нижнеканского массива», как сложившееся привычное наименование [Лобанов и др., 2015; Озерский и Полякова, 2021].

Последние глубокие скважины, вскрывшие целевой интервал захоронения радиоактивных отходов (РАО), были пробурены АО «Красноярская горно-геологическая компания» в 2014 году. В 2016 году, рассмотрев результаты работ, Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) подтвердила «... что по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок „Енисейский“ является потенциально пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в объёме до 160 тыс. м³ в архейских гнейсах Нижнеканского массива в целевом интервале глубин 450–525 метров...» (Протокол №4523-пс от 03.02.2016 г. ГКЗ). Участок был признан пригодным для геологической разведки и опытной эксплуатации. Вместе с тем, экспертная комиссия ГКЗ сделала ряд рекомендаций, наиболее существенной из которых можно считать выполнение геологической разведки участка «Енисейский» [Озерский и Полякова, 2021; Ozerskiy and Ozerskiy, 2022]. В настоящее время на участке ведётся строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), которая предназначена для разработки технологии окончательной изоляции РАО в недрах.

В 2023 году, после почти десятилетнего перерыва было возобновлено геологическое изучение недр «Енисейского» участка, целью которого является выполнение стадии геологической разведки и государственная экспертиза геологических данных по оценке пригодности участка для изоляции РАО.

На поисковой и оценочной стадиях геологического изучения недр участка «Енисейский» основное внимание уделялось глубинной части породного массива. В 2023 году геологическая разведка была начата с изучения его верхней части до глубины 150 м, где располагается зона приповерхностной региональной трещиноватости, которая на начальных стадиях работ была изучена преимущественно геофизическими методами, практически без изучения вещественного состава коренных пород. Изучение приповерхностной зоны массива горных пород участка «Енисейский» призвано решить целый ряд задач, связанных с обеспечением долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Кроме решения задачи уточнения геолого-структурного строения участка, большое значение имеют вопросы геомеханической прочности верхней части массива, роли разрывных нарушений в организации потоков подземных вод и в питании ими глубинных частей массива, а также проблемы массопереноса природных и техногенных веществ.

В настоящей статье рассматриваются результаты авторских геолого-структурных, петрографических и петрохимических исследований, позволившие впервые классифицировать с точки зрения минерально-деформационных преобразований наиболее значимые элементы строения массива пород участка, важные в контексте безопасности ПГЗРО. На основании петрохимической характеристики древних метаморфитов и пород дайкового комплекса сделаны выводы об их генезисе. На основании полученной информации авторами построена геологическая модель участка «Енисейский».

Материалы и методы

Объект исследования. Участок «Енисейский» в геологической структуре Енисейского кряжа

Участок «Енисейский» был выявлен в результате обширного комплекса геолого-геофизических работ, проводившихся в 1992–2002 гг. под методическим руководством НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» в южной части Енисейского кряжа. Этот фрагмент кряжа, расположенный к югу от р. Ангары, получил название Ангаро-Канский блок (выступ или террейн). Блок представляет собой архейско-палеопротерозойский кратонный элемент, образованный метаморфическими гранулитогнейсовым и гнейсово-сланцевым комплексами и гранитоидами Нижнеканского массива (рис. 1).

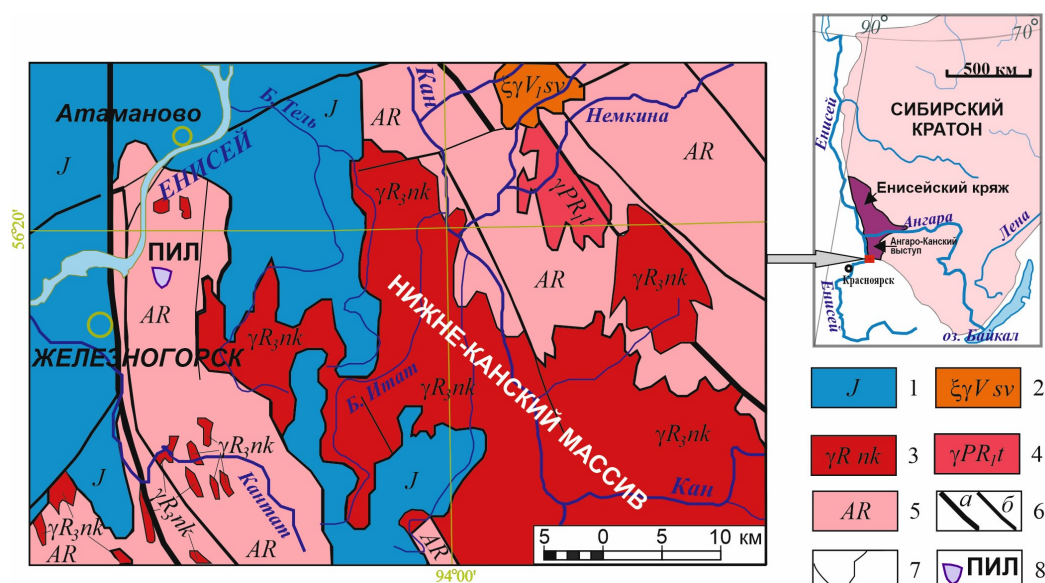


Рис. 1. Схематическая обзорная геологическая карта района создания подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский», по материалам [Государственная геологическая карта. . ., 2009]. Условные обозначения. Комплексы осадочных, метаморфических и магматических пород: 1 – юрская осадочная угленосная формация (песчаники, алевролиты, аргиллиты, бурый уголь); 2 – средневороговский магматический комплекс (щелочные сиениты, граносиениты, щелочные граниты); 3 – нижнеканский магматический комплекс (граниты, гранодиориты, плагиограниты, диориты); 4 – таракский магматический комплекс (граниты, гнейсограниты); 5 – енисейский и канский метаморфические комплексы (гнейсы биотитовые, гранат-биотитовые, плагиогнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты). Прочие обозначения. 6 – дизъюнктивные нарушения (а – главные, б – прочие). 7 – границы комплексов пород, 8 – площадка строительства ПИЛ.

На начальных этапах исследований наиболее перспективным для захоронения отвержденных РАО считался огромный батолит Нижнеканского массива, однако, впоследствии поиски участка перешли на геологические структуры его складчатого обрамления. В итоге из пяти исследованных участков в качестве наиболее перспективного был выбран участок «Енисейский», относящийся к складчатому обрамлению НКМ.

Метаморфические породы, которыми сложен участок «Енисейский», формируют выступы кристаллического основания Сибирского кратона, представленные в основном ранне- и позднеархейскими гранулитогнейсовыми и гранит-зеленокаменными комплексами умеренных и повышенных давлений, нередко подверженными регрессивному метаморфизму с развитием мигматитов и ассоциаций амфиболитовой фации. Интенсивно дислоцированные архейские и протерозойские породы залегают в виде коллажа отдельных блоков с тектоническими контактами между ними. При этом стратиграфическая последовательность в докембрийских образованиях не всегда прослеживается

и является предметом дискуссий. Именно поэтому на обзорной карте архейские образования показаны обобщенно. Тектонические блоки разнообразных размеров разделены разнопорядковыми разломами преимущественно северо-западного простирания с суб-вертикальным падением (см. рис. 1).

Для архейских пород региона характерна мелкая интенсивная складчатость, плейчатость, гофрировка, скрывающие их первичные текстурные признаки. Высокая степень метаморфизма, многократная и интенсивная тектоническая проработка практически полностью уничтожили прямые признаки происхождения исходных пород, сделали невозможным установление последовательности напластований в разрезе, определение его истинной мощности и состава. Исходя из этого, породы архея могут быть отнесены к нестратифицируемым образованиям и охарактеризованы на петрографо-формационной основе [Государственная геологическая карта. . ., 2009].

Датировка возрастов произведена по цирконам и рассчитана по соотношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Цирконы выделены из пород керна скважины Р-2, пробуренной на «Енисейском» участке и вскрывшей кордиерит-силлиманитовые гнейсы атамановской метаморфической серии (метасерии). Обоснование палео-, мезо-AR, раннепалео-PR и ранне-PR возрастов (3221 ± 15 – 1832 ± 17 млн лет) пород участка «Енисейский» выполнено А. М. Сазоновым с соавторами [Сазонов и др., 2017].

В пределах участка «Енисейского» гнейсы и кристаллические сланцы атамановской метасерии канского метаморфического комплекса слагают типичный для пород такого возраста вытянутый гранито-гнейсовый купол с пологими крыльями. Ось купола, судя по геофизическим материалам полого погружается под углом от 5 до 20° на северо-запад. По поводу мощности атамановской метасерии у исследователей нет единой точки зрения: по оценкам одних авторов она варьируется от 2200 и до 2700 м, другие увеличивают её до 4000 м [Государственная геологическая карта. . ., 2009]. По материалам сейсмической разведки Методом Общей Глубинной Точки, 3D сейсморазведка (ОГТ 3D) подошва пород атамановской серии залегает под участком на глубинах 1800–2000 м с пологим погружением к северу. Глубже предположительно залегают гнейсы кузеевской серии канского метаморфического комплекса раннего архея. Сейсмические работы показали монолитную структуру участка на глубине захоронения РАО.

В геологическом строении участка «Енисейский» принимают участие мигматизированные гнейсы и кристаллические сланцы, прорванные комплексом секущих даек основного состава. Коренные породы тектонически нарушены. Вещественный состав пород участка и разрывные нарушения подробно рассматриваются ниже.

Методы исследований

Буровые работы на участке были выполнены Ивановской геологоразведочной экспедицией – филиалом АО «Красноярскгеология». В 2023 году были пробурены 10 скважин глубиной по 150 м. Из керна скважин было отобрано 62 пробы коренных пород, которые распределяются по петрографическим типам, определенным геологами в поле. Метаморфические породы представлены гнейсами и кристаллическими сланцами атамановской метасерии раннего архея (AR_{1at}) (39 проб) – преобладающими породами скального массива участка «Енисейского». Ниже, породы для краткости именуется гнейсами различного состава и дан классификационный комментарий к терминологии, которые используют авторы. Магматические гипабиссальные образования (17 проб) представлены преимущественно породами основного состава, образующими дайковый комплекс рифейского возраста, пронизывающий гнейсы. Породы представлены изменёнными долеритами, метадолеритами (габбро-долеритами), долеритовыми порфиритами, которые ниже кратко именуется долеритами. Для изученного участка охарактеризованы и довольно редкие жильные лампрофиры основного состава.

Кроме названных преобладающих типов пород в геологическом разрезе участка выявлены жильные образования: пегматоиды, аплиты и редкие разновидности метасоматитов, имеющие встречаемость менее 1% и охарактеризованные единичными петрохимическими пробами. В статье они не рассматриваются. Наряду с этим при

характеристике минерально-деформационных изменений, учтён весь комплекс высоко-, средне- и низкотемпературных метасоматических и метаморфических преобразований. Далее описание пород выполнено в соответствии с приведёнными петрографическими типами.

Оптическая диагностика минералов проводилась в шлифах на микроскопах SZX D7, OLYMPUS BX-51 (Япония) с фотокамерой OLYMPUS CAMEDIA C-7070 widezoom, с использованием программы анализа изображений ImageScope-M.

Главные оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$, FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , а также редкоземельные элементы изученных пород были определены методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Специфические компоненты F , $\text{S}_{\text{общ}}$, P_2O_5 , CO_2 , потери при прокаливании (ППП) были проанализированы различными видами химических анализов. Все анализы выполнены Аналитическим сертификационным испытательным центром Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского.

Статистическая обработка результатов лабораторных анализов выполнена с помощью программной системы STATISTICA, компании StatSoft Inc.

