

Изотопно-геохимический (Sm–Nd, Rb–Sr, REE, HFSE) состав Университетского фойдолит-габбрового плутона, Кузнецкий Алатау, Сибирь*

А. А. Мустафаев, И. Ф. Гертнер

Томский государственный университет,
Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

Для цитирования: Мустафаев, А. А., Гертнер, И. Ф. (2020). Изотопно-геохимический (Sm–Nd, Rb–Sr, REE, HFSE) состав Университетского фойдолит-габбрового плутона, Кузнецкий Алатау, Сибирь. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (4), 681–701. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.405>

Университетский фойдолит-габбровый плутон расположен среди кембрийских карбонатно-вулканогенных отложений. В его составе преобладают умеренно-щелочные и щелочные базиты, прорванные дайками ийолит-уртитов, нефелиновых и щелочных сиенитов. Химический состав магматических пород характеризуется пониженной кремнекислотностью ($\text{SiO}_2 = 41\text{--}49$ мас. %), широкими вариациями щелочности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3\text{--}19$ мас. %; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.2\text{--}7.2$ мас. %), низкой титанистостью ($\text{TiO}_2 = 0.07\text{--}1.59$ мас. %) и высокой глиноземистостью ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\text{--}28$ мас. %), что соответствует производным K–Na основной щелочной формации. По содержанию редкоземельных элементов щелочные породы ($104\text{--}246$ г/т; $\text{La}/\text{Yb}_{(n)} = 5.79\text{--}12.73$) являются более дифференцированными производными, чем габбро ($94\text{--}113$ г/т; $\text{La}/\text{Yb}_{(n)} = 6.87\text{--}6.95$). Для всех разновидностей характерны невысокие концентрации большинства высоkozарядных элементов (Nb, Ta, Zr, Hf, +Y), которые по уровню накопления находятся между базальтами океанических островов и базальтами островных дуг. Наличие отрицательной Nb–Ta-аномалии и относительное обогащение Rb, Ba, Sr и U свидетельствуют о вероятном взаимодействии вещества плюма с ранее сформированными аккреционными комплексами зон субдукции. Первичное изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\sim 0.705\text{--}0.706$) и широкий диапазон $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ от +3.2 до +8.7 в породах также указывают на мантийно-коровую природу и сложную геодинамическую обстановку палеозойского щелочного магматизма Кузнецкого Алатау. Полученные результаты Sm–Nd-датирования позволяют предполагать формирование умеренно-щелочных габброидов в раннем палеозое ($494\text{--}491 \pm 36$ млн лет) с внедрением даек щелочных пород среднепалеозойского возраста (394 ± 16 и 389 ± 37 млн лет).

Ключевые слова: субщелочной и щелочной магматизм, Sm–Nd и Rb–Sr изотопная геохронология, геохимия, мантийный плюм, аккреционный комплекс, Кузнецкий Алатау.

* Геохимические исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-35-90030). Изотопно-геохронологические исследования проведены на средства Российского научного фонда (проект № 18-17-00240). Уточнение геологического строения массива проведено на средства Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0721-2020-0041).

1. Введение

Щелочные породы извергаются во многих тектонических обстановках, но особенно они распространены в следующих зонах: 1) континентальные рифты (Pirajno, 2015); 2) внутриплитные области под воздействием мантийных плюмов (Condie, 2001; Богатиков и др., 2010; Yarmolyuk et al., 2014; Ernst, 2014; Vrublevskii et al., 2020); 3) внешние вулканические дуги или задуговые бассейны в результате субдукционных процессов; 4) границы плит, которые вовлечены в коллизию в пределах складчатых поясов при проявлении мантийного плюма (Яшина, 1982; Middlemost, 1997). Для проявления магматизма складчатых областей характерны признаки мантийно-корового взаимодействия (Doroshkevich et al., 2012; Vrublevskii et al., 2014; Gordienko and Metelkin 2016; Гордиенко, 2019), при котором выступает активная контаминация радиогенным стронцием с сохранением исходного мантийного материала по параметрам изотопов неодима (Покровский и др., 1998; Покровский, 2000; Ярмолюк и Коваленко, 2003; Yarmolyuk et al., 2013). В данном случае предполагается взаимодействие с захороненными солевыми горизонтами, обогащенными материалом «корового» стронция, однако мы не исключаем реальной ассимиляции мантийных магм материалом вмещающих карбонатных толщ. Термический потенциал плюма вполне способен расплавить вмещающие карбонатные толщи и мог способствовать обогащению глиноземом исходных мантийных магм (Гертнер и др., 2015). Однако существует альтернативный сценарий, в котором мантийно-сублитосферное взаимодействие легко приводит к отрицательным значениям изотопов неодима с сохранением контаминационных процессов радиогенного стронция (Ellam, 2006; Jourdan, 2007).

Мантийный плюм обычно рассматривается как сгусток относительно горячей, низкой плотности мантии, который поднимается от внешнего ядра к поверхности планеты из-за своей плавучести (Morgan, 1972; Condie, 2001; Кузьмин и Ярмолюк, 2016). В этом отношении он может проявлять гораздо большую «агрессивность», что допускает активное плавление материала литосферы и, собственно, вещества складчато-надвиговых структур в верхней коре.

Одним из примеров проявления щелочного магматизма может служить ареал изверженных пород Кузнецкого Алатау в западной части Центрально-Азиатского орогенического пояса (рис. 1, а) (Врублевский и др., 2016). Источники ювенильных расплавов характеризуются гетерогенностью, обусловленной плюм-литосферным взаимодействием с высококонцентрированными растворами, поступившими из вмещающих толщ Кузнецкого Алатау (Покровский и др., 1998). Под воздействием мантийной активности образовались небольшие по своим размерам (до 1–3 км²) дифференцированные щелочно-базитовые интрузивные массивы (рис. 1, б), сложенные в разных соотношениях умеренно-щелочным и щелочным габбро, основными и ультраосновными фойдолитами, нефелиновыми и щелочными сиенитами.

