

УДК 550.4.02 + 551.263.038

ПОЗДНЕДЕВОНСКИЕ ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНЫЕ ВЫСОКОКАЛИЕВЫЕ ФРАКЦИОНИРОВАННЫЕ ЛЕЙКОГРАНИТЫ “FERROAN” I-ТИПА (РУДНЫЙ АЛТАЙ)

© 2024 г. Член-корреспондент РАН Н. Н. Крук*, М. Л. Куйбида, Е. Н. Соколова,
П. Д. Котлер, В. А. Яковлев

Поступило 20.11.2023 г.

После доработки 29.11.2023 г.

Принято к публикации 14.12.2023 г.

Представлены результаты геологических, геохимических и изотопно-геохронологических исследований позднедевонских гранитоидов Рудного Алтая, сформированных на герцинском этапе тектогенеза Алтае-Саянского сектора Центрально-Азиатского складчатого пояса. Изотопное U–Pb-датирование цирконов показало интервал возрастов от 367 до 363 млн лет. Геохимические характеристики указывают на принадлежность лейкогранитов к высококалиевой известково-щелочной серии ($\text{SiO}_2 > 73$ вес. %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.9\text{--}9$ вес. %, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.7\text{--}1.2$), известково-щелочного и щелочно-известкового подтипов ($MALI = 6.32\text{--}8.41$). Породы близки к насыщению глиноземом ($A/CNK = 0.9\text{--}1.2$), обладают высокой железистостью ($Fe^* = 0.84\text{--}0.97$) и повышенными содержаниями фтора ($0.04\text{--}0.17$ масс. %). Вариации HFSE, LILE, Ga/Al-отношений и сильная отрицательная корреляция $A/CNK\text{--}P_2O_5$ указывают на их принадлежность к фракционированным гранитоидам I-типа. С лейкогранитами пространственно и генетически связано редкометальное (бериллиевое) оруденение. Предполагается, что формирование гранитоидов было связано с синсдвиговой обстановкой на конвергентной окраине, в результате косой субдукции или скопления литосферных плит Иртыш-Зайсанского океана и окраины Сибирского континента.

Ключевые слова: Центрально-Азиатский складчатый пояс, Алтайский ороген, Устьянский интрузив, трансформная окраина, корово-мантийное взаимодействие

DOI: 10.31857/S2686739724040078

Механизмы генезиса лейкогранитных магм, содержащих “избыточное” в сравнении с составом гранитной эвтектики количество кремнезема, являются предметом дискуссий. Такие породы широко распространены в складчатых областях, слагая поздние фазы гранодиорит(граносиенит)-гранитных интрузий или формируя самостоятельные гранит-лейкогранитные плутоны, обычно завершающие крупные всплески эндогенной активности. Среди последних наиболее интересными являются двуполевошпатовые граниты с высоким индексом железистости (“ferroan”-тип; $Fe^* = \text{Fe}_2\text{O}_3^T/(\text{Fe}_2\text{O}_3^T + \text{MgO}) > 0.8$), описанные в ряде работ как “красные граниты”. В основном такие гранитоиды

формируются в условиях посторогенного растяжения в связи с корово-мантийным взаимодействием [1]. Однако наиболее высококремнистые известково-щелочные разности этого типа, не обнаруживающие признаков наличия в их составе мантийного материала, проявляются и в окраинно-континентальных условиях, в связи с завершающими стадиями вулканоплутонических ассоциаций и их магматогенными флюидами (см. обзор в [2, 3]).

Предметом настоящего исследования стали позднедевонские гранитоиды Рудного Алтая – составной части Алтае-Саянского сектора Центрально-Азиатского складчатого пояса ([4; 5; 6] и др.) (рис. 1 а). Его позднепалеозойская история определялась сближением Сибирского и Казахстанского континентов, при их одновременном вращении по часовой стрелке, и косоориентированной субдукцией, предшествующей закрытию Иртыш-Зайсанского палеоокеана. В позднем девоне произошло

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск, Россия
*E-mail: kruk@igm.nsc.ru