При петрохимической характеристике пород использованы положения «Петрографического кодекса. . .» [Петрографический кодекс России. . ., 2008] и дополняющих его публикаций [Ефремова и Стафеев, 1985; Иванов и др., 2022; Шарпенюк и др., 2013; Le Maitre et al., 2002]. Диагностика наименований (видов и семейств) магматических и метаморфических пород выполнена на основе использования классификационной TAS-диаграммы (total alkali-silica), где в координатах значений SiO_2 (по горизонтали) и $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (по вертикали) условно показаны соответствующие поля с наименованием видов пород (семейств). В пределах установленных градаций содержаний кремнезёма и щелочей имеет место устойчивая корреляция с определёнными соотношениями главных породообразующих минералов и, соответственно, с видами пород. Виды плутонических пород на TAS-диаграмме показаны в версии ВСЕГЕИ [Ефремова и Стафеев, 1985]. Типы щёлочности пород определены по отношению $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$.

В дополнение к показателям кодекса был рассчитан коэффициент глинозёмистости $al' = \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$. Этот коэффициент хорошо коррелирует с относительным количеством цветных и лейкократовых минералов в горных породах. Горные породы с $0,75 < al' < 1,0$ относятся к умеренно глинозёмистым, меньше 0,75 – к низкоглинозёмистым, 1–2 к высокоглинозёмистым, 2–10 – к весьма высокоглинозёмистым и более 10 – к крайне высокоглинозёмистым [Петрографический кодекс России. . ., 2008].

Для выявления генезиса метаморфических пород авторами был использован ряд методов, заключающихся в построении диаграмм по компонентам химического состава в различных комбинациях. Ведущим выбран метод А. А. Предовского [Предовский, 1980], который применили К. А. Заблоцкий и В. Р. Сопрончук для раннедокембрийских метаморфических пород юга Енисейского кряжа [Заблоцкий и Сопрончук, 1989]. По результатам применения этого метода авторы сделали вывод о том, что раннеархейские «высокоглинозёмистые породы образовались за счёт глинистых и полимиктовых осадков» [Заблоцкий и Сопрончук, 1989, с. 105], т.е. протолит гнейсов атамановской метасерии имеет осадочное происхождение.

Метод А. А. Предовского основан на допущении полного изохимизма процессов метаморфизма. Главные петрохимические параметры диаграммы ФАК Предовского:

$$F = \frac{\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2};$$

$$A = \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}), \quad \text{где } \text{CaO}^* = \text{CaO} - \text{CO}_2;$$

$$K = \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}.$$

Эти параметры были выбраны А. А. Предовским на основании наиболее закономерного изменения химизма пород в условиях выветривания, осадконакопления и магматической деятельности. Все расчёты параметров «производятся в формульных

(молекулярных) количествах», которые были рассчитаны из процентов аналитических результатов по коэффициентам, приведённым в справочнике *Ефремова и Стафеев [1985]*.

Диаграмма А. А. Предовского имеет главное поле FA и вспомогательное FK. Вспомогательное поле обладает слабой разрешающей способностью в силу значительного перекрытия участков пород различного состава и генезиса. Поэтому поле диаграммы FK показано авторами не в «классическом» виде, а в специальном виде, разработанным А. А. Предовским для распознавания метапелитов и приведённым в его монографии [рис. 5 в *Предовский, 1980*, с. 40].

Результаты и обсуждение

Минеральные и деформационные преобразования пород

Геологическое строение участка «Енисейский» многократно описано различными авторами [*Андерсон и др., 2011; Кочкин и др., 2017; Морозов и др., 2019; Сазонов и др., 2017*] и породы участка петрографически охарактеризованы довольно хорошо. Поэтому, в соответствующей главе, дана их детальная петрохимическая характеристика. В то же время, вещественная изученность зон тектонических нарушений явно недостаточна. В связи с этим, охарактеризован весь спектр минерально-деформационных преобразований древних метаморфитов – от постмагматического раннего высокотемпературного кремнещелочного метасоматоза, приконтактового ороговикования, среднетемпературных грейзеноподобных изменений до поздних низкотемпературных гидротермально-метасоматических преобразований (гидрослюдизация, аргиллизация и др.).

Тектонические нарушения относятся к числу наиболее значимых элементов геологического строения с точки зрения безопасности ПГЗРО, в первую очередь как потенциальные пути миграции радионуклидов, а также как геомеханически ослабленные зоны. В связи с этим результаты петрографического изучения пород участка «Енисейский» приводятся в контексте исследований особенностей каркаса разрывных нарушений.

По мнению авторов статьи, внутри блока размещения ПГЗРО развиты тектонические разрывные нарушения высоких порядков (относительно мелкие). Они имеют разную природу, минеральное выполнение, и, вероятно, проницаемость. Однако исследования по изучению проницаемости конкретных тектонических нарушений не проводились. Обобщённая геологическая структура участка «Енисейский» представлена в виде схемы (рис. 2), построенной по итогам интерпретации всех имеющихся геолого-геофизических данных, часть из которых получена непосредственно авторами настоящей статьи. При этом первичной основой для построения схемы являлись результаты проходки глубоких скважин (около 700 м), пробуренных на участке и в пределах его ближайшего обрамления в период до 2015 г. Скважины текущего этапа геолого-разведочных работ использованы лишь для локального уточнения строения в верхних частях модели участка «Енисейский» в связи с их малой глубиной.

Уникальной особенностью схематической геологической карты (см. рис. 2) является классификация зон тектонических нарушений на основе анализа минерально-деформационных преобразований. Различаются древние зоны брекчирования и тектонические нарушения, представленные зонами дробления.

В ходе многолетних исследований пород участка «Енисейский» авторами выделены деформационные преобразования двух типов [*Петров и др., 2015*]: I – первого типа, связанных с элементами прототектоники, катаклаза и бластеза, сформированные в условиях высоких и средних температур (бластокатаклазиты-I и бластомилониты-I); II – второго типа, сформированных в процессе околотрепчинных низкотемпературных гидротермально-метасоматических преобразований (катаклазиты-II, бластокатаклазиты-II, бластомилониты-II и милониты-II). Данные деформационные преобразования различаются по масштабу, времени формирования и интенсивности проявления и сопровождаются соответствующими минеральными ассоциациями и парагенезисами. Соответственно, древние зоны брекчирования на рис. 2 представлены преимущественно

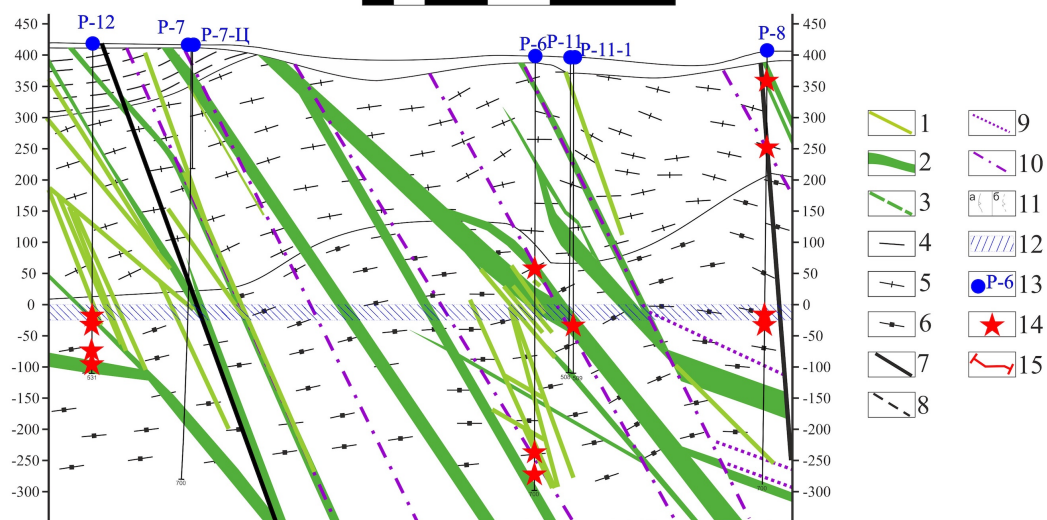
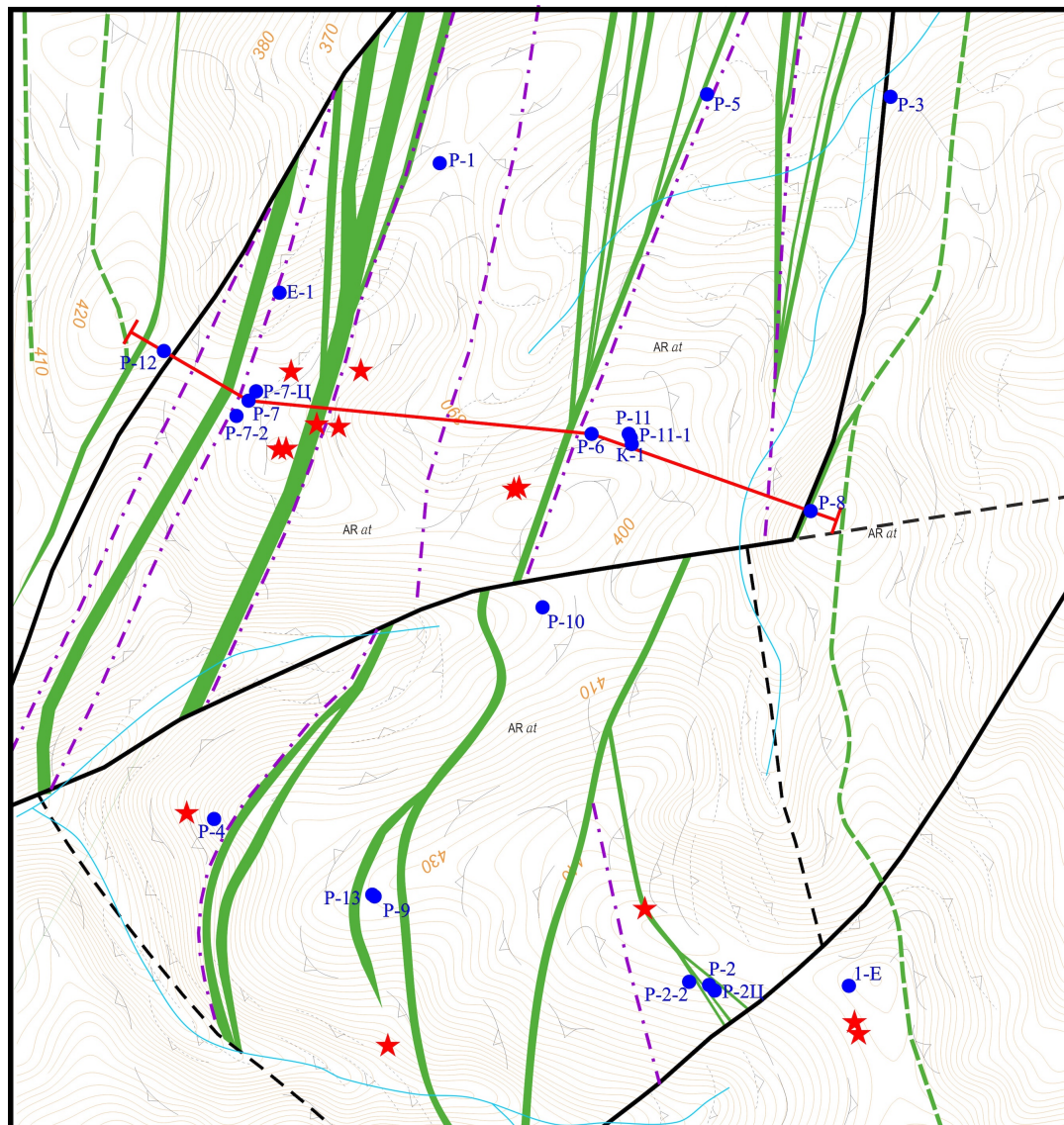