В результате полученных данных изотопно-геохронологических исследований (Sm-Nd, Rb-Sr, U-Pb, Ar-Ar) в Кузнецко-Алатауском ареале можно условно выделить три возрастных рубежа щелочных интрузий, соответствующих кембрию и раннему ордовику (510–480 млн лет), раннему и среднему девону (410–390 млн лет) и поздней перми (~265 млн лет) (Гертнер и др., 2013; Врублевский, 2015; Врублевский и др., 2016; Макаренко и Котельников, 2018; Vrublevskii et al., 2014;

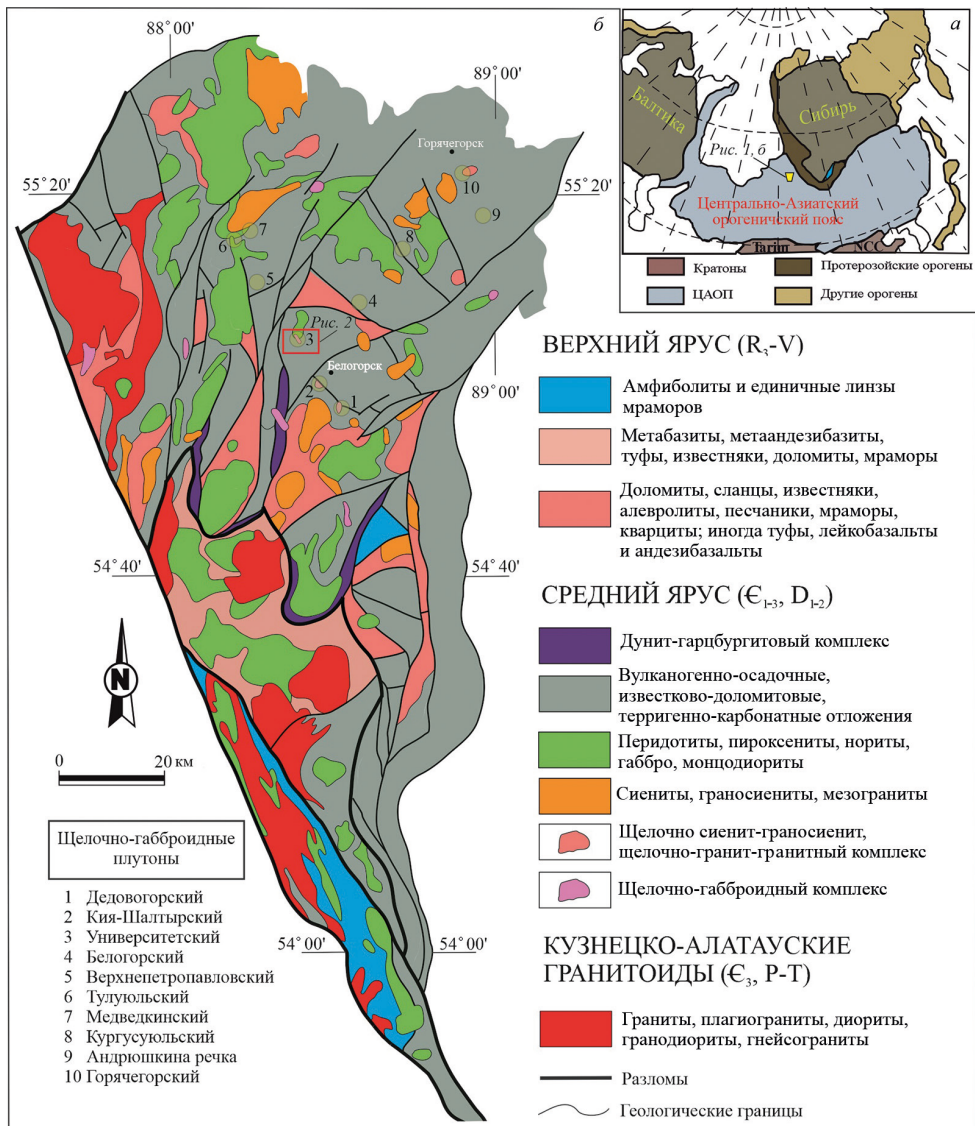


Рис. 1. Упрощенная схема Центрально-Азиатского орогенического пояса (а) по (Şengör et al., 1993; Jahn et al., 2000; Xiao and Santosh, 2014) с фрагментом геологической карты северной части Кузнецкого Алатау (б) по (Государственная..., 2007) с изменениями и дополнениями авторов. В красном прямоугольнике отмечено местонахождение территории, схема которой представлена на рис. 2

Vrublevskii et al., 2019; Mustafayev et al., 2017; 2019). Ранее считалось, что разный возраст магматизма отражает диахронность его проявления в разных частях этого региона. В частности, западный сектор соответствовал наиболее раннему его проявлению на границе кембрия — ордовика, центральный, включая Кия-Шалтырский интрузив, соответствовал раннему девону, а его восточный сектор отражал проявление позднепермского возраста (Гертнер и др., 2013). По предварительным результатам картирования считалось, что разнообразные породы повышенной щелочности Университетского плутона представляют собой единую щелочно-габ-

броидную серию ранне-среднедевонского времени становления (Есин и др., 1987; Осипов и др., 1989). Однако полученные новые изотопно-геохронологические (Sm–Nd, Rb–Sr) данные по умеренно-щелочным габбро (мелано- и лейкогаббро) регистрируют формирование массива в раннем палеозое с образованием интрузий щелочного состава (плагиоклазовый ийолит, анальцимовый сиенит) в среднепалеозойскую эпоху. Результаты геохимических исследований демонстрируют сложную геодинамическую обстановку внедрения расплавов с конвергентными признаками островодужного или окраинно-континентального и внутриплитного магматизма.

2. Геология и петрография пород Университетского плутона

Согласно геодинамическим реконструкциям, Кузнецкий Алатау представляет собой каледонский террейн, в составе которого преобладают аккреционные структурно-вещественные комплексы активной окраины Палеоазиатского океана (Kuzmin and Yarmolyuk, 2014). Длительная тектоническая эволюция привела к формированию наблюдаемого в современной структуре складчато-надвигового пояса с участием докембрийских и нижнепалеозойских комплексов, перекрытых наложенными среднепалеозойскими впадинами рифтогенной природы (Vrublevskii et al., 2014; Pirajno and Santosh, 2014).

Университетский плутон ($55^{\circ}04'$ с. ш., $88^{\circ}24'$ в. д.) находится в ~ 10 км к северо-западу от действующего нефелинового Кия-Шалтырского рудника (одноименного щелочно-габброидного массива). Он локализован в небольшом (~ 0.86 км²) эрозионном окне карбонатных отложений усть-кундатской или усинской свит предположительно раннекембрийского возраста, которые перекрываются вулканогенной толщей бериккульскими вулканитами среднего кембрия. Массив расположен в правом борту безымянного ручья, правого притока реки Кийский Шалтырь, в 200 метрах ниже устья ручья Воскресенка. Массив слабо обнажен и частично перекрыт крупно-глыбовыми делювиальными отложениями Воскресенского габбро-диорит-гранодиоритового плутона, слагающего одноименную вершину на водоразделе. Массив образует штокообразное тело (2.5×0.2 – 0.6 км, общей площадью ~ 0.53 км²) с тектоническими контактами (рис. 2).