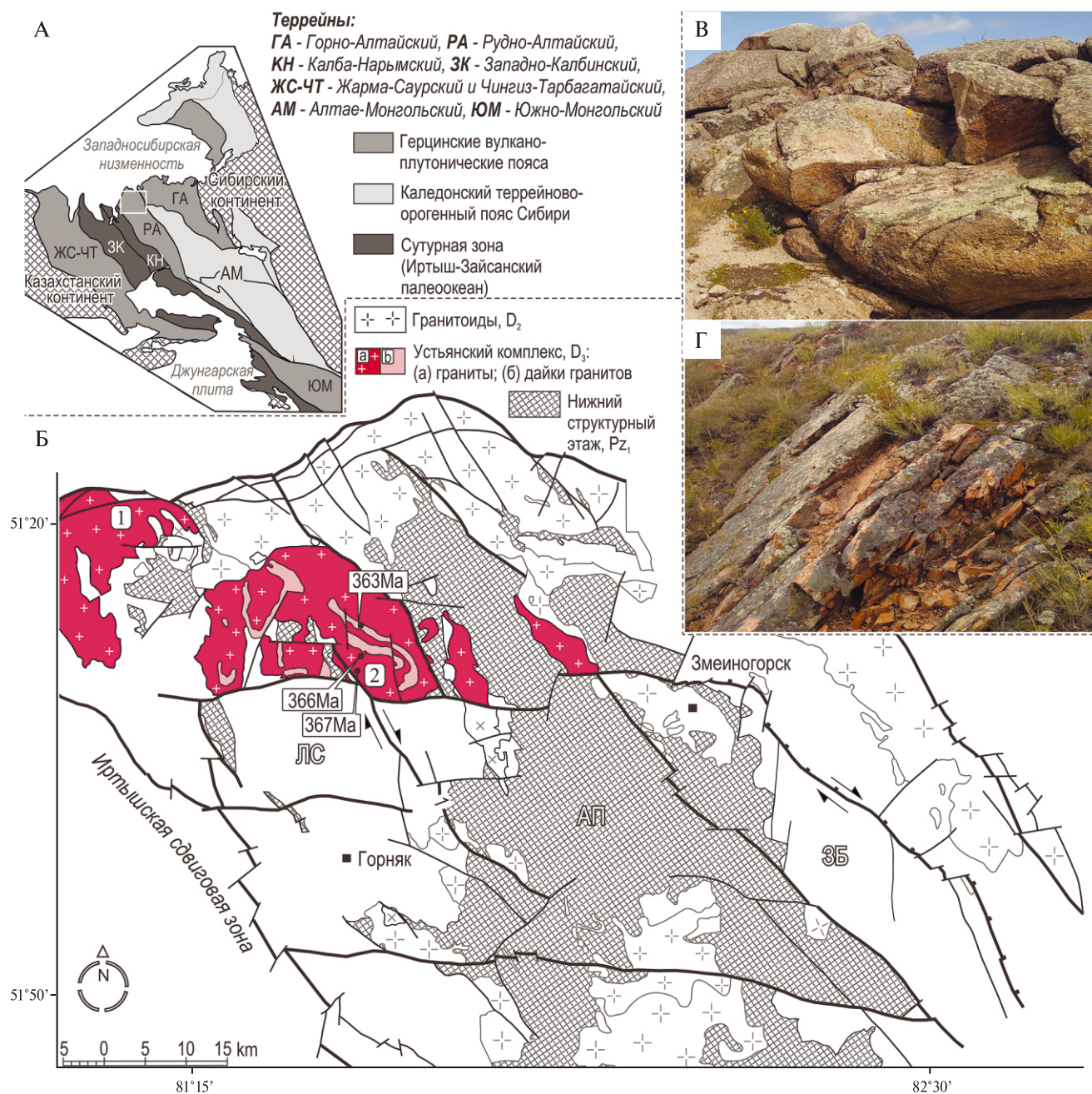


Рис. 1. (А) Тектоническая схема Алтае-Саянского сектора Центрально-Азиатского складчатого пояса [4], с выделенным участком района исследований в СЗ-части Рудного Алтая. (Б) Структурно-геологическая схема с размещением позднедевонских гранитоидных интрузий, отметками интрузий устьянского комплекса (1 – Веселоярский, 2 – Устьянский) и указанием крупных геологических структур (ЗБ – Змеиногорско-Быструшинский прогиб; АП – Алейское поднятие; ЛС – Локтевская синклиналь) [8]. (В, Г) Представительные фотографии коренных обнажений гранитоидов первой и второй фазы устьянского комплекса соответственно. Цифры в прямоугольниках – авторские данные U–Pb-изотопного датирования (настоящее исследование).