Рис. 2. Схематическая геологическая карта участка «Енисейский» и разрез по линии скважин Р-12–Р-8 (авторы В. А. Минаев, В. В. Полуэктов, В. А. Петров, К. Ю. Мурашов, ИГЕМ РАН). Условные обозначения: 1 – внесматштабные дайки габбро-диабазов и диабазовых порфиритов; 2 – дайки метадолеритов и габбро-диабазов; 3 – предполагаемые по геофизическим данным дайки метадолеритов и габбро-диабазов; 4 – биотитовые и двуслюдяные гнейсы и сланцы с редкими прослоями силлиманит-кордиеритсодержащих сланцев; 5 – биотитовые плагиогнейсы с редкими прослоями гранат-биотитовых гнейсов и силлиманит-кордиеритовых сланцев; 6 – биотит-кордиеритовые гнейсы и кристаллические сланцы с прослоями биотитовых и биотит-гиперстеновых гнейсов; 7 – тектонические нарушения, представленные зонами дробления; 8 – предполагаемые по геофизическим данным тектонические нарушения; 9 – древние зоны брекчирования ранние; 10 – древние зоны брекчирования поздние; 11 – раннедокембрийские мигматизированные метаморфические образования атамановской архея с предполагаемыми элементами гнейсовидной полосчатости пород (только на карте): а – биотитовые и двуслюдяные гнейсы с редкими прослоями кордиерит- и силлиманит содержащих гнейсов, б – биотитовые плагиогнейсы с редкими прослоями кордиеритсодержащих биотитовых и кордиеритовых гнейсов и кристаллических сланцев, реже гиперстен-гранатовых и гиперстен- кордиеритовых гнейсов; 12 – целевой горизонт размещения ПИЛ; 13 – глубокие скважины и их номера; 14 – точки отбора образцов для детального лабораторного изучения; 15 – линия геологического разреза.

преобразования типа I, а тектонические нарушения, представленные зонами дробления, отмечены преобразованиями типа II (или их совмещением).

Высоко- и среднетемпературные постмагматические и динамометаморфические преобразования I типа характеризуются наличием кварца, K-Na полевых шпатов, пироксена (орто/клинопироксена), оливина, эпидот-цоизитового минерального агрегата, кордиерита, силлиманита, биотита, мусковита, амфибола, граната, талька и др.

К типу II отнесены серицит, группа глинистых минералов (гидрослюда (иллит), смешаннослойный иллит-сметтит, каолинит, монтмориллонит и др.), карбонаты, Fe-Ti лейкоксеноподобный агрегат, сульфиды и др. Определяющий отличительный признак этого типа – разрушение-распад высокотемпературных алюмосиликатов, с образованием низкотемпературных минеральных ассоциаций (карбонаты, сульфаты, сульфиды, силикаты и др.). Кварц и полевые шпаты в этих типах преобразований, входят в различные группы температурных минеральных парагенезисов I и II типа. Ряд минералов переменного состава и различного генезиса могут быть отнесены к обоим типам деформационных преобразований – это хлориты (Mg-Fe хлорит, низкотемпературный хлорит-сметтит), гематит и магнетит. В выделенных типах преобразований по-разному проявлены катаклазиты/милониты и их бласто-разновидности (бластомилониты и бластокатаклазиты). Их установление является крайне важными при обеспечении долговременной безопасности ПГЗРО. Дело в том, что одним из наиболее определяющих аспектов оценки безопасности считается прогноз вероятной миграции радионуклидов по водопроницаемым зонам. Данный прогноз, учитывая монолитный характер древней метаморфической толщи кристаллических пород, связывается с тектоническими разрывными нарушениями. Древние высоко-, средне-температурные постмагматические залеченные зоны, с элементами прототектоники, для которых характерны преобразования I типа, практически не отличаются от пород ненарушенного кристаллического массива. В то же время палеотектонические нарушения, которым присущи преобразования II типа, представляют потенциально водопроницаемые зоны.

Важным является и учёт того факта, что в интервале развития одного вида разрывных нарушений (ранние/поздние зоны брекчирования) зачастую встречаются наложения обоих типов деформационных преобразований, свидетельствующие о проявлении процесса подновления данного разрывного нарушения.

Деформации I и II типа соотнесены авторами с минеральными преобразованиями и преобладающими типами деформационных обстановок – упруго-пластичным и упруго-хрупким, соответственно. Как уже было отмечено, спектр минеральных преобразований

очень широкий – от раннего постмагматического высокотемпературного кремнещелочного метасоматоза, приконтактового ороговикования, средне-температурных грейзеноподобных изменений поздних низкотемпературных гидротермально-метасоматических преобразований (гидрослюдизация, аргиллизация и др.) и кор выветривания. Весь этот комплекс минерально-деформационных преобразований в корне меняет свойства исходных пород и, к сожалению, зачастую практически не учитывается при изучении древне-метаморфизованной толщи AR-PR пород. И, наконец, минерально-деформационные преобразования являются определяющими при обосновании геолого-тектонических условий размещения ПГЗРО.

Минерально-деформационные преобразования главных разновидностей пород и их микроскопический анализ на основании изучения десяти наклонных скважин участка «Енисейский» представлены ниже. Были выделены и детально охарактеризованы следующие основные группы пород: а – плагиогнейсы, гнейсы, гранито-гнейсы; группа, гипабиссальных, субвулканических (дайковых) и жильных образований, малых интрузивных тел; б – долериты/метадолериты (диабазы, габбро-диабазы); в – различные лампрофиры, аплиты и пегматоиды.

Особенности минеральных и деформационных последовательных преобразований биотит-кордиерит-силлиманитовых и биотитовых гнейсов/плагиогнейсов представлены на [рис. 3](#) (микрофото 1–6). Показаны относительно «свежие» не измененные разновидности с биотитом, без каких-либо признаков метасоматических изменений и микродеформаций (микрофото 1). Отмечено преимущественное развитие преобразований I типа (биотит, мусковит, кварц, эпидот), с линзовидно-, волокнисто-полосчатым распределением чешуек биотита, замещенных мусковитом. В сростании с биотитом кордиерит образует полосы и начинает интенсивно замещаться пинитом, силлиманит-фибролитовым агрегатом и хлоритом (микрофото 2).

Интенсивно развиты рассланцевание и милонитизация (микрофото 5, 6) с совмещением деформаций I и II типов. Их формированию предшествуют узкие швы микробрекчирования и катаклаза (микрофото 3, 4). Агрегаты чешуек биотита, пластинчатого кордиерита, интенсивно замещены зеленоватым пинитом, силлиманит-фибролитом, столбчато-игольчатым силлиманитом, хлоритом и мусковитом. Скопления мусковита обладают решетчато-лучистым строением (микрофото 3).

Удлиненные зерна кордиерита (реликты), замещенные пинитом (хлорит+серицит), а также мусковит и хлоритизированный биотит, ориентируются вдоль первичной гнейсовидности (микрофото 5). Волокнистые текстуры формируются за счет фибролитовой разновидности силлиманита, в сочетании с низкотемпературной хлоритизацией, развитием эпидот-цоизита и глинистых минералов (иллит-сметит, каолинит). Интенсивно развиты рассланцевание, милонитизация, зоны бластомилонитов и бластокатаклазитов, с диагональными (секущими) смещениями вдоль микрощвов и зон микрорассланцевания. Здесь фиксируется совмещение деформаций I и II типов. Текстура породы массивная, гнейсовидная, мигматитовая, очковополосчатая. Структура grano- и лепидо-, немато-гранобластовая, метасоматическая, катаклазитовая и милонитовая/бластомилонитовая.

На [рис. 4](#) изображены интенсивно измененные долериты и метадолериты (диабазы), с отчётливыми типичными офитовыми, пойкило-офитовыми структурами (микрофото 1–2), но без признаков деформационных преобразований.

В статье авторы используют также термины габбро-диабаз, диабазовый порфирит, учитывая их промежуточное положение между интрузивными габбро, габбро-диоритами и субвулканическими долеритами. На данном этапе изученности территории мало данных для более детального описания этих разновидностей пород. В основном авторами используется термин долерит/долеритовый порфирит, учитывая, что диабаз (метадолерит) – это палеотипный, изменённый аналог долерита.

Важно отметить, что в пределах исследуемого участка практически не встречаются «свежие» долериты. Поэтому кратко остановимся на минерально-текстурных особенностях, характерных для данного вида даек участка «Енисейский». Порода состоит из

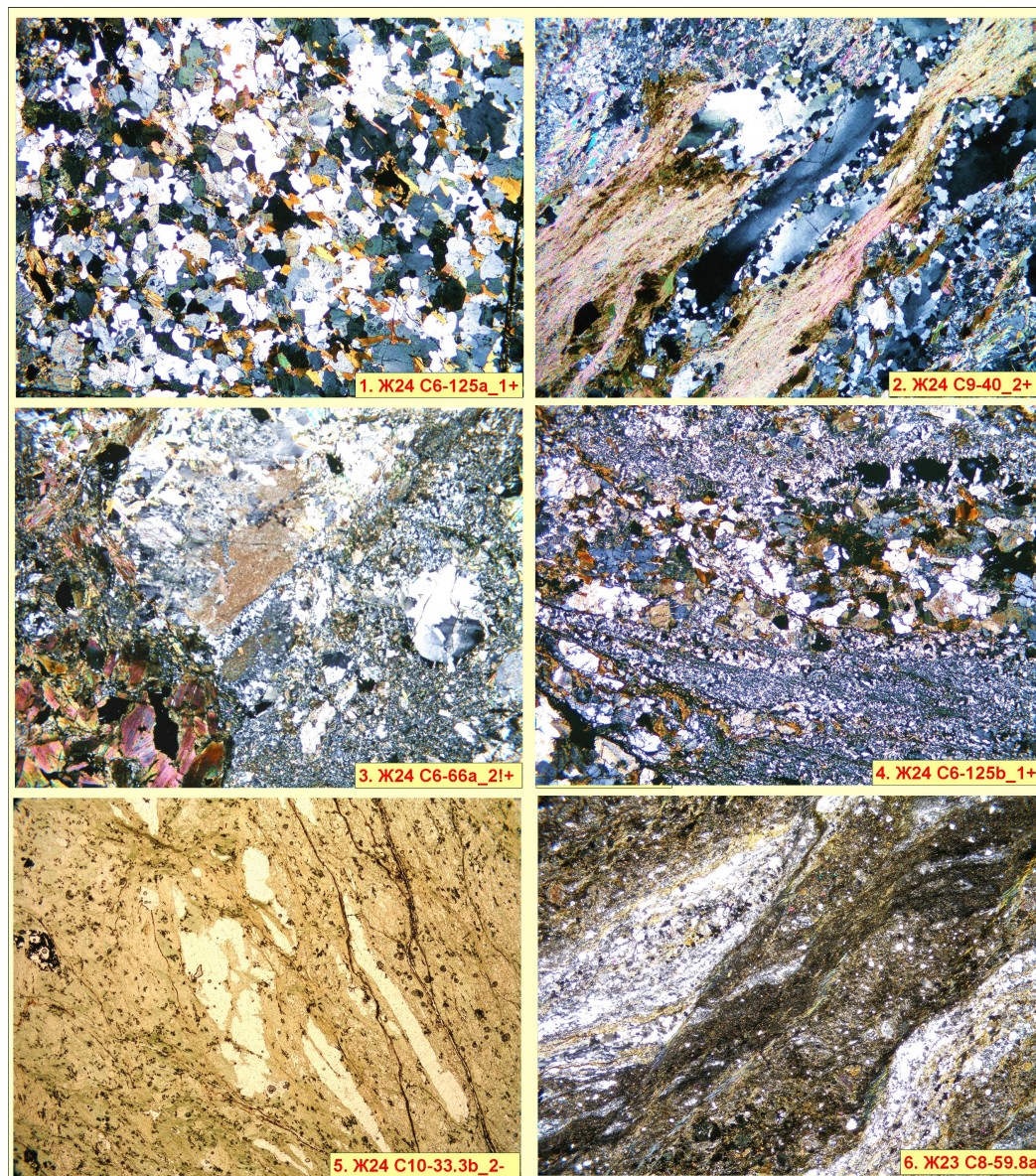


Рис. 3. Микрофотографии шлифов. Стадии (показано стрелками, микрофото 1→2→3→4→5, 6) последовательных нарастающих минерально-деформационных преобразований биотитовых, биотит-кордиерит-силлиманитовых плагиогнейсов, гнейсов. Относительно «свежие» биотит-кордиерит-силлиманитовые плагиогнейсы (1, 2), развитие зон микробрекчирования, катаклаза (3, 4). Интенсивно проявлены расщепление и милонитизация (5, 6), с совмещением деформаций I (2) и II (3–6) типов. Здесь и далее красным текстом указан порядковый номер микрофотографии, номер скважины и глубина отбора образца (шлифа). Никели скрещены, полускрещены (+ 1, 2, 3, 4, 6) и параллельны (= 5); длинная сторона фото – L, мм: 8,5 (1–6).