По результатам магнитометрической съемки были установлены контуры массива. Геолого-поисковыми работами с применением открытых горных выработок (шурфы и каналы), а также картировочных скважин был диагностирован петрографический и химический состав данного объекта (Отчет..., 1987).

Помимо основных разновидностей в виде умеренно-щелочных габброидов и их субвулканических аналогов (умеренно-щелочных габбро-долеритов), были закартированы (Отчет..., 1987) жильные и дайковые тела ультраосновных фойдолитов (уртит-порфиоров, микроийолитов с включениями полнокристаллических уртитов и ийолит-порфиоров), основных фойдолитов (плагиоклазовых ийолитов с разной степенью кристаллизации с глобулами анальцимовых сиенитов), нефелиновых микро-сиенитов, камптонитов (включая их нефелин-содержащие разновидности типа тамараитов) и умеренно-щелочных плагиоклазовых порфиритов (Есин и др., 1987). В качестве самостоятельной интрузивной фазы предполагается позднее внедрение тела полевошпатовых ийолитов, диагностированное по геофизическим данным на правом берегу в верхнем течении указанного выше ручья. Его существование подтверждено

го звена между Кия-Шалтырским и Белогорским массивами (Гринева, 1987; Gertner et al., 2007; Врублевский и др., 2016; Mustafayev et al., 2017).

Петрографическое описание пород Университетского массива приведено только для основных разновидностей, по которым проводились геохимические и изотопно-геохронологические исследования (см. прил. 2.1, 2.2).

Умеренно-щелочное мелано- и лейкогаббро характеризуется светло-серой до темно-серой окраски, мелко-, средне- до крупнозернистой структуры и массивным сложением. Для меланогаббро текстурный рисунок имеет слабо проявленный такситовый облик и трахитоидный — для лейкократовой разности. В шлифах обнаруживаются структуры от гипидиоморфнозернистой до офитовой. В зависимости от разности количественного минералогического состава доля представленных пород варьирует следующим образом: плагиоклаз (An_{37-67}) — 35–66%, ферросалит (Fs_{10-14}) — 27–46%, оливин (Fo_{58-67}) — до 10%; из второстепенных минералов (~2%) присутствуют биотит, роговая обманка, титаномагнетит, апатит, серпентин и кальцит.

Лейкотералит с линзами полевошпатовых ийолитов. Светло-серая лейкократовая крупнозернистая порода с гипидиоморфнозернистой и пойкилоофитовой микроструктурами. Количественный минералогический состав представлен нефелином (Ks_{20-25}) — ~42%, салитом — ~37% и плагиоклазом (An_{50-55}) — ~19%. В качестве второстепенных минералов (~2%) присутствуют роговая обманка (крупные единичные зерна), биотит, титаномагнетит и апатит.

Плагиоклазовый ийолит по внешнему облику представлен мелко- и среднезернистой с темно-серой окраской и массивной или слабо такситовой породой меланократового облика. Под микроскопом наблюдается гипидиоморфнозернистая структура с более выраженным идиоморфизмом пироксена по отношению к силикатным минералам. При этом зерна нефелина присутствуют в качестве второй фазы кристаллизации. Минералогический состав: нефелин (Ks_{22}) — ~40%, ферросалит (Fs_{23}) — ~35%, плагиоклаз (An_{41-63}) — ~15% и титаномагнетит — до ~8%. Второстепенными минералами выступают роговая обманка, апатит, анальцим и кальцит.

Уртит-порфир обладает светло-серой окраской со слабым сероватым оттенком, с типичной порфировой структурой и массивной текстурой. Минеральный состав: нефелин (Ks_{19-20}) — ~80%, ферросалит (Fs_{23}) — ~15% и титаномагнетит — до ~4%. Второстепенные минералы (~1%): кальцит, апатит, эпидот, анальцим и хлорит.

Ксенолит уррита в ийолит-порфире представлен шлировыми выделениями полнокристаллических урритов светло-серой окраски, от мелко- до крупнозернистых структур с массивной текстурой. Под микроскопом ксенолит имеет апаитовую, а матрица ийолит-порфира микрогипидиоморфнозернистую структуры. Минеральный состав: нефелин (Ks_{20-25}) — ~65–80%, ферросалит (Fs_{22-26}) — ~18–33% с незначительной примесью (~2%) титаномагнетита. Второстепенные минералы — такие же, как и у уртит-порфира.

Анальцимовый сиенит (глобула) в плагиоклазовом мелкозернистом ийолите имеет окраску от светло-серой до темно-зеленой, мелкозернистую (основная масса) и среднезернистую (глобула) структуры и массивную текстуру. В шлифе глобула представлена трахитоидной текстурой с минеральным составом: анальцим — ~27%, щелочной полевой шпат — ~35%, амфибол — ~35%. Второстепенные минералы (~3%): апатит, сфен. В более мелких образованиях нередко фиксируются отдельные обособления эпидота и кальцита.

3. Аналитические методы

Концентрации петрогенных и редких рассеянных элементов измерялись в Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН (Новосибирск) методом РФА и в Томском государственном университете (Томск) методом ICP-MS на спектрометрах ARL-9900XP и Agilent 7500 соответственно. **Рентгенофлуоресцентный силикатный анализ** выполняется из плавленных таблеток: анализируемая проба сушится при 105 °С в течение 1.5 часов, затем прокаливается при 960 °С в течение 2.5 часов и затем смешивается с флюсом (66.67 % тетрабората лития; 32.83 % метабората лития и 0.5 % лития бромистого) в соотношении 1:9 (общий вес смеси составляет 5 г). Смесь плавится в платиновых тиглях в индукционной печи Lifumat-2.0-Ох по разработанной методике (Карманова и Карманов, 2011). Для выполнения **масс-спектрального анализа с индуктивно-связанной плазмой** образец массой 0.1 г обрабатывался 10 мл фтороводородной кислотой (HF) с 4-часовым выдерживанием в открытой системе при температуре ~70 °С, после чего добавлялось 2 мл концентрата азотной кислоты (HNO₃). Образцы подвергались микроволновому воздействию в закрытой системе при мощности 700 Вт с постепенным поднятием температуры до 200 °С. После этого образец выпаривался досуха, дважды обрабатывался 6.2 М HCl, затем вновь выпаривался и обрабатывался концентратом HNO₃, после чего сухой остаток переводился в 15%-й раствор HNO₃. В качестве внутреннего стандарта использовался индий. Непосредственно перед проведением ICP-MS-измерений образец разбавляли до концентрации азотной кислоты в 3%-м растворе. Фактор разбавления составил 1000 (Аношкина и др., 2012).