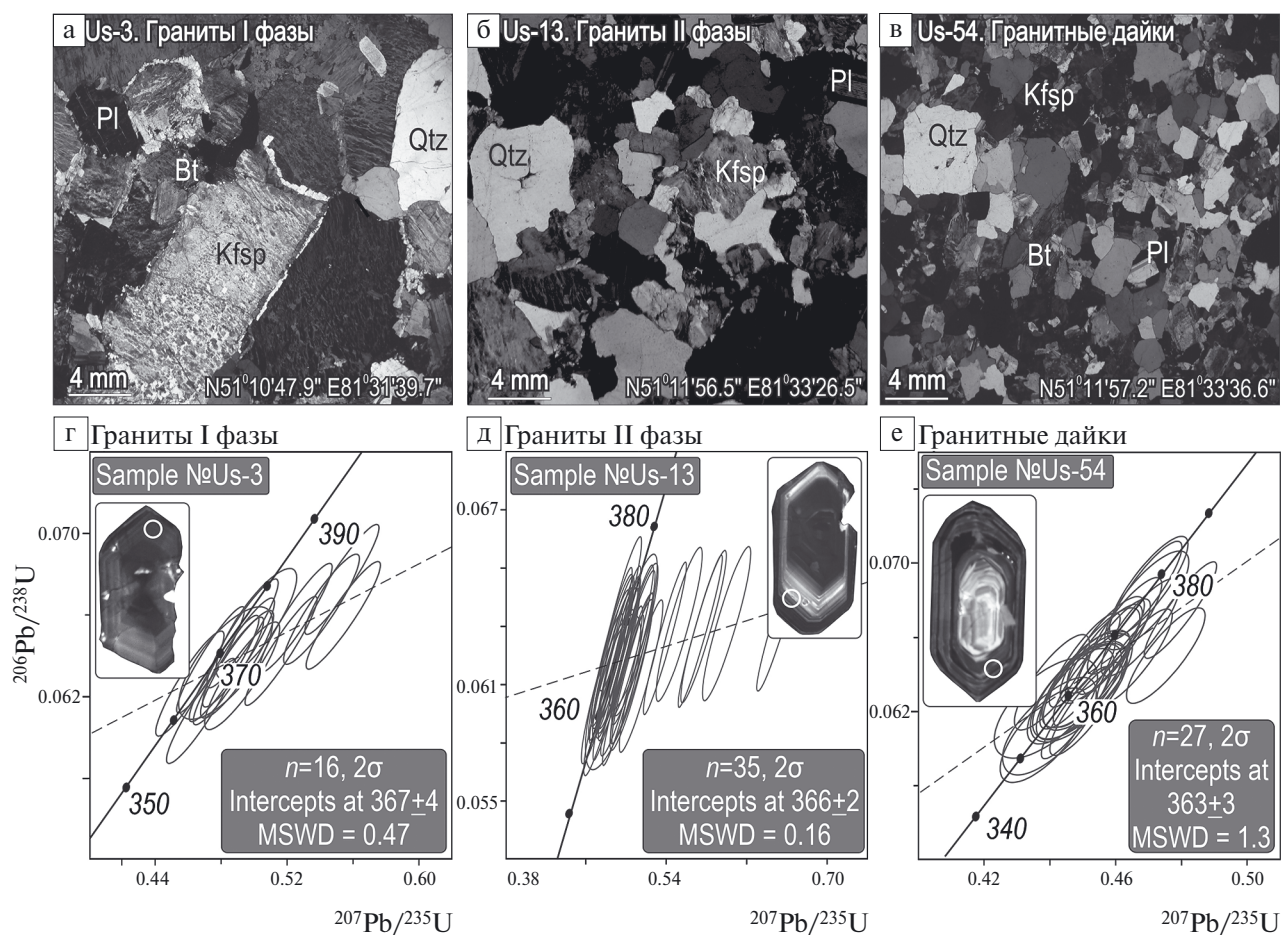


Рис. 2. (а–в) Фотографии шлифов гранитоидов устьянского комплекса: а) первая фаза, б) вторая фаза, в) гранитные дайки. Никели скрещены. Минералы: Pl – плагиоклаз, Qtz – кварц, Kfsp – калишпат, Bt – биотит. (г–е) Результаты U–Pb-изотопного датирования на диаграммах с конкордией и CL-изображениями цирконов. Возраст цирконов установлен LA–SF–ICP–MS-методом, на спектрометре высокого разрешения ThermoFisher Scientific Element XR с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite 193 нм. Морфогенетический анализ цирконов выполнен И. Ю. Васковой. CL-изображения цирконов получены на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (“Jeol”), аналитики Н. С. Карманов, М. В. Хлестов. Все исследования проведены в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

масштабное гранитообразование с резким преобладанием низкокальциевых и существенно калиевых гранитоидов известково-щелочной серии, при практически полном отсутствии разностей повышенной щелочности. Предполагается, что с этого времени эволюция Алтайской активной окраины, вплоть до начала коллизии Сибирского и Казахстанского континентов в середине карбона, могла происходить в режиме окраинно-континентального скольжения литосферных плит [7]. Во фронтальной части активной окраины (Рудном Алтае) этому периоду соответствует формирование устьянского лейкогранитного комплекса, с которым пространственно и генетически связано редкометалльное (бериллиевое) оруденение [8]. Интрузивы,

близкие по морфологии к лакколлитам, формировались в мезо-гипабиссальных условиях глубинности, под контролем тектонических зон, ориентированных косо к простиранию конвергентной границы и в настоящем имеющих взбросо-надвиговую природу (рис. 1 б–г).