сдвойникованных удлинённых лейст основного, слабо зонального и интенсивно альбитизированного и карбонатизированного плагиоклаза. В отдельных участках внутри различно ориентированных призм моноклинного пироксена и между ними развиты мелкие лейсты плагиоклаза, идиоморфные по отношению к пироксену характеризующиеся беспорядочным расположением (диабазовая, офитовая структура).

Как было сказано выше, породы интенсивно изменены и обладают прожилково-сетчатыми текстурами, в связи с чем элементы классической долеритовой структуры зачастую размыты. Тем не менее, её элементы просматриваются. В каждом угловатом участке помещается несколько зёрен пироксена. Они наблюдаются как элементы

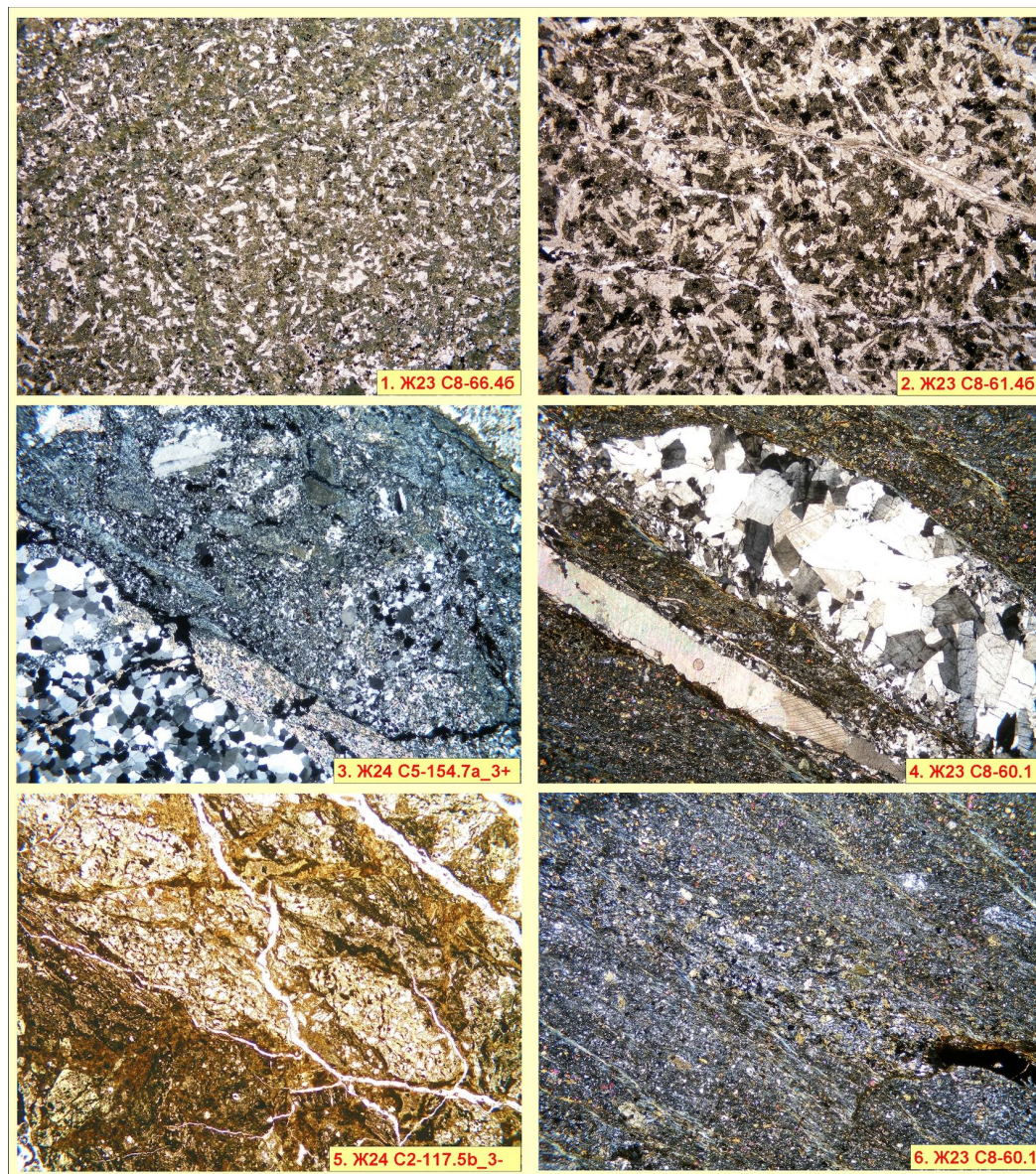


Рис. 4. Микрофотографии шлифов; схематическая последовательность нарастания интенсивности минеральных и деформационных преобразований: 1, 2→3, 4→5, 6 (микрофото). Долериты/метадолериты с интенсивными преобразованиями II типа (метаморфизм, метасоматоз), но без признаков деформационных преобразований (1–2). Отмечается начальная стадия формирования сетчатого микропрожилкования (2). Формируются также зоны интенсивного катаклаза, микробрекчирования и милонитизации (3–6), с совмещением минерально-деформационных преобразований I и II типа. Здесь, в непосредственной близости от сорванных контактов даек метадолеритов с плаггионейсами (3, 5), образуются послойные кварц-карбонатные прожилки (4), зоны катаклаза/микробрекчирования, прожилкования (4, 5) хлорит-карбонатного, кварц-карбонатного состава, а также формируются зоны милонитов/бластомилонитов (6), с послойным микропрожилкованием. Зафиксирован контакт дайки (темно-бурого цвета) лампрофира (5). Никולי скрещены, полускрещены (+ 3, 4, 6) и параллельны (= 1, 2, 5); длинная сторона фото – L, мм: 8,5 (1, 2, 3, 5, 6); 1,7 (4).

классической офитовой структуры с неясно проявленными офитовыми соотношениями пироксена и плаггиоклаза, так и долеритовой структуры, с отчётливыми взаимоотношениями ксеноморфного цветного минерала и идиоморфного плаггиоклаза. В отдельных участках предположительно фиксируется иддингсит (по оливину), мельчайшие бесцвет-

ные лейсты, иголки (плагноклаз, апатит) и зеленоватая хлоритовая минерализация, возможно за счет остатков вулканического стекла (микрофото 1, 2, 5). В породе (микрофото 2) даже просматриваются элементы келефитовых оболочек с вторичными реакционными каймами обрастания (плагноклаз, пироксен).

Наиболее интенсивные преобразования проявлены в пределах тектонических зон на контакте метадолеритов и биотит-кордиеритовых плагногнейсов (микрофото 3, 5, 6). Здесь в мультиобломочном агрегате отчетливо диагностируется контакт с интенсивно измененным лампрофиром (микрофото 5), учитывая, что в пределах участка «Енисейский» взаимопересечение метадолеритов и лампрофиров – явление крайне редкое.

Для метадолеритов характерно совмещение деформаций I и II типа. Нередко отмечается развитие высокотемпературного метасоматического окварцевания (микрофото 3) с последующим развитием обломочно-брекчиевидных текстур с низкотемпературной минерализацией (хлорит, альбит, серицит, иллит, карбонат, рудный минерал). Здесь развиты мощные послойные кварц-карбонатные прожилки зонального и обычного строения (микрофото 4). Реже отмечены прожилки хлорит-карбонатного и хлоритового состава (микрофото 2, 5, 6).

В виде отдельных швов формируются зоны интенсивной милонитизации (бластомилониты) и послойного микробрекчирования (микрофото 5, 6). Структура метадолеритов лепидогранобластовая, с элементами обломочно-полосчатой текстуры; структура долеритовая, диабазово-офитовая, пойкило-офитовая, бластомилонитовая, участками метасоматическая и катакластическая.

На рис. 5 представлены относительно «свежие» порфиридные лампрофиры (микрофото 1, 2) с фенокристаллами моноклинного пироксена (авгита), частично оплавленные (микрофото 2, 3). Август фиксируется по характерным (в поперечном разрезе) кристаллографическим формам кристаллов, двупреломлению и характерному углу погасания. Наряду с этим иногда встречаются кристаллы (микрофото 1, 3) предположительно энстатит-авгита (Mg диоксида, пижонита), диагностируемые по характерным поперечным сечениям и двупреломлению, отличным от авгита. Данный минерал встречается в субвулканических образованиях и не характерен для метаморфических пород.

Пироксены (клинопироксен) замещаются уралитовой роговой обманкой (и/или актинолитом) и представляют собой полную псевдоморфозу (микрофото 3, 5), заполненную цельным кристаллом уралита характерного грязно-синеватого (зеленоватого) цвета. Отмечается также опацизация, выраженная в замещении биотита и амфиболитизированного пироксена магнетитом (микрофото 3). Единичные кристаллы оливина частично замещены баститом. В слабо измененных разностях отмечаются свойственные лампрофирам полнокристаллические структуры с наличием фенокристаллов цветных минералов и идиоморфизмом темно- и светлоцветных минералов (микрофото 2–3, 5–6). Отчетливо фиксируются идиоморфные кристаллы измененного амфиболитизированного биотита (амфиболы, хлорит, карбонаты, гематит) и альбитизированного основного плагноклаза (микрофото 2, 5). Отдельные кристаллы плагноклаза карбонатизированы (микрофото 3, 5). В основной массе отмечены акцессории – включения рудного минерала, сфена, апатита.