Sm-Nd- и Rb-Sr-изотопный анализ проводился в Геологическом институте Кольского научного центра РАН (Апатиты) на масс-спектрометрах Finnigan-MAT-262 (RPQ) и MI-1201-T в статическом режиме измерений по принятой методике (Серов и др., 2014). Измерения по стандарту JNdi-1 (Tanaka et al., 2000) составили $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512081 \pm 13$ (N = 11). Аналитическая ошибка (2σ) не превышает 0.5 % для $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$, 0.005 % для $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Изотопный состав Sr был нормализован к значениям стандарта NBS SRM-987 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710235$) (Steiger and Jäger, 1977). Ошибка в определении концентрации Sr — 0.04 % и Rb-Sr-отношения — 1.5 %. Для расчета первичных изотопных отношений ϵ_{Nd} , ϵ_{Sr} применялись современные параметры модельных резервуаров CHUR ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512630$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1960$) (Bouvier et al., 2008) и UR ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$; $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.0816$) (Фор, 1989). Построение изохрон осуществлялось методом Д. Йорка (York, 1966) по программе Isoplot/Ex (Ludwig, 2000).

4. Полученные результаты и выводы

4.1. Основные и микроэлементные составы пород Университетского плутона

Химический состав магматических пород характеризуется пониженной кремнекислотностью ($\text{SiO}_2 = 41\text{--}49$ мас. %), широкими вариациями щелочности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3\text{--}19$ мас. %; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.2\text{--}7.2$ мас. %), низкой титанистостью ($\text{TiO}_2 = 0.07\text{--}1.59$ мас. %) и высокой глиноземистостью ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\text{--}28$ мас. %), что соответствует производным К-На основной щелочной формации (см. рис. 3, а и прил. 2.3).

Петрохимическая аттестация и анализ распределения петрогенных оксидов в изученной нами петрографической ассоциации позволяет диагностировать в составе Университетского плутона производные трех серий: щелочно-ультраосновой (ксенолиты уртитов, ийолит-порфиры), щелочно-базитовой (плаггиоклазовые ийолиты, лейкотералиты) и субщелочно-базитовой (умеренно-щелочные габброиды, трахидиабазы, камптониты). Нефелиновые и щелочные сиениты, имеющие крайне незначительное распространение, могут интерпретироваться в качестве поздних дифференциатов, скорее всего щелочно-базитовой ассоциации.

Для более точной диагностики щелочных и умеренно-щелочных пород Университетского плутона средние количественно-минералогические составы основных разновидностей были вынесены на классификационную тройную диаграмму APF (рис. 3, б) (Le Maitre et al., 2002). На представленной диаграмме породы плутона по минералогическому составу разделяются на четыре группы: умеренно-щелочные габброиды, фойдолиты, сиениты и лейкотералиты, занимающие промежуточное положение между габброидами и фойдолитами.

Распределения лантаноидов в породах Университетского плутона характеризуются значениями $La/Yb_{(n)}$ и суммой редкоземельных элементов ΣREE (в умеренно-щелочных габбро $La/Yb_{(n)}=7$, $\Sigma REE=94-113$ г/т; в щелочных породах $La/Yb_{(n)}=6.87-12.73$, $\Sigma REE=104-246$ г/т) (см. прил. 2.4). По нормированию REE к хондриту (Sun and McDonough, 1989) для всех спектров фиксируется обогащение легких редкоземельных элементов LREE относительно тяжелых редкоземельных элементов HREE.

Умеренно-щелочное габбро массива по характеру распределения REE имеет не столь значимые различия. Тем не менее в лейкократовом габбро (обр. 41/87.0) уровень фракционирования REE несколько ниже, чем в меланократовой (обр. 36/147.0) разновидности. Анальцимовый сиенит занимает промежуточное положение между габброидами и фойдолитами (обр. 7А, $La/Yb_{(n)}=10.05$, REE = 138.09 г/т). В фойдолитах фиксируется возрастание отношения $La/Yb_{(n)}$ от плаггиоклазового ийолита (обр. 6А, $La/Yb_{(n)}=5.79$) к уртит-порфиру (обр. УН-1, $La/Yb_{(n)}=8.9$) и далее к ксенолиту уррита в ийолит-порфире (обр. КС-7/1, $La/Yb_{(n)}=12.73$). Для спектра лейкотералита (обр. 8А, $La/Yb_{(n)}=7.37$, REE = 245.97 г/т) отмечается максимальное содержание REE на уровне базальтов океанических островов ОИВ (рис. 4, а). Сопоставление главных разновидностей пород массива по REE обнаруживает близкое распределение как по уровню накопления, так и по уровню фракционирования. Среди отличий следует подчеркнуть положительную европиевую для лейкогаббро ($Eu/Eu^* = +1.26$) и анальцимового сиенита ($Eu/Eu^* = +1.31$) аномалию, что возможно объясняется кумулятивной сегрегацией плаггиоклаза как ранних фаз кристаллизации соответствующих расплавов.

На мультиэлементных спектрах (рис. 4, б) демонстрируются невысокие концентрации большинства несовместимых элементов HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf, +Y). По содержанию LREE щелочно-габброидная ассоциация Университетского плутона является более обогащенной, чем средний состав базальтов островных дуг IAB (Kelemen et al., 2003), а по HREE обнаруживает с ними сходство.