Гранитоидные интрузии сложены породами двух фаз, с преобладанием щелочных полевых шпатов над кальциевыми и невысоким содержанием феррических компонентов (рис. 2 а, б), равномерно-среднезернистого и порфировидно-мелкозернистого облика, соответственно, характерного розового и кирпично-красного оттенков, с близким минеральным составом (кварц 30–35%, калиевый полевой шпат 35–40%, олигоклаз 25–32%, биотит 1–5% ± флюорит,

магнетит, апатит, циркон). Жильные аплитовидные граниты, мощностью от 0.5–3 до 5 м, протяженностью от 0.5–0.6 до 1 км, залегают в системе поперечных трещин, иногда формируя штокообразные тела (рис. 2 в), встречаются пегматитовые жилы мощностью до 2 м и протяженностью до 50 м, миароловые пустоты.

Результаты U–Pb-изотопного LA-ICP-MS-датирования цирконов перечисленных фаз, изображенные на диаграммах с конкордией, имеют близкие значения возрастов в интервале от 367 до 363 млн лет (рис. 2 г–е). Однако приведенные оценки, полученные методом пересечения с дискордией, и закономерное смещение части экспериментальных точек относительно кривой равных возрастов, предполагают нарушение изотопной U–Pb-системы, хотя и с небольшими статистическими отклонениями. Таким образом, полученные даты соответствуют фаменскому ярусу позднего девона, что в пределах точности метода совпадает с временем формирования андезит-дацитового вулканизма и традиционно ассоциируется с магматической дугой в Рудном Алтае. Поскольку различные по степени кристалличности гранитоиды находятся на одном уровне эрозионного среза и локализованы среди толщ близковозрастных вулканитов, можно предположить их формирование в процессе тектонической эрозии. Геологическим свидетельством этому служат синхронные рост и повсеместное быстрое разрушение вулканических построек фамена [8].

Породы принадлежат к высоко- K_2O лейкогранитам ($SiO_2 = 74–78$ вес. %, $Na_2O + K_2O = 6.9–9$ вес. %, $Na_2O/K_2O = 0.7–1.2$; $K_2O = 3.3–4.9$ вес. %), известково-щелочного и щелочно-известковистого подтипов (*MALI*; $Na_2O + K_2O - CaO = 6.32–8.41$ вес. %), с варьирующими значениями A/CNK (0.9–1.2) и высоким Fe^* -индексом (0.84–0.97) (рис. 3 а–д) [3]. Вариации высокзарядных элементов (HFSEs; $Y + Nb = 30–120$ ppm, $Nb = 9–50$ ppm), крупноионных литофильных элементов (LILEs; $Rb = 77–295$ ppm, $Rb/Sr = 1–66$) и Ga/Al-отношений (1.27–3.28) имеют сродство с таковыми фракционированных гранитоидов (рис. 3 е–з).

Наклон нормированных к хондриту спектров редкоземельных элементов (REEs) варьирует от отрицательного в ранних фазах к положительному в поздних с нерегулярным обеднением легкими лантаноидами (LREEs) и обогащением тяжелыми лантаноидами (HREEs; $\Sigma_{REE} = 79–210$ ppm, $La/Yb_n = 0.7–6.4$) (рис. 3 к). В геохимических составах

наблюдается положительная корреляция между суммой REE и отношениями Eu/Eu^* , где $Eu^* = Eu_n / (Sm_n * Nd_n)^{1/2}$. Глубина Eu-аномалии и различие общей формы спектров (рис. 3 и) отличаются друг от друга гранитоиды главной ($Eu/Eu^* = 0.06–0.6$, HREEs = 12–40 ppm, $La/Yb_n = 1.7–6.4$) и поздних фаз ($Eu/Eu^* = 0.02–0.15$, HREEs = 25–51 ppm, $La/Yb_n = 0.7–3.6$). Врезка к рис. 3 иллюстрирует сходство спектров REEs двух групп с кислыми магмами надсубдукционных и рифтогенных обстановок [9], подчеркивая последовательность стадий тектогенеза и, вероятно, унаследованность условий частичного плавления. Негативная корреляция A/CNK и P_2O_5 (0.07–0.1 вес. %), от ранних фаз к поздним, соответствует эволюционному тренду гранитоидов I-типа (рис. 3 к). Породы относятся к низко- P_2O_5 подтипу ($P_2O_5 < 0.12$ вес. %, $Al_2O_3 < 14.5$ вес. %, $SiO_2 > 73$ вес. %, с высокими содержаниями REEs, Y, Th), продуктивному на Sn-, W- и Be-минерализацию (обзор в [10]). Нами не обнаружено свидетельств корово-мантийного взаимодействия: мафических включений, гипабиссальных интрузий базитового ряда, а также парных корреляций на бинарных диаграммах Харкера, что можно интерпретировать как смещение конечных членов двух контрастных магм.