Предположительно лампрофиры представлены двумя основными разновидностями: спессартитами (амфибол, плагноклаз, пироксен) и, реже, керсантитами (биотит, плагноклаз). Очень редко встречаются разновидности, которые можно отнести к вогезитам (амфибол, калишпат, август). Отличительная особенность лампрофиров – это тесная связь с трещинной, разломной тектоникой с интенсивно проявленными характерными прожилково-сетчатыми, обломочными текстурами и гидротермально-метасоматической минерализацией II типа (микрофото 3–6). Нередко в приконтактной зоне в обломках интенсивно измененных плагногнейсов фиксируются полные псевдоморфозы пинита (серицит+хлорит) по кордиериту (микрофото 5) с развитием карбоната, мусковита, хлорита, иллита. Этот факт крайне осложняет их точную диагностику, так как не

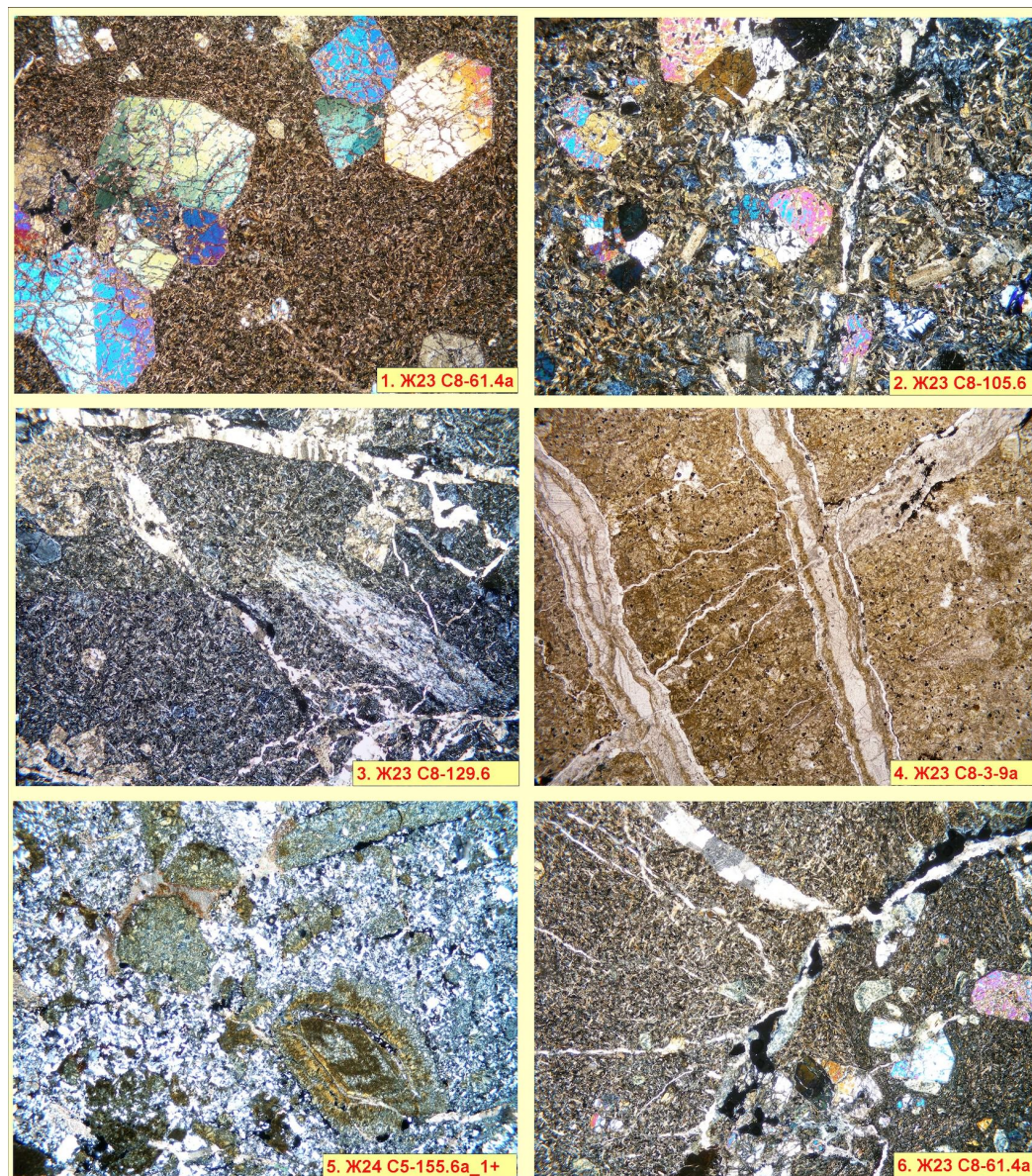


Рис. 5. Схематическая последовательность нарастания интенсивности минерально-деформационных преобразований: 1, 2→3, 4→5, 6 (микрофото). Порфировидные, относительно не измененные лампрофиры, без признаков деформационных преобразований (1, 2), а также с начальной степенью вторичных минеральных изменений (3–6) биотита (амфибол, хлорит, карбонат, гематит) и полисинтетически сдвойникового плагиоклаза (альбит, серицит, карбонат). Николи скрещены, полускрещены (+ 1–3, 5–6) и параллельны (= 4); длинная сторона фото – L, мм: 8,5 (1–6).

измененные разновидности лампрофиров встречаются крайне редко. В одной из мультитрепчкий зафиксирован редкий случай контакта лампрофира и метадолерита (микрофото 6). В лампрофире отмечена максимальная степень минеральных преобразований (II типа) с полным замещением плагиоклаза и амфиболитизированного клинопироксена – карбонатом, хлоритом и гематитом. В тектонически ослабленных зонах, где совмещены деформации I и II типа, в лампрофирах интенсивно проявлены карбонатные, карбонат-хлоритовые разноориентированные прожилки различной морфологии, мощности и зонального строения (микрофото 3–4).

Текстура породы массивная, а структура, как было отмечено выше, лампрофированная, порфирированная и панидиоморфнозернистая, призматически зернистая, с полнокристаллической, местами пойкилитовой основной массой.

Петрохимические особенности пород

Свойства самих вмещающих пород участка, предназначенного для изоляции радиоактивных отходов важны с точки зрения обеспечения безопасности как основа для построения гидрохимических, геомеханических и других моделей. Рассмотрим петрохимические особенности обобщённых типов вмещающих пород.

Гнейсы

Доля гнейсов в разрезе скальных пород участка «Енисейский» близка к 80%. В соответствии с разделом V Петрографического кодекса петрохимические характеристики метаморфических пород рассматриваются по аналогии с магматическими [Коллектив авторов, 1983; Петрографический кодекс России... , 2008]. К определению термина «гнейс» не существует единого номенклатурного подхода в различных классификационных схемах. В узком смысле термина, гнейс является минеральным (химическим) аналогом гранита-лейкогранита. Мы используем его как высокометаморфизованный кристаллический сланец (плаггиогнейс), который с увеличением основности переходит в меланократовый кристаллический сланец/амфиболит, с префиксом, определяющим его минеральный состав. В этом контексте мы и используем этот термин при анализе его петрохимических разновидностей, а именно пироксен-амфиболовый гнейс среднего состава.

Для удобства весь комплекс высокометаморфизованных пород (гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты) мы объединяем в группу гнейсов кислого и среднего состава. По содержанию кремнезема две трети пород относятся к кислым, а одна треть – к средним. Гнейсы кислого состава аналогичны магматическим породам (гранитам и гранодиоритам), тогда как гнейсы среднего состава являются аналогами диоритов и кварцевых диоритов (рис. 6). По содержанию оксидов щелочных металлов ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) практически все гнейсы относятся к породам низкощелочного и нормальнощелочного рядов. При этом кислые гнейсы являются низкощелочными, а средние гнейсы нормальнощелочными (см. рис. 6).

Преобладающим (59% проб) типом щелочности гнейсов является калиево-натриевый $1,0 > \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 0,3$. Второе место (28% проб) принадлежит к натриевому типу $4,7 > \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1,0$. Наименее распространены (13%) гнейсы калиевого типа $0,3 > \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 0,26$. Гнейсы калиево-натриевого и натриевого типов преимущественно кислые, а гнейсы калиевого типа среднего состава. Для натриевого типа, по отношению к остальным, характерно минимальное содержание щелочей и глинозема (табл. 1).

Все гнейсы пересыщены глинозёмом, так как глинозём превышает сумму оксидов Ca, Na и K на 4–12%. По коэффициенту глинозёмистости 10% проб относится к весьма высокоглинозёмистым ($4,05 > \text{al}' > 2,11$), а 90% проб к высокоглинозёмистым ($1,94 > \text{al}' > 1,14$). Весьма высокоглинозёмистые гнейсы по содержанию SiO_2 имеют кислый состав и относятся к натриевому и калиево-натриевому типам, при этом содержание глинозёма в них ниже, чем в высокоглинозёмистых породах. В весьма высокоглинозёмистых гнейсах очень малы концентрации фемических компонентов (Fe, Mg), что обуславливает более высокое значение al' .

Характерной особенностью гнейсов является практически полное отсутствие серы, которая в значимых концентрациях (0,014–0,043%) была обнаружена всего в трёх пробах. Поэтому в табл. 1 сведения о сере не приводятся. По-видимому, сульфидные минералы в гнейсах верхней части участка «Енисейский» практически отсутствуют.

Наблюдаемая геохимическая специфика метаморфических пород определяется прежде всего составом протолита (материнской породы, подвергшейся процессам метаморфизма). Иногда процесс метаморфической рекристаллизации является изохи-

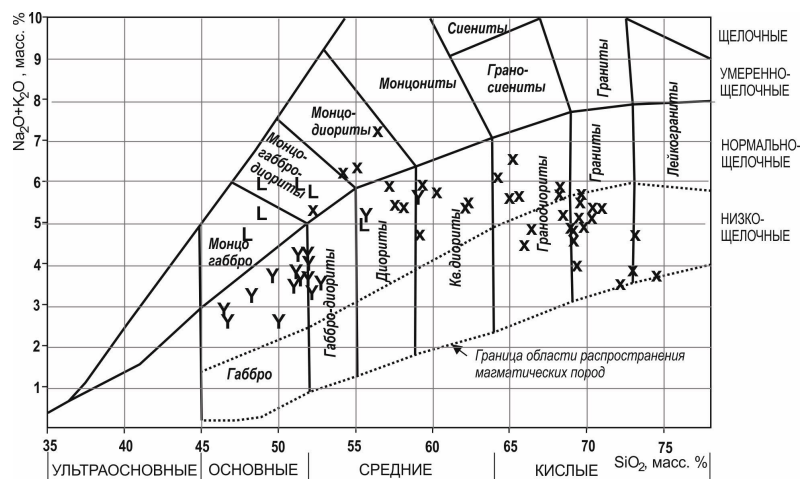


Рис. 6. TAS-диаграмма изученных пород (X – гнейсы, Y – диориты, L – лампрофиры).

Таблица 1. Средний состав различных петрохимических типов гнейсов, %

Компоненты, показатели	По содержанию SiO ₂		По типу щелочности			По коэффициенту глинозёмистости al'	
	Средние	Кислые	Натриевые	Калиево-натриевые	Калиевые	Весьма высоко-глинозёмистые	Высоко-глинозёмистые
SiO ₂	56,7	69,2	69,3	64,5	53,2	71,2	63,6
Al ₂ O ₃	18,2	13,6	13,6	15,3	19,6	13,8	15,56
Fe ₂ O ₃	4,5	2,2	2,4	3,0	5,1	1,5	3,3
FeO	5,3	3,1	3,1	4,1	5,0	2,3	4,2
MgO	3,8	2,0	2,1	2,7	4,1	1,5	2,8
CaO	2,3	2,8	3,2	2,4	2,0	3,2	2,5
Na ₂ O	2,0	2,6	2,8	2,4	1,3	2,9	2,3
K ₂ O	4,0	2,5	1,7	3,2	5,2	1,9	3,2
TiO ₂	0,9	0,6	0,7	0,7	0,9	0,4	0,8
F	0,10	0,07	0,07	0,08	0,10	0,06	0,08
P ₂ O ₅	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,07	0,09
CO ₂	0,85	0,54	0,47	0,61	1,13	0,54	0,67
ППП	1,81	0,87	0,64	1,12	3,00	0,86	1,27
al'	1,35	1,91	1,94	1,65	1,39	2,69	1,58
Na ₂ O/K ₂ O	0,59	1,29	1,91	0,76	0,26	2,33	0,87

мическим, но гораздо чаще при метаморфизме происходят изменения химического состава в связи с метасоматическими преобразованиями. Эти изменения определяются главным образом воздействием флюидов и термодинамическими условиями метаморфизма. При высоких степенях метаморфизма в присутствии воды нередко наблюдаются процессы частичного плавления породы и к дифференциации протолита на рестит и выщелачивание, что мы и наблюдаем в минеральном и химическом составах изученных пород. Выявление свойств протолита имеет важное значение для понимания процессов его формирования.