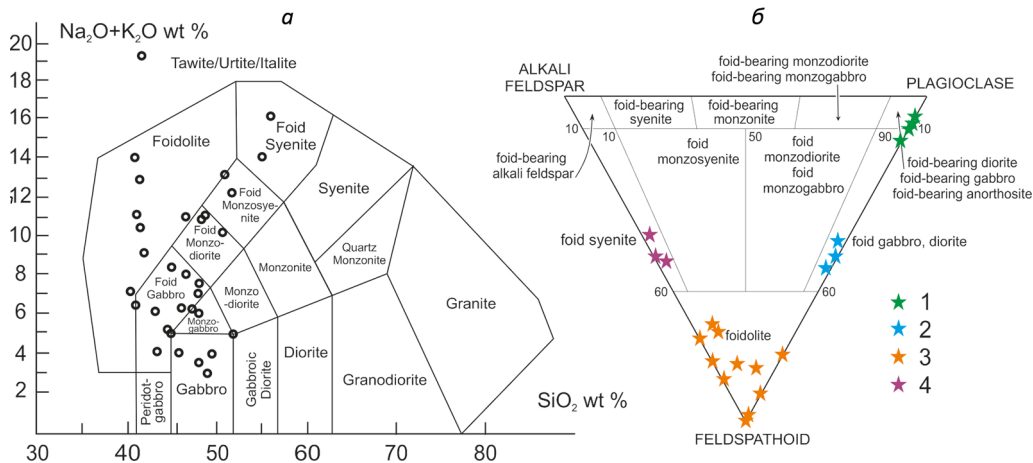


Рис. 3. Петрохимическая типизация силикатных пород Университетского плутона: а — на (TAS)-диаграмме классификационные поля приведены по (Middlemost, 1994); б — классификация плутонических пород в системе (APF) согласно модальному содержанию минералов в объемных процентах по (Le Maitre et al., 2002).

Звездами обозначены: 1 — умеренно-щелочные габбро и умеренно-щелочные габбро-долериты; 2 — лейкотералиты; 3 — фойдолиты; 4 — нефелиновые и щелочные сиениты

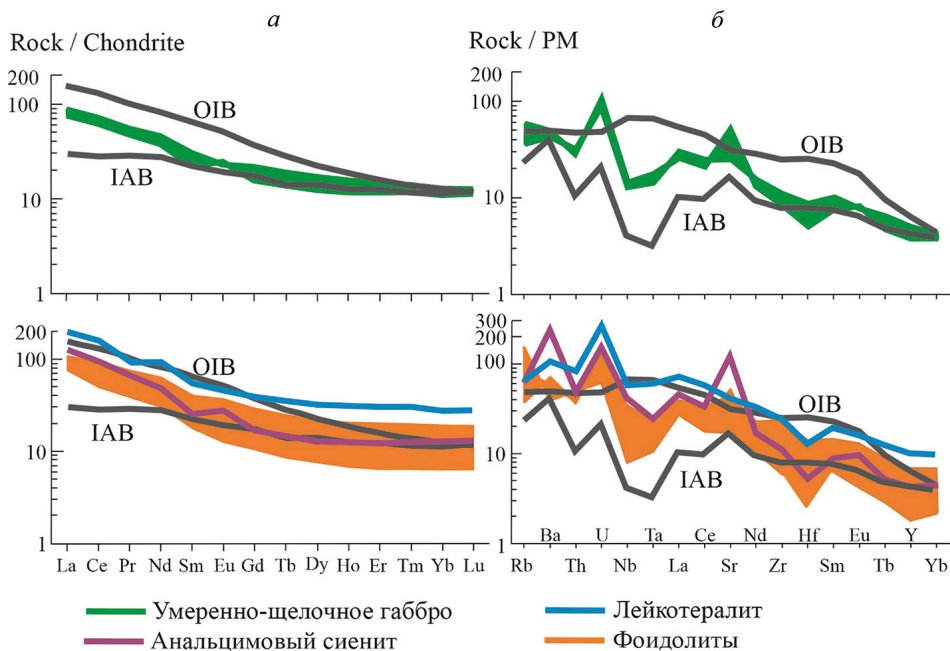


Рис. 4. Распределение редкоземельных (REE) (а) и несовместимых элементов (HFSE) (б) в породах Университетского плутона.

Содержания элементов нормированы по хондриту (Chondrite) и примитивной мантии (PM) (Sun and McDonough, 1989). Нанесены спектры средних составов (линии серого цвета) базальтов океанических островов OIB (Sun and McDonough, 1989) и базальтов островных дуг IAB (Kelemen et al., 2003)

4.2. Sm–Nd- и Rb–Sr-изотопный анализ

Sm–Nd-изохроны, построенные по минералам из умеренно-щелочных габбро (меланогаббро 494 ± 36 млн лет; лейкогаббро 491 ± 36 млн лет) соответствуют верхнему кембрию. Подобное проявление щелочного магматизма в данном регионе отвечало исключительно северо-западному сектору Кузнецкого Алатау и было установлено для щелочно-габброидной ассоциации Верхнепетропавловского плутона. Построенные изохроны по минералам из щелочных пород (плагноклазовый ийолит 394 ± 16 млн лет; анальцимовый сиенит 389 ± 37 млн лет) отвечают среднему девону (рис. 5) (Mustafayev et al., 2019). Можно предполагать, что внедрение даек щелочного состава Университетского плутона происходило на протяжении девона (419–358 млн лет), которые соответствуют главной фазе проявления фойдолитов в данном секторе региона. Согласно последним геохронологическим исследованиям, формирование щелочно-базитовых плутонов на территории северной части Кузнецкого Алатау длилось в широком временном интервале (510–265 млн лет) (Гертнер и др., 2013; Врублевский, 2015; Врублевский и др., 2016; Макаренко и Котельников, 2018; Vrublevskii et al., 2014; Vrublevskii et al., 2019; Mustafayev et al., 2017; 2019).