Для уточнения петрогенезиса гранитоидов нами проведено изучение расплавных (РВ) и флюидных (ФВ) включений в кварце. В гранитах первой фазы РВ малочисленны, часто нарушены мелкими ФВ вторичной природы. В гранитах второй фазы, а также в аплитовидных дайках и пегматитах РВ схожи между собой, имеют размер 5–25 мкм и состоят из мелкозернистого кристаллического агрегата с газовым пузырьком (рис. 4). РВ расположены в кварце, заполненном мелкими вторичными ФВ, реже – в пределах чистых участков зерен. В кварце гранитов второй фазы и аплитовидных даек с РВ, вероятно, находятся сингенетичные им ФВ. Эти ФВ имеют размер до 2–5 мкм, они газовой-жидкие и однофазовые жидкие, многие расшнурованы. Свойства флюида невозможно определить из-за мелкого размера ФВ. С целью определения температуры гомогенизации РВ проведены массовые термометрические эксперименты с монофракциями кварца, выделенными из протолок проб ($n \sim 200$, фракция +0.5...1.0 мм). Прогревы проведены в автоклаве под давлением 1 кбар методом закалки по методике [11]. После прогрева кварца из перечисленных фаз гранитов и гранитных пегматитов при экспериментальных температурах 670 и 680°C обнаружены гомогенные