Построенная нами диаграмма Предовского подтвердила сделанные ранее К. А. Заблочкиным выводы об осадочном происхождении протолита гнейсов (рис. 7). В правой части диаграммы FA все геохимические параметры гнейсов принадлежат к полям граувакков и пелитов. При этом из первых были образованы кислые гнейсы, а из вторых – средние.

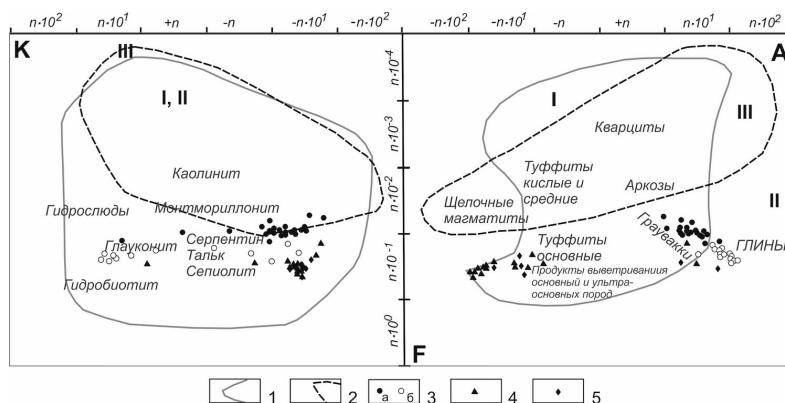


Рис. 7. Диаграмма А. А. Предовского для реконструкции первичного состава метаморфизованных алюмосиликатных магматических и осадочных пород. Условные обозначения: 1 – границы поля зернистых осадочных пород (в правой части диаграммы) и объединённого поля обломочных пород и глин (в левой части): I – зернистые осадочные и смешанные породы; II – пелиты; III – хомогенные силициты; 2 – граница поля хомогенных силицитов; Изученные породы: 3 – гнейсы (а – кислые; б – средние); 4 – долериты; 5 – лампрофиры.

Левая часть диаграммы FK показывает различную степень выветривания первичных пород, образовавших протолит. Источником вещества кислых гнейсов служили преимущественно смектиты, тогда как средние гнейсы образовались за счёт слабо изменённых продуктов выветривания (серпентин, сепиолит, гидробиотит). Вероятно, что поступление вещества, формирующего протолит, происходило по меньшей мере из двух различных областей сноса.

В петрохимических исследованиях используется большое количество параметров и диаграмм, применяемых для выявления генезиса протолита или геодинамической обстановки его формирования. Мы выбрали две из них, которые достаточно часто встречаются в современных отечественных и зарубежных публикациях.

Диаграмма F. J. Pettijohn с соавторами [Pettijohn et al., 1987] показывает, что генезис протолита гнейсов связан с граувакками. Это согласуется с диаграммой А. А. Предовского и с мнением К. А. Заблоцкого и др. [Заблоцкий и Сопрончук, 1989] об участии олигомиктовых осадков в формировании протолита (рис. 8б).

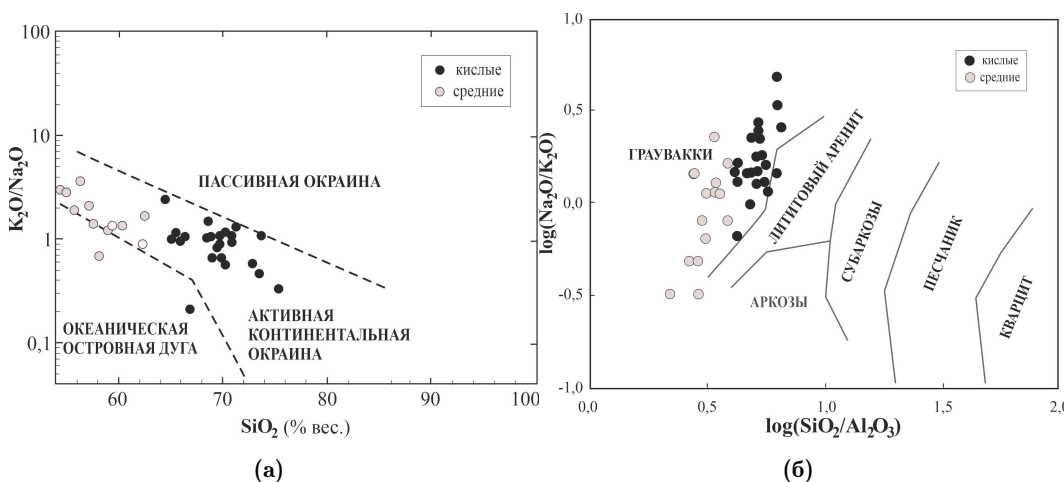


Рис. 8. Диаграммы, характеризующие происхождение гнейсов. а – диаграмма В. Р. Roser, R. J. Korsch [Roser and Korsch, 1986]; б – диаграмма F. J. Pettijohn et al. [Pettijohn et al., 1987].

Геодинамическую обстановку формирования протолита гнейсов характеризует диаграмма В. Р. Roser, R. J. Korsch [Roser and Korsch, 1986]. Почти все результаты химических анализов гнейсов говорят о формировании протолита в условиях активной континентальной окраины (рис. 8а). При этом кислые различия гнейсов тяготеют к условиям пассивного континента, а средние различия приближены к условиям океанической островной дуги. Вероятно, протолит архейских гнейсов представлял собой аккрецион-

ную призму, накопление вещества в которой было связано с двумя источниками сноса – пассивным континентом и внешней островной дугой.

Долериты

Магматические породы основного состава представлены главным образом долеритами (15 проб), а две пробы в поле были задокументированы как габбро-диабаз. В разрезе коренных пород доля пород основного состава (долеритов и габброидов) составляет 17%.

По содержанию кремнезёма все долериты (88% проб) относятся к основным породам, а две пробы габброидов к средним габбро-диоритам. Согласно TAS-диаграмме практически все долериты являются классическими габброидами, большинство из которых принадлежит к пограничной зоне с габбро-диоритами (см. рис. 6). В пределах участка «Енисейский» преимущественно развиты изменённые долериты – метадолериты, что является определяющим фактором изменения их химического состава.

По содержанию оксидов щелочных металлов (Na₂O+K₂O) все долериты и «габбро» относятся к породам нормальнощелочного ряда (см. рис. 6). Преобладающим (88% проб) типом щёлочности долеритов является калиево-натриевый $3,3 > Na_2O/K_2O > 1,2$.

По коэффициенту глинозёмистости все долериты относятся к низкоглинозёмистым ($0,71 > al' > 0,57$). В отличие от гнейсов во всех магматических породах основного состава содержится общая сера (встречаемость 95%), что говорит о наличии сульфидных минералов в этих породах (табл. 2).

Таблица 2. Средний состав гипабиссальных и жильных пород, %

Компоненты, показатели	Долерит	Лампрофир	Компоненты, показатели	Долерит	Лампрофир
SiO ₂	50,66	50,74	TiO ₂	2,23	1,02
Al ₂ O ₃	12,81	15,72	F	0,06	0,08
Fe ₂ O ₃	5,49	3,25	S _{общ}	0,10	0,07
FeO	10,77	5,04	P ₂ O ₅	0,31	0,38
MgO	4,07	7,11	CO ₂	0,98	2,02
CaO	7,92	7,16	ППП	1,42	3,62
Na ₂ O	2,17	3,23	al'	0,63	0,88
K ₂ O	1,48	2,23	Na ₂ O/K ₂ O	1,70	1,51

Считается, что формирование долеритов Канского выступа Енисейского кряжа, как и других многочисленных дайковых полей неопротерозойского дайкового пояса, глобально проявленного в краевых частях Сибирского кратона, произошло в неопротерозойскую эру (в рифее) 750–800 млн. лет назад [Эволюция... , 2006]. При этом надо признать, что оценок абсолютного возраста долеритов на участке «Енисейский» не было сделано.

Для выявления возможной принадлежности долеритов к определённой геодинамической обстановке формирования использовались диаграммы К-Тi и К-Р, предложенные Б. Г. Лутцем [Лутц, 1980] и усовершенствованные И. М. Фрумкиным [Фрумкин, 2021]. На диаграмме К-Тi большинство точек долеритов относится к полю континентального рифта, а на диаграмме К-Р точки долеритов примыкают к этому же полю (рис. 9). Это совпадает с общепринятым в наши дни мнением, что дайковые поля Южной Сибири возникли в геодинамических условиях растяжения, соответствующих внутриплитному рассеянному рифтогенезу, связанному, вероятно, с распадом неопротерозойского суперконтинента Родиния [Эволюция... , 2006].

Лампрофиры

Лампрофиры относят к особой группе меланократовых гипабиссальных и жильных пород, связанных с трещинной тектоникой. Их положение в систематике горных пород ещё недостаточно определено, а генезис не совсем ясен. Предположительно их можно

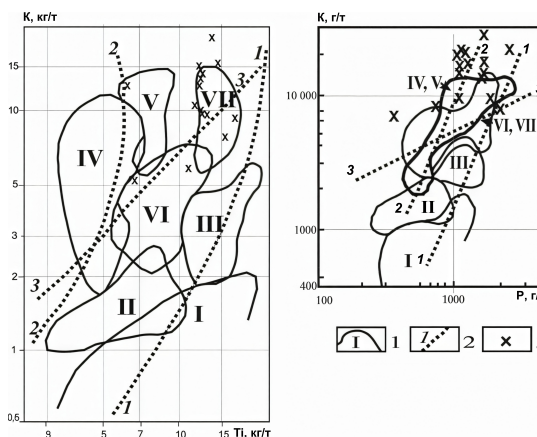


Рис. 9. Положение химических составов долеритов на геодинамических диаграммах по Б. Г. Лутцу [Лутц, 1980] и И. М. Фрумкин [Фрумкин, 2021]. Условные обозначения: 1 – границы и номера полей базальтов, характерные для структур: I – трансформных и межплитных разломов; II – срединно-океанических хребтов; III – океанических островов; IV – островных дуг; V – континентальных вулканических поясов, VI – платформ; VII – континентальных рифтов. 2 – линии трендов базальтов по Б. Г. Лутцу: 1 – океанических, 2 – островных дуг, 3 – платформ; 3 – точки анализов долеритов.

отнести к жильной/гипабиссальной фазе гранитоидов Нижнеканского массива. Доля лампрофиров в разрезе коренных пород составляет около 3%, поэтому они являются достаточно редкими породами.

Из отобранных шести проб по содержанию кремнезёма две трети относятся к основным породам, а одна треть – к средним. Согласно TAS-диаграмме лампрофиры являются породами умереннощелочного ряда, близкими к монцогаббродиоритам (см. рис. 6). Тип щёлочности лампрофиров – калиево-натриевый: $2,2 > Na_2O/K_2O > 1,1$ (см. табл. 2).

По коэффициенту глинозёмистости две трети проб относятся к высокоглинозёмистым ($1,31 > al^1 > 1,02$), а одна треть к умеренноглинозёмистым ($0,91 > al^1 > 0,77$). Содержание глинозёма в лампрофиров близки к таковому в гнейсах, но при этом оно выше, чем в долеритах.