Чтобы с большей вероятностью обосновать временной рубеж происхождения и более точно оценить реконструкцию формирования Университетского плутона

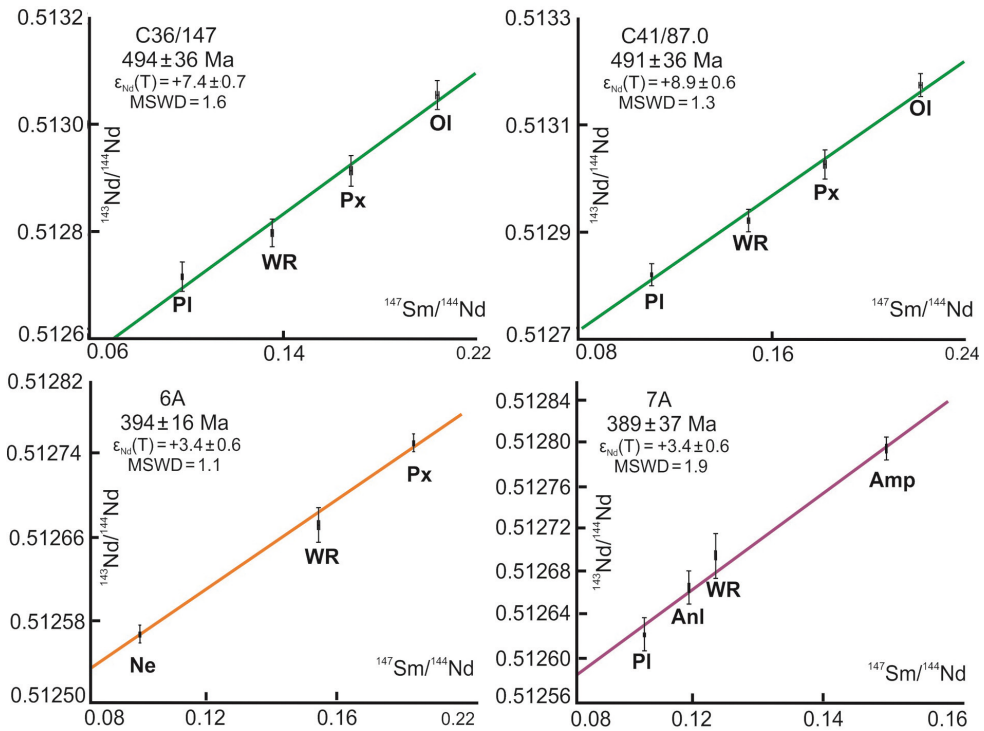


Рис. 5. Sm–Nd-минеральные изохроны по умеренно-щелочным габбро, плагноклазовому ийолиту и анальцимовому сиениту Университетского плутона.

Номера образцов, буквенные обозначения пород и их минералов см. в прил. 2.5

в Кузнецко-Алатауском террейне, который является мозаикой более крупной структуры на Земле, а именно Центрально-Азиатского орогенического пояса, планируется провести дополнительные изотопные исследования методами Rb-Sr и U-Pb.

5. Источники вещества интрузий

Щелочно-габброидная ассоциация Университетского плутона, а также других представителей Кузнецкого Алатау, анализируемая в этом исследовании, имеет коровую $\epsilon_{Sr}(T)$ (от +3.13 до +28.31) и мантийную $\epsilon_{Nd}(T)$ (от +1.74 до +8.7) изотопные сигнатуры (рис. 6) (Vrublevskii et al., 2014; Врублевский, 2015; Врублевский и др., 2016). Все образцы магматических пород изученной провинции имеют широкую изменчивость радиогенного стронция относительно мантийной последовательности в сторону значений радиогенного стронция, что является следствием коровой контаминации. Повышенные концентрации стронция в породах косвенно указывают на вероятность поступления в магму дополнительных количеств стронция из осадочных толщ Кузнецкого Алатау (Покровский и др., 1998; Покровский, 2000). Учитывая масштабы контаминационных процессов, можно предположить, что

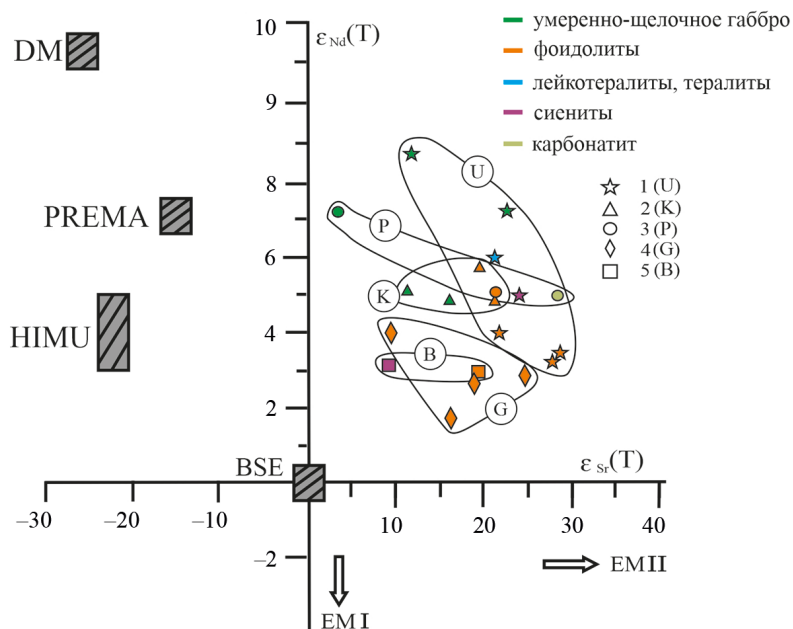


Рис. 6. Изотопный состав Sr и Nd в породах щелочно-базитовых плутонов Кузнецкого Алатау:

1 — Университетский (U), 2 — Кия-Шалтырский (K) (Vrublevskii et al., 2014), 3 — Верхнепетропавловский (P) (Врублевский, 2015), 4 — Горячегорский (G), 5 — Белогорский (B) (Врублевский и др., 2016).

Положение резервуаров DM (деплетированная мантия), PREMA (преобладающая мантия), HIMU (мантия с высоким соотношением U/Pb), BSE (валовый состав силикатной земли), EM I и EM II (два типа обогащенной мантии, характеризующиеся высокими значениями $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) приведены в соответствии с их современными изотопными параметрами (Zindler and Hart, 1986)

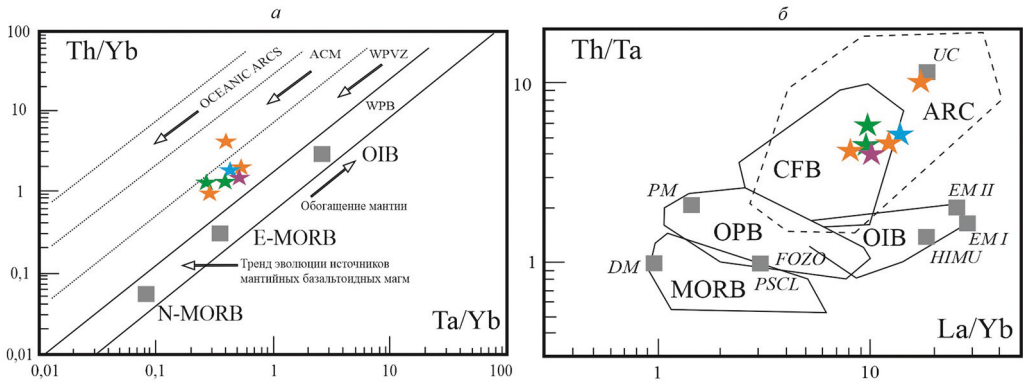


Рис. 7. Соотношения несовместимых элементов в породах Университетского плутона:

а — диаграмма Th/Yb-Ta/Yb (Gorton and Schandl, 2000): Oceanic arcs (океанические острова), ACM (активная континентальная окраина), WPVZ (внутриплитная вулканическая зона), WPB (внутриплитный базальт), OIB (базальт океанического острова), E-MORB (обогащенный базальт срединно-океанического хребта), N-MORB (нормальный базальт срединно-океанического хребта). Значения для мантийных источников приведены по (Sun and McDonough, 1989);

б — диаграмма Th/Ta-La/Yb (Tomlinson and Condie, 2001; Ernst and Buchan, 2003): MORB (базальт срединно-океанического хребта), OIB (базальт океанического острова), CFB (континентальный базальт), OPB (базальт океанического плато), ARC (базальт зоны субдукции). Мантийные резервуары: EM I (обогащенная мантия $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$), EM II (обогащенная мантия $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), HIMU (мантия с высоким соотношением U/Pb), DMM (деплетированная мантия базальтов срединно-океанических хребтов) и FOZO (фокусная зона). Дополнительные компоненты PM (примитивная мантия), PSCL (постаршейская субконтинентальная литосфера) и UC (верхняя часть континентальной коры)

первичным источником могло быть вещество из плюмовой умеренно деплетированной мантии типа PREMA, которое взаимодействовало с компонентами континентальной коры.

Поведение REE и HFSE в породах Университетского плутона позволяет предположить гетерогенность источников вещества. Несмотря на разную степень дифференцированности расплавов ($\text{La}/\text{Yb}_{(n)} = 6.87\text{--}12.73$) геохимические параметры отражают совместное участие в магмогенезе компонентов OIB и IAB. Смешивание этих компонентов также отмечается для ряда ранне- и среднепалеозойских щелочно-базитовых интрузий Кузнецкого Алатау, происхождение которых связывается с процессами плюм-литосферного взаимодействия и унаследованностью геохимических признаков субдукционных магматических комплексов в продуктах мантийного диапиризма (Врублевский, 2015; Врублевский и др., 2016; 2018, Макаренко и Котельников, 2018). Смещение фигуративных точек составов (Th-Yb-Ta на рис. 7, *а*) в сторону промежутка внутриплитной вулканической зоны (WPVZ) и активной континентальной окраины (ACM) демонстрирует сложную эволюцию щелочно-базальтоидных магм в условиях воздействия вещества плюма на сформировавшуюся зону континентальной коры. Как видно на графике зависимости (Th/Ta-La/Yb на рис. 7, *б*), фигуративные точки пород массива находятся в промежуточном поле континентальных базальтов (CFB), базальтов зон субдукции (ARC) со смещением в сторону обогащенной мантии. Отрицательные (Nb, Ta, Zr, Hf) аномалии и обогащение подвижными элементами вероятных флюидов (Rb, Sr, Ba и U) в породах изученной ассоциации свидетельствуют о вероятном взаимодействии вещества плюма с ранее сформированными аккреционными комплексами зон субдукции.

В Центрально-Азиатском складчатом поясе регистрируется конвергенция и взаимодействие между различными типами орогенных компонентов, включая системы японского типа, марианского типа и аляскинского-алеутского типа дуговых систем, а также активных континентальных окраин Сибирского кратона, которые подразумевают широкие аккреционные комплексы и аккрецированные дуги и террейны (Xiao and Santosh, 2014). В Кузнецко-Алатауском террейне могут быть пространственно совмещены разноформационные проявления субдукционного и плюмового магматизма, имеющие признаки смешения вещества из гетерогенных источников (Izokh et al., 2008; Врублевский и др., 2018).

6. Заключение

1. Для всех щелочно-базитовых представителей северного склона Кузнецкого Алатау и изученного нами Университетского плутона характерны невысокие концентрации большинства HFSE (Nb, Ta, Zr, Hf, +Y), обычно не превышающие уровня OIB, но отражающие сходство с IAB. При свойственной им высокой глиноземистости наблюдаемые соотношения несовместимых компонентов на фоне относительного обогащения Rb, Ba, Sr и U подчеркивают, по-видимому, сложную геодинамическую обстановку их формирования с признаками островодужного, окраинно-континентального и внутриплитного магматизма.

2. На основании полученных нами возрастных датировок вероятное становление массива оценивается в 494–491 млн лет, который прорывали дайки щелочного состава с возрастом 394–389 млн лет. Широкая сигнатура ($\epsilon_{Nd}(T)$ от +1.74 до +8.7 и $\epsilon_{Sr}(T)$ от +3.43 до +36.6) изотопного состава изученной ассоциации свидетельствует о генерации исходных магм из плюмового источника умеренно деплетированной мантии типа PREMA, производные которых испытали селективную коровую контаминацию.

Благодарность

Авторы признательны сотрудникам Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск) за многолетнее участие в экспедициях, аналитических исследованиях и консультации по вопросам магматической петрологии и изотопной геохимии, а также коллегам из Геологического института КНЦ РАН (Апатиты) и Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН (Новосибирск).

Авторы благодарны двум анонимным рецензентам за проявленное терпение, конструктивную критику и участие в обсуждении полученных результатов.

Литература

Аношкина, Ю. В., Асочакова, Е. М., Бухарова, О. В., Тишин, П. А. (2012). Усовершенствование схем химической пробоподготовки углеродистых пород с последующим анализом высокозарядных элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. *Вестник ТГУ*, 359, 178–181. Доступно на: <https://cyberleninka.ru/article/n/usovershenstvovanie-shem-himicheskoy-probopodgotovki-uglerodistyh-porod-s-posleduyuschim-analizom-vysokozaryadnyh-elementov-metodom/viewer> [Дата доступа 16.11.2020].