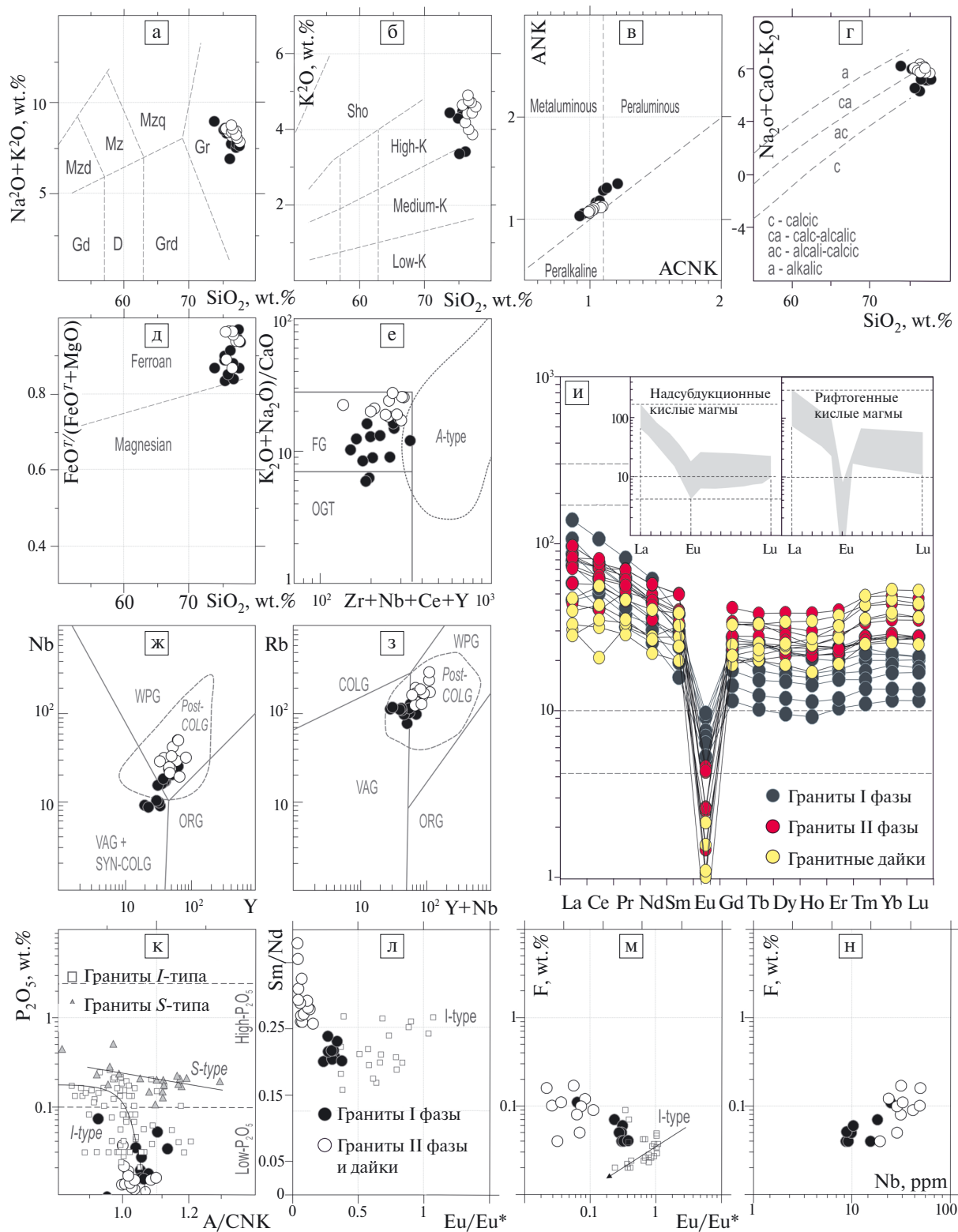


Рис. 3. (а–з) Дискриминационные петро- и геохимические диаграммы, дающие представление о генетическом типе изученных гранитоидов; (и) нормированные к хондриту спектры распределения REE в сравнении с таковыми эталонных типов гранитоидов надсубдукционных и рифтогенных обстановок, указанными на врезке [9]; (к–н) бинарные петрогенетические диаграммы с вариациями индикаторных элементов и их отношений. Составы гранитоидов I- и S-типа (Горного и Рудного Алтая) заимствованы из диссертационных работ д.г.-м.н. Н.Н. Крука и к.г.-м.н. М.Л. Куйбиды. Пояснение и ссылки на источник в тексте.

РВ, состоящие из стекла и газового пузырька. Поскольку кварц является ранним минералом, то приведенные значения, с определенной долей достоверности, указывают на верхнюю границу начала кристаллизации пород. Судя по наличию ФВ, сингенетичных с РВ, и газовой фазы в стекле РВ после экспериментов по гомогенизации, свободная флюидная фаза присутствовала в магме при кристаллизации кварца изученных гранитоидов. С насыщенностью магмы водой связана относительно невысокая температура кристаллизации кварца.

Особенностью составов гранит-лейкогранитов устьянского комплекса является положительная корреляция между Sm/Nd и Rb/Sr , что отвечает тренду фракционированных кислых магм ($Rb/Sr > 0.3$ [10]) и скорее обусловлено спецификой магмагенеза и/или эволюцией расплавов, чем геохимическим составом источника. Другой чертой является отрицательная корреляция парных отношений $Sm/Nd - Eu/Eu^*$ (рис. 3 л). Низкие Eu/Eu^* -значения могут являться следствием фракционирования полевых шпатов при эволюции сухих и высокотемпературных, а значит, более текучих магм [9]. Однако без должного

теплового эффекта не очевидна эффективность гравитационного отделения лейкократовых фаз в высоковязких кислых магмах с их низкой конвективной способностью и “неньютоновским” механизмом течения. Напротив, экспериментальное добавление фтора к гаплогранитной водной системе способствует расширению поля ликвидуса кварца, снижению температуры солидуса и вязкости расплава, способствуя его сегрегации [12]. Проблема источника фторсодержащих флюидов в верхнекоровом резервуаре и экстремальная химическая кинетика в областях магмогенерации рассматривалась рядом авторов, начиная с работ академика РАН Л.В. Таусона (1977). Согласно “флюидно-магматической” теории, обменные реакции с флюидной фазой (эманационная дифференциация) ведут к накоплению несовместимых элементов в остаточных расплавах, в том числе к фракционированию REEs, и к отделению F-комплексов с рудообразующими элементами [13]. Обсуждаемые гранитоиды являются флюорит-содержащими, от ранних фаз к поздним увеличивается содержание F (0.04–0.17 вес. %), с отрицательной корреляцией к Eu/Eu^* и CaO и положительной к SiO_2 и HFSEs (рис. 3 м, н). Наконец, широкие