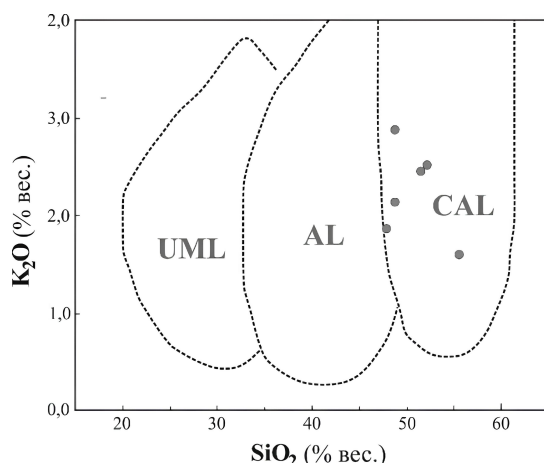


Рис. 10. Положение проб лампрофиров участка «Енисейский» на фрагменте классификационной диаграммы K_2O-SiO_2 , по Rock [1987]. UML – ультраосновные лампрофиры, AL – щелочные лампрофиры, CAL – известково-щелочные лампрофиры.

Все лампрофиры содержат общую серу, а содержание Ca и CO_2 является самым высоким среди пород участка, что подтверждается наблюдаемой в породах тонкой сетью прожилков карбонатов. Поэтому лампрофиры принадлежат к известково-щелочному типу по классификационной диаграмме N. M. S. Rock [Rock, 1987] (рис. 10), что соответствует их полевым определениям (вогезит, спессартит).

Выводы

I. Результаты геолого-структурных, петрографических и петрохимических исследований составили основу типизации наиболее значимых элементов строения пород складчатого обрамления (участок «Енисейский»), важных с точки зрения обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО. Одним из наиболее определяющих аспектов оценки безопасности считается прогноз вероятной миграции радионуклидов по водопроницаемым зонам. Данный прогноз, учитывая монолитный характер древней метаморфической толщи кристаллических пород, связывается с тектоническими разрывными нарушениями. Ниже представлена типизация геолого-тектонического строения исследуемой толщи вмещающих пород участка «Енисейский», с выделением 3-х групп деформационных преобразований.

1. Минерально-деформационные преобразования I типа. Древние высоко-средне-температурные постмагматические залеченные зоны, с элементами прототектоники, практически не отличающиеся от пород ненарушенного кристаллического массива, сложенного метаморфитами (гнейсы, гранито-гнейсы, кристаллические сланцы) и субвулканическим дайковым комплексом пород (метадолериты и лампрофиры).

В эту группу отнесены: а – тектонически ослабленные зоны, контролирующие положение даек; б – древние высоко- и среднетемпературные зоны (бластокатаклазиты-I, бластомилониты-I), в том числе с обломками даек, которые смещают первые более древние дайковые тела, залеченные собственно высокотемпературными метасоматитами кварц-полевошпатового состава и линзовидно-прожилковыми мигматическими инъекциями без признаков последующих тектонических нарушений. В первую группу также отнесены и редко встречающиеся пластические макродеформации незначительного масштаба, сопряжённые с прототрещинами.

2. Минерально-деформационные преобразования II типа. Группа представлена потенциально водопроницаемыми палеотектоническими нарушениями гидротермального этапа развития территории с формированием низкотемпературных метаморфических, гидротермально-метасоматических и деформационных (бластокатаклазиты-II, бластомилониты-II) преобразований. Все выявленные палеотектонические нарушения более или менее значимого масштаба (мощностью более 0,5 м) контролируют все последующие (наложенные) гидротермально-метасоматические и гипергенные процессы преобразования вмещающих пород, включая дресвяно-щебнистые отложения и трещинные зоны.

К последним отнесены:

- зоны повышенной минерализованной трещиноватости с кварцем, альбитом, Mg-Fe хлоритом, карбонатом, слюдами, а также зоны гидрослюдизации и прожилкования;
- зоны повышенной минерализованной трещиноватости (прожилкование) с низкотемпературным хлоритом, хлорит-сметтитом и зоны дробления, в т.ч. наследующие древние зоны катаклаза и брекчирования, сопровождаемые ореолами пегматоидных гранитов, низкотемпературных гидротермальных кварцевых и кварц-кальцитовых жил, иногда с сульфидами, и нитевидными кальцитовыми прожилками, часто преобразованные в глинистые (иллит-сметтит) минералы, с формированием низкотемпературных метасоматитов аргиллизитового типа (каолинит, хлорит-сметтит, монтмориллонит);
- зоны повышенной трещиноватости и зоны дробления, в т.ч. наследующие древние зоны брекчирования, и выполненные глинисто-дресвяным материалом, который является продуктом гипергенных процессов в линейных корах выветривания, развитых преимущественно

но в верхней части разреза. К значимым для безопасности ПГЗРО разрывным нарушениям следует отнести, прежде всего, долгоживущие зоны дробления существенной мощности с дресвяно-глинистым заполнением, которые, возможно, отличаются повышенной водопроницаемостью на фоне монолитных неизменных древних метаморфитов (гнейсы, гранито-гнейсы, дайки метадолеритов и лампрофиров).

3. Активные (новейшие и современные) тектонические нарушения. Группа включает редкие рассеянные трещины с маломощной (первые миллиметры) глиной трения, бороздами и зеркалами скольжения на стенках в глинизированных (гидрослюда (иллит), иллит-смектит каолинит, оксиды, гидроксиды Fe-Ti) зонах постгидротермального дробления, в т.ч. наследующих древние зоны катаклаза/брекчирования I и II типа.

Признаков значительных новейших (активных) тектонических движений по разрывным нарушениям, вскрытым имеющимися буровыми скважинами, не выявлено. Новейшие и современные тектонические движения, по-видимому, ограничиваются локальным крипом. Наряду с этим, сохранность изученного керна не позволяет достоверно определить масштабы проявлений неотектоники. Предположительно, элементы неотектоники должны наследовать структурно-тектонический рисунок, сформированный на всем временном интервале от архей-протерозойского до палеозой-мезозойского времени. При изучении нового керна скважин, бурение которых ожидается в ближайшее время, на этот аспект необходимо обратить особое внимание.

- I. Проведено детальное изучение дайкового комплекса пород (метадолериты, лампрофиры), учитывая его важнейшую роль в геолого-тектоническом строении участка «Енисейский». Дана детальная петрохимическая характеристика древних метаморфитов, пород дайкового комплекса с расчётом их петрохимических коэффициентов, анализом геодинамической обстановки их формирования и генетических аспектов происхождения протолита гнейсов. Результаты петрохимического изучения пород участка «Енисейский» позволяют сделать следующие выводы:

1. В соответствии с полевыми определениями и петрохимической классификацией Петрографического кодекса России коренные породы представлены следующими типами:
 - параметаморфическими гнейсами атамановской серии раннего архея;
 - магматическими интенсивно изменёнными долеритами (метадолеритами) предположительно рифейского возраста;
 - жильными лампрофирами также предположительно рифейского возраста.
2. Гнейсы в разрезе коренных пород занимают около 80%. По содержанию SiO_2 они относятся к кислым (62%) и средним (33%) разновидностям. Гнейсы кислого состава аналогичны гранитам (гранодиоритам), а гнейсы среднего состава являются петрохимическими аналогами диоритов и кварцевых диоритов. По содержанию оксидов щелочных металлов ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) практически все гнейсы относятся к породам низкощелочного и нормально щелочного рядов. Преобладающим типом щёлочности гнейсов (около 60%) является калиево-натриевый. Все гнейсы пересыщены глинозёмом и по коэффициенту глинозёмистости 90% проб относятся к высокоглинозёмистым.

Петрохимические исследования по породообразующим оксидам подтверждают осадочное происхождение протолита гнейсов в геодинамической обстановке активной континентальной окраины. Гнейсы различного вещественного состава имеют различный генезис протолита: гнейсы кислого состава образованы по грауваккам, а средние – происходят из пелитов.

3. Долериты являются гипабиссальными породами, образующими дайки, которые пронизывают толщу метаморфических гнейсов. В разрезе коренных пород доля долеритов составляет 17%. При существенном минерально-деформационном преобразовании первичных долеритов, подчёркивая их принадлежность к дайковому комплексу, используется термин «долериты». Практически все долериты по химическому составу, являются классическими габброидами, большинство из которых принадлежит к пограничной зоне с габбро-диоритами. По содержанию оксидов щелочных металлов ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), все долериты относятся к породам нормально-щелочного ряда, а по коэффициенту глинозёмистости – к низкоглинозёмистым. Петрохимические коэффициенты связывают образование долеритов с полем континентального рифта и процессами корового растяжения. Считается, что формирование долеритов Канского выступа Енисейского кряжа, как и других многочисленных дайковых полей в краевых областях Сибирского кратона, произошло в неопротерозойскую эру (в рифее) 750–800 млн лет назад, но определений абсолютного возраста долеритов до сих пор не существует.
4. Лампрофиры являются редкими породами. Их доля в разрезе коренных пород составляет около 3%. В пределах участка «Енисейский» лампрофиры выявлены впервые. По содержанию SiO_2 они относятся к основным/средним породам, а по сравнению с гнейсами и долеритами, лампрофиры характеризуются повышенным содержанием щелочей, то есть являются породами умеренно-щелочного ряда, близкими к монцо-габбро-диоритам. Тип щёлочности лампрофиров – калиево-натриевый, глинозёмистость изменяется от умеренной до высокой. Жилы лампрофиров, как уже было отмечено, контролируют трещинную тектонику.

Заключение

Детальная петрографическая и петрохимическая характеристика вмещающих пород участка «Енисейский», позволила выделить два основных типа минерально-деформационных (структурно-петрологических) преобразований. Это в свою очередь позволило провести типизацию геолого-тектонического строения участка. Преобразования I типа связаны с элементами прототектоники, катаклаза и бластеза, сформированных в условиях высоких и средних температур (бластокатаклазиты-I и бластомилониты-I); II тип преобразований сформирован в процессе околотрепчинных низкотемпературных гидротермально-метасоматических преобразований (катаклазиты-II, бластокатаклазиты-II, бластомилониты-II и милониты-II). Данные деформационные преобразования различаются по масштабу, времени формирования и интенсивности проявления и сопровождаются соответствующими минеральными ассоциациями и парагенезисами.

При этом разрывные нарушения, характеризующиеся преобразованиями I типа, признаются условно водонепроницаемыми, в то время как наличие II типа преобразований, напротив, может свидетельствовать о потенциальной проницаемости. Поэтому блоки участка «Енисейский», нарушенные зонами дробления (см. рис. 2) должны быть подвергнуты детальному гидрогеологическому мониторингу.

Характеристика вмещающих пород участка, предназначенного для изоляции радиоактивных отходов, необходима с точки зрения обеспечения безопасности как основа для построения геологических, гидрохимических, геомеханических и других моделей.

Благодарности. Исследования реализованы в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров (Стратегического мастер-плана исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край))» утверждённой Госкорпорацией «Росатом» с горизонтом планирования до 2030 г. и поддержаны государственным заданием ИГЕМ РАН.

Список литературы

- Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов. — М. : Горная книга, 2011. — 560 с. — EDN: [RSVUYJ](#).
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46–Красноярск. Объяснительная записка / под ред. Ю. С. Глухов. — СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. — 500 с.
- Ефремова С. В. и Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород: Справочное пособие. — М. : Недра, 1985. — 511 с.
- Заблоцкий К. А. и Сопрончук В. Р. Реконструкция первичного состава раннедокембрийских метаморфических пород юга Енисейского кряжа // Проблемы геологии и металлогении Красноярского края. — Новосибирск : Наука, 1989. — С. 100–109.
- Иванов А. И., Иванов М. С., Лоскутов Е. Е. и др. Петрография и петрохимия мезозойских магматических пород северо-восточной части Эвотинского рудного района (Южная Якутия, Алданский щит) // Вестник СВФУ. Серия Науки о Земле. — 2022. — 4(28). — С. 25–42. — <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.28.4.003>.
- Коллектив авторов. Магматические горные породы. Классификация, номенклатура, петрография (в 6-ти томах). — М. : Недра, 1983.
- Кочкин Б. Т., Мальковский В. И. и Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). — М. : ИГЕМ РАН, 2017. — 384 с.
- Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Лопатин П. В. и др. Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород // Горный журнал. — 2015. — № 10. — С. 59–64. — <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.11>.
- Лутц Б. Г. Геохимия океанического и континентального магматизма. — М. : Недра, 1980. — 247 с.
- Морозов О. А., Расторгуев А. В. и Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. — 2019. — Т. 9, № 4. — С. 46–62. — <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-46-62>.
- Озерский А. Ю. и Полякова Е. Г. История, результаты и проблемы геологического изучения Енисейского участка для захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции (Томск, 20–24 сентября 2021 г.) — Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. — С. 443–447.
- Петров В. А., Полуэктов В. В., Хаммер Й. Р. и др. Исследование минеральных и деформационных преобразований горных пород Нижнеканского массива и складчатого обрамления в целях определения их удерживающей способности при геологическом захоронении и изоляции радиоактивных отходов // Горный журнал. — 2015. — № 10. — С. 67–72. — <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.13>.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание 2-е, переработанное и дополненное / под ред. О. А. Богатиков, О. В. Петров и Л. Н. Шарпенюк. — СПб. : ВСЕГЕИ, 2008. — 203 с.
- Предовский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. — Л. : Наука, 1980. — 152 с.
- Сазонов А. М., Заблоцкий К. А., Линнеманн У. и др. Геохронология силлиманит-кордиеритовых гнейсов атамановской серии Южно-Енисейского кряжа (Россия) // Литосфера. — 2017. — № 2. — С. 49–59. — EDN: [YMXUJV](#).
- Фрумкин И. М. Геодинамические режимы в раннем архее Алданского щита // Региональная геология и металлогения. — 2021. — № 86. — С. 45–61. — https://doi.org/10.52349/08697892_2021_86_45-61.
- Шарпенюк Л. Н., Костин А. Е. и Кухаренко Е. А. TAS-диаграмма сумма щелочей - кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // Региональная геология и металлогения. — 2013. — № 56. — С. 40–50. — EDN: [STDKNV](#).
- Эволюция южной части Сибирского кратона в докембрии / под ред. Е. В. Складаров. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. — 367 с.
- Le Maitre R. W., Streckeisen A., Zanettin B., et al. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. — Cambridge University Press, 2002. — 236 p. — <https://doi.org/10.1017/cbo9780511535581>.
- Ozerskiy A. and Ozerskiy D. Geological Environment of the Archean Crystalline Rock Massif for the Final Isolation of Radioactive Waste // 74th Geological Congress of Turkey with international participation, April 11-15. — Ankara, Turkey : TMMOB Chamber of Geological Engineers, 2022. — P. 30.
- Pettijohn F. J., Potter P. E. and Siever R. Sand and Sandstone. — 2nd. — New York : Springer New York, 1987. — 553 p. — <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>.

- Rock N. M. S. The nature and origin of lamprophyres: an overview // Geological Society, London, Special Publications. — 1987. — Vol. 30, no. 1. — P. 191–226. — <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1987.030.01.09>.
- Roser B. P. and Korsch R. J. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio // The Journal of Geology. — 1986. — Vol. 94, no. 5. — P. 635–650. — <https://doi.org/10.1086/629071>.

PETROGRAPHY AND PETROCHEMISTRY OF METAMORPHIC AND IGNEOUS ROCKS OF THE “YENISEYSKIY” SITE

V. A. Minaev^{1,**} , A. Yu. Ozerskiy^{2,3} , V. V. Poluektov¹ , V. A. Petrov¹ , and K. Yu. Murashov¹ 

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russian Federation

²Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Moscow, Russian Federation

³JSC “Krasnoyarsk Mining and Geological Company”, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Correspondence to: Vasilii Minaev, minaev2403@mail.ru

In 2023, geological exploration of the “Yeniseyskiy” site (Krasnoyarsk Region), where a deep geological repository for radioactive waste (DGR) is planned, resumed. A detailed characterization of the rock composition, particularly tectonic faults as potential radionuclide migration pathways, is critical to ensuring the long-term safety of the site. The aim of the study was to classify the most significant structural elements of the site's rock mass in terms of mineral-deformational transformations, as well as to petrochemically characterize ancient metamorphic rocks and dike complex rocks to elucidate their genesis. The study is based on a comprehensive core analysis of 10 boreholes (up to 150 m deep), including petrographic analysis of thin sections, atomic emission spectrometry to determine the main oxides and rare earth elements, and statistical data processing. Two types of mineral-deformational transformations were identified. Type I (high- and medium-temperature) is associated with healed prototectonics zones, which are similar in properties to the unaltered massif. Type II (low-temperature) formed during hydrothermal-metasomatic transformations and characterizes potentially permeable paleotectonic faults. A schematic geological model has been constructed, including a classification of tectonic fault zones based on an analysis of these mineral-deformation transformations. Petrochemically, it has been established that gneisses (up to 80% of the section) are pararocks formed after graywackes and pelites in an active continental margin setting. Dolerites (17%) are classified as intraplate formations of the continental rift, and newly identified lamprophyres (3%) are calc-alkaline. The completed classification of tectonic faults allows them to be differentiated by their hydrogeological significance: zones with Type I transformations are considered conditionally impermeable, while crushed zones with Type II transformations require detailed hydrogeological monitoring as potential migration routes. The petrochemical data obtained on the genesis of the rocks form the basis for constructing geological and geomechanical models to justify the safety of the DGR.

Keywords: Radioactive waste, radioactive waste disposal, underground research laboratory, petrography, petrochemistry.

Citation: Minaev V. A., Ozerskiy A. Yu., Poluektov V. V., Petrov V. A., and Murashov K. Yu. (2026), Petrography and Petrochemistry of Metamorphic and Igneous Rocks of the “Yeniseyskiy” Site, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES1011, <https://doi.org/10.2205/2026ES001063>, EDN: NKDVRO

Received: March 24, 2025
Accepted: September 10, 2025
Published: March 31, 2026



© 2025. The Authors.

References

- Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., et al. Underground Isolation of Radioactive Waste. — M. : Gornaya Kniga, 2011. — 560 p. — EDN: [RSVUYJ](https://doi.org/10.2205/2026ES001063) ; (in Russian).
- Authors. Igneous Rocks. Classification, Nomenclature, Petrography (in 6 volumes). — Moscow : Nedra, 1983. — (In Russian).
- Efremova S. V. and Stafeev K. G. Petrochemical Methods of Rock Exploration: A Reference Guide. — Moscow : Nedra, 1985. — 511 p. — (In Russian).

- Evolution of the Southern Siberian Craton in the Precambrian / ed. by E. V. Sklyarov. — Novosibirsk : Publishing House of the SB RAS, 2006. — 367 p. — (In Russian).
- Frumkin I. M. Early Archean geodynamic regimes in the Aldan Shield // Regional Geology and Metallogeny. — 2021. — No. 86. — P. 45–61. — https://doi.org/10.52349/08697892_2021_86_45-61. — (In Russian).
- Ivanov A. I., Ivanov M. S., Loskutov E. E., et al. Petrography and petrochemistry of Mesozoic igneous rocks in the northeastern part of the Evota ore region (South Yakutia, Aldan Shield) // Vestnik of North-Eastern Federal University. Series "Earth Sciences". — 2022. — 4(28). — P. 25–42. — <https://doi.org/10.25587/SVFU.2022.28.4.003>. — (In Russian).
- Kochkin B. T., Malkovsky V. I. and Yuditsev S. V. Scientific Foundations for Assessing the Safety of Geological Isolation of Long-Lived Radioactive Waste (Yenisei Project). — Moscow : IGM RAS, 2017. — 384 p. — (In Russian).
- Le Maitre R. W., Streckeisen A., Zanettin B., et al. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. — Cambridge University Press, 2002. — 236 p. — <https://doi.org/10.1017/cbo9780511535581>.
- Lobanov N. F., Beygul V. P., Lopatin P. V., et al. Selection and validation of area for underground research laboratory in Nizhnekansky Massif // Gornyi Zhurnal. — 2015. — No. 10. — P. 59–64. — <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.11>. — (In Russian).
- Lutz B. G. Geochemistry of Oceanic and Continental Magmatism. — Moscow : Nedra, 1980. — 247 p. — (In Russian).
- Morozov O. A., Rastorguev A. V. and Neuvazhaev G. D. Assessing the state of the geological environment at the Yeniseyskiy site (Krasnoyarsk region) // Radioactive Waste. — 2019. — Vol. 9, no. 4. — P. 46–62. — <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-46-62>. — (In Russian).
- Ozerskiy A. and Ozerskiy D. Geological Environment of the Archean Crystalline Rock Massif for the Final Isolation of Radioactive Waste // 74th Geological Congress of Turkey with international participation, April 11-15. — Ankara, Turkey : TMMOB Chamber of Geological Engineers, 2022. — P. 30.
- Ozerskiy A. Yu. and Polyakova E. G. History, results, and problems of the geological investigation of the Yeniseyskiy site for radio-active waste disposal // Radioactivity and radioactive elements in environment. Proceedings of VI international conference. September 20-24, 2021. — Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University, 2021. — P. 443–447. — (In Russian).
- Petrographic Code of Russia. Igneous, Metamorphic, Metasomatic, and Impact Formations. 2nd Edition, Revised and Supplemented / ed. by O. A. Bogatikov, O. V. Petrov and L. N. Sharpenok. — St. Petersburg : VSEGEI, 2008. — 203 p. — (In Russian).
- Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J. R., et al. Analysis of mineralogical and deformation-induced transformations of Nizhnekansky Massif rocks to estimate their retention capacity in geological disposal and isolation of radioactive waste // Gornyi Zhurnal. — 2015. — No. 10. — P. 67–72. — <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.13>. — (In Russian).
- Pettijohn F. J., Potter P. E. and Siever R. Sand and Sandstone. — 2nd. — New York : Springer New York, 1987. — 553 p. — <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>.
- Predovsky A. A. Reconstruction of the conditions of sedimentogenesis and volcanism in the Early Precambrian. — Leningrad : Nauka, 1980. — 152 p. — (In Russian).
- Rock N. M. S. The nature and origin of lamprophyres: an overview // Geological Society, London, Special Publications. — 1987. — Vol. 30, no. 1. — P. 191–226. — <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1987.030.01.09>.
- Roser B. P. and Korsch R. J. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio // The Journal of Geology. — 1986. — Vol. 94, no. 5. — P. 635–650. — <https://doi.org/10.1086/629071>.
- Sazonov A. M., Zablotsky K. A., Linnemann U., et al. Geochronology of sillimanite-cordierite gneiss Atamanovo series of the south Yenisei ridge (Russia) // Lithosphere (Russia). — 2017. — No. 2. — P. 49–59. — EDN: YMXUJV ; (in Russian).
- Sharpenok L. N., Kostin A. E. and Kukharenko E. A. TAS diagram of the total alkalis and silica for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks // Regional Geology and Metallogeny. — 2013. — No. 56. — P. 40–50. — EDN: STDKNV ; (in Russian).
- State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Angara-Yenisei Series. Sheet O-46 - Krasnoyarsk. Explanatory Note / ed. by Yu. S. Glukhov. — St. Petersburg : VSEGEI Cartographic Factory, 2009. — 500 p. — (In Russian).
- Zablotsky K. A. and Sopronchuk V. R. Reconstruction of the Primary Composition of Early Precambrian Metamorphic Rocks in the Southern Yenisei Ridge // Problems of Geology and Metallogeny of Krasnoyarsk Krai. — Novosibirsk : Nauka, 1989. — P. 100–109. — (In Russian).