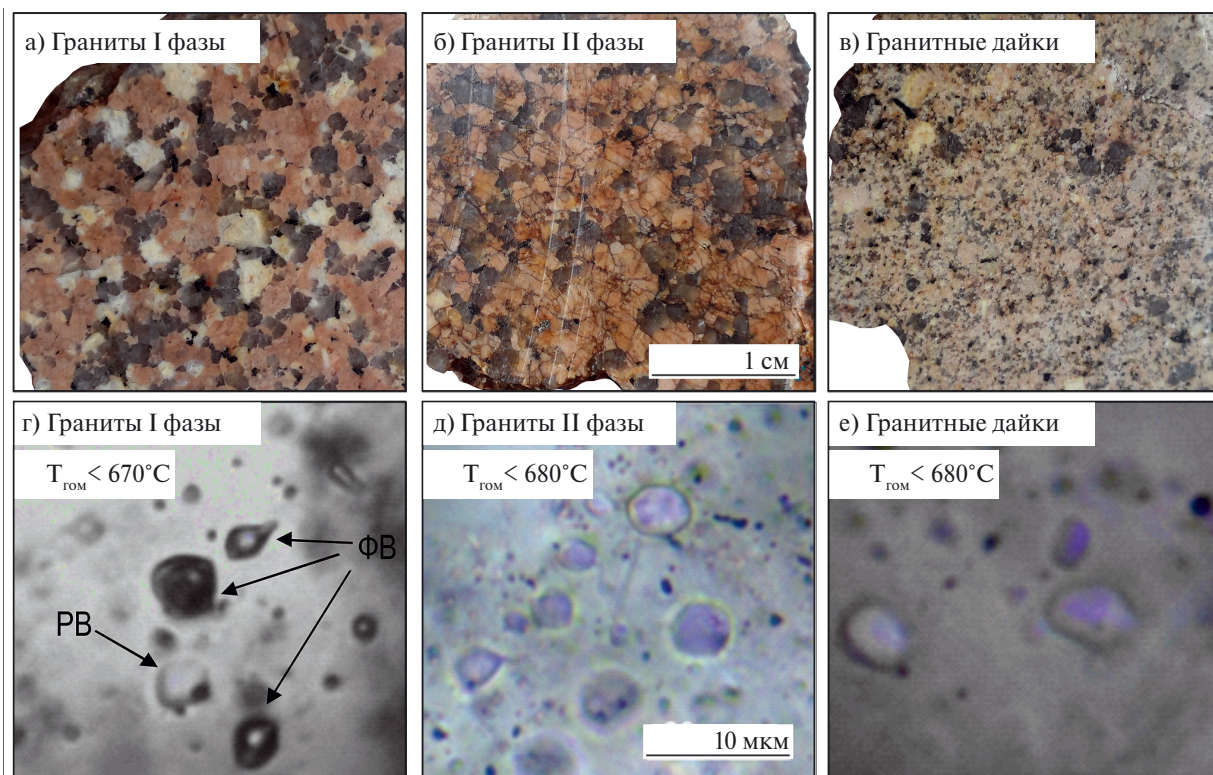


Рис. 4. (а–в) Представительные фотографии пластинок гранитоидов, использованных для термометрических экспериментов. (г–е) Фотографии прогретых расплавных и флюидных включений, с указанием температуры их гомогенизации.

вариации Sm/Nd отношений (0.2–0.38), наблюдаемые фактически в пределах единого гранитного поля, могут быть следствием не только смешения контрастных по составу магм, но и взаимодействия магм с флюидом [14], что косвенно подтверждается результатами геохронологических исследований, свидетельствующих о частичной нарушенности U–Pb-системы (см. выше).

Факторами, определяющими формирование структур активных окраин, являются геометрия, ориентировка и скорость движения континентальных и океанических литосферных плит на границах их взаимодействия. При этом в пределах единой геологической структуры в разноориентированных зонах могут реализоваться деформации различного характера. В частности, одна из моделей образования лейкогранитов вулcano-плутонических систем [15] рассматривает механизм экстракции обогащенных флюидом интерстициальных расплавов из частично закристаллизованного матрикса магматической камеры в условиях декомпрессии. В этой связи разломные зоны, ориентированные косо к окраине континента (аналог трещин Риделя), к которым приурочены интрузии лейкогранитов устьянского комплекса, как раз представляют собой области локального растяжения (декомпрессии), где была возможна экстракция не только флюидонасыщенного расплава из частично закристаллизованных магматических камер, но и флюида, выделившегося при метаморфизме вмещающих толщ. Этот флюид — еще один потенциальный источник кремнезема, редких элементов и фтора [16], а его взаимодействие с экстрагированными расплавами обусловило формирование специфичных высококремнистых и высококальциевых железистых гранитоидов, имеющих переходные субдукционные и рифтогенные геохимические характеристики. Такие процессы были локализованы исключительно в локальных зонах растяжения, в то время как магмы, образованные вне этих зон, дали начало обычным андезитам и дацитам с “островодужными” характеристиками. В целом же проявление подобных высококремнистых “красных” гранитов в окраинно-континентальных обстановках свидетельствует о нестабильности/инверсии геодинамического режима ([7, 17] и др.).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-07-00175).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bonin B., Janoušek V., Moyen J.F.* Chemical variation, modal composition and classification of granitoids // Geological Society, London, Special Publications. 2020. V. 491. No. 1. P. 9–51.
2. *Clemens J.D., Stevens G.* What controls chemical variation in granitic magmas? // Lithos. 2012. V. 134. P. 317–329.
3. *Frost C.D., Frost B.R., Beard J.S.* On silica-rich granitoids and their eruptive equivalents // American Mineralogist. 2016. V. 101. No. 6. P. 1268–1284.
4. *Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Руднев С.Н. и др.* Геодинамика и гранитоидный магматизм коллизионных орогенов // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 12. С. 1321–1338.
5. *Добрецов Н.Л.* Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 1–2. С. 5–27.
6. *Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.* Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 556–586.
7. *Крук Н.Н.* Континентальная кора Горного Алтая: этапы формирования и эволюции, индикаторная роль гранитоидов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 8. С. 1403–1423.
8. *Мурзин О.В.* Государственная геологическая карта Российской Федерации 1:200 000. Сер. Алтайская лист М-44-Х, XI. Объяснит. зап. СПб. 2001. 219 с.
9. *Bachmann O., Bergantz G.W.* Rhyolites and their source mushes across tectonic settings // Journal of Petrology. 2008. V. 49. No. 12. P. 2277–2285.
10. *Костицын Ю.А.* Накопление редких элементов в гранитах. Часть 1 // Природа. 2002. № 1. С. 21–30.
11. *Смирнов С.З., Томас В.Г., Соколова Е.Н. и др.* Экспериментальное исследование герметичности включений водосодержащих силикатных расплавов при внешнем давлении D2O при 650 С и 3 кбар // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 5. С. 690–703.
12. *Christiansen E.H., Lee D.E.* Fluorine and chlorine in granitoids from the Basin and Range province, western United States // Economic Geology. 1986. V. 81. No. 6. P. 1484–1494.
13. *Абрамов С.С.* Образование высокофтористых магм путем фильтрации флюида через кислые магмы: петрологические и геохимические свидетельства метамагматизма // Петрология. 2004. Т. 12. № 1. С. 22–45.
14. *Li X.C., Harlov D.E., Zhou M.F., Hu H.* Experimental investigation into the disturbance of the Sm-Nd iso-

- topic system during metasomatic alteration of apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2022. V. 330. P. 191–208.
15. *Chen C. Ding X., Li R., et al.* Crystal fractionation of granitic magma during its non-transport processes: A physics-based perspective // *Science China Earth Sciences*. 2018. V. 61. P. 190–204.
 16. *Cuney M., Barbey P.* Uranium, rare metals, and granulite-facies metamorphism // *Geoscience Frontiers*. 2014. V. 110. No. 5. P. 729–745.
 17. *Мартынов Ю.А., Ханчук А.И.* Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований Популярные // *Петрология*. 2013. Т. 21. № 1. С. 94–108.

LATE DEVONIAN CALC-ALKALINE HIGH-K FRACTIONATED “FERROAN” I-TYPE LEUCOGRANITES (RUDNY ALTAI)

Corresponding Member of the RAS **N. N. Kruk[#], M. L. Kuibida, E. N. Sokolova,
P. D. Kotler, V. A. Yakovlev**

Received November 20, 2023

After revision November 29, 2023

Accepted December 14, 2023

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: kruk@igm.nsc.ru*

The paper presents the geological, geochemical and isotope-geochronological studies of the Rudny Altai granitoids in the west of Central Asian Orogenic Belt (CAOB) – the front part of the Altai convergent margin of the Siberian continent. Isotopic U–Pb dating of zircons showed an age range from 367 to 363 Ma. Geochemical characteristics indicate the relevance of leucogranites to calc-alkaline high-K series ($\text{SiO}_2 > 73$ wt.%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.9\text{--}9$ wt.%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.7\text{--}1.2$), with calc-alkaline and alkaline-calcic affinities ($\text{MALI} = 6.32\text{--}8.41$). They bear meta- to weakly-peraluminous values ($\text{A/CNK} = 0.9\text{--}1.2$), high Fe^* index (0.84–0.97) and high fluorine (0.04–0.17 wt.%) content. Variations of HFSEs, LILEs contents, Ga/Al ratios and strong negative A/CNK- P_2O_5 correlation indicate their affinity with fractionated I-type granitoids. Rare metal (beryllium) mineralization is spatially and genetically related to leucogranites. It is assumed that the formation of granitoids was associated with shearing setting at the convergent margin of the Siberian continent, as a result of oblique subduction of the Irtysh-Zaisan ocean plate.

Keywords: Central Asian Orogenic Belt, Altai orogen, Ustyansky intrusive, transform margin, crustal-mantle interaction