- Богатиков, О. А., Коваленко, В. И., Шарков, Е. В. (2010). *Магматизм, тектоника и геодинамика Земли*. Москва: Наука. Доступно на: <http://www.geokniga.org/books/1051> [Дата доступа 16.11.2020].
- Врублевский, В. В. (2015). Источники и геодинамические условия петрогенезиса Верхнепетропавловского щелочно-базитового интрузивного массива (средний кембрий, Кузнецкий Алатау, Сибирь). *Геология и геофизика*, 56 (3), 488–515. <https://doi.org/10.15372/GiG20150302>
- Врублевский, В. В., Гринев, О. М., Изох, А. Э., Травин, А. В. (2016). Геохимия, изотопная (Nd-Sr-O) триада и ^{40}Ar - ^{39}Ar возраст палеозойских щелочно-мафитовых интрузий Кузнецкого Алатау (на примере Белогорского плутона). *Геология и геофизика*, 57 (3), 592–602. <https://doi.org/10.15372/GiG20160308>
- Врублевский, В. В., Котельников, Д. А., Изох, А. Э. (2018). Возраст, петрологические и геохимические условия формирования Когтахского габбро-монцититового комплекса Кузнецкого Алатау. *Геология и геофизика*, 59 (7), 900–930. <https://doi.org/10.15372/GiG20180702>
- Гертнер, И. Ф., Врублевский, В. В., Тишин, П. А. и др. (2013). Временные рубежи, источники магм и формационный статус палеозойских фельдшпатоидных интрузий Северо-Востока Кузнецкого Алатау. *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*, 11, 71–73.
- Гертнер, И. Ф., Врублевский, В. В., Краснова, Т. С. (2015). Эволюция высокоглиноземистого щелочного магматизма в Центрально-Азиатском складчатом поясе. *КИП, мантийные плюмы и металлогения в истории Земли*. Иркутск. Доступно на: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000525413/SOURCE1> [Дата доступа 16.11.2020].
- Гордиенко, И. В. (2019). Связь субдукционного и плюмового магматизма на активных границах литосферных плит в зоне взаимодействия Сибирского континента и Палеоазиатского океана в неопротерозое и палеозое. *Геодинамика и тектонофизика*, 10 (2), 405–457. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0420>
- Государственная геологическая карта Российской Федерации*. (2007). Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист N-45 (Новокузнецк). Г. А. Бабин, А. А. Юрьев, А. И. Бычков и др. Санкт-Петербург. КФ ВСЕГЕИ. Доступно на: http://www.vsegei.com/ru/info/pub_ggk1000-3/Altae-Sayanskaya/n-45.php [Дата доступа 16.11.2020].
- Гринев, О. М. (1987). Геология и петрография Белогорского щелочно-габброидного массива. *Щелочные и субщелочные породы Кузнецкого Алатау*, 43–62.
- Есин, С. В., Корчагин, С. А., Есина, О. А., Гертнер, И. Ф. (1987). Нефелиновые рудоносные породы участков Университетский 1 и 2 (Кузнецкий Алатау). *Щелочные и субщелочные породы Кузнецкого Алатау*, 74–82.
- Карманова, Н. Г., Карманов, Н. С. (2011). Универсальная методика рентгенофлуоресцентного силикатного анализа горных пород на спектрометре ARL-9900XP. В: *Всероссийская конференция по рентгеноспектральному анализу*. Вып. 7. Новосибирск, ИГМ СО РАН.
- Кузьмин, М. И., Ярмолюк, В. В. (2016). Тектоника плит и мантийные плюмы — основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет. *Геология и геофизика*, 57 (1), 11–30. <https://doi.org/10.15372/GiG20160102>
- Макаренко, Н. А., Котельников, А. Д. (2018). Кашпарский кембро-ордовикский габбро-диорит-кварцмонцодиорит-сиенитовый комплекс — новое петрографическое подразделение на восточном склоне Кузнецкого Алатау. *Геосферные исследования*, 2, 52–71. <https://doi.org/10.17223/25421379/7/4>
- Покровский, Б. Г., Андреева, Е. Д., Врублевский, В. В., Гринев, О. М. (1998). Природа контаминации щелочно-габброидных интрузий южного обрамления Сибирской платформы по данным изотопии стронция и кислорода. *Петрология*, 6 (3), 259–273.
- Покровский, Б. Г. (2000). *Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии*. Москва: Наука. Доступно на: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_259 [Дата доступа 16.11.2020].
- Осипов, П. В., Макаренко, Н. А., Корчагин, С. А., Гертнер, И. Ф., Гринев, О. М. (1989). Новый щелочно-габброидный рудоносный массив в Кузнецком Алатау. *Геология и геофизика*, 11, 79–82.
- Отчет по поискам природно богатых и легкообогатимых нефелиновых руд в пределах участков Университетские 1 и 2, Воскресенка и Безымянка, проведенных Мартайгинской экспедицией в 1983–1987 гг.* (1987). С. А. Корчагин и И. Ф. Гертнер, Новокузнецк, Россия.
- Серов, П. А., Екимова, Н. А., Баянова, Т. Б., Митрофанов, Ф. П. (2014). Сульфидные минералы — новые геохронометры при Sm-Nd датировании рудогенеза расслоенных мафит-ультрамафито-

- вых интрузий Балтийского щита. *Литосфера*, 4, 11–21. Доступно на: <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/418/417> [Дата доступа 16.11.2020].
- Фор, Г. (1989). *Основы изотонной геологии*. Москва: Мир. Доступно на: <http://www.geokniga.org/books/116> [Дата доступа 16.11.2020].
- Ярмолюк, В. В., Коваленко, В. И. (2003). Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Петрология*, 11 (6), 556–586.
- Яшина, Р. М. (1982). Щелочной магматизм складчато-глыбовых областей (на примере южного обрамления Сибирской платформы). О. А. Богатиков, под ред., Москва: Наука.
- Bouvier, A., Vervoort, J. D. and Patchett, P. J. (2008). The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet. Sci. Letters*, 273 (1–2), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Condie, K. C. (2001). *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*. Cambridge, UK. Доступно на: <http://www.geokniga.org/books/10617> [Дата доступа 16.11.2020].
- Doroshkevich, A. G., Ripp, G. S., Izbrodin, I. A. and Savatenkov, V. M. (2012). Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data. *Lithos*, (152), 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>
- Ellam, R. M. (2006). New constraints on the petrogenesis of the Nuanetsi picrite basalts from Pb and Hf isotope data. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.004>
- Ernst, R. E. and Buchan, K. L. (2003). Recognizing Mantle Plumes in the Geological Record. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 469–523. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.145500>
- Ernst, R. E. (2014). *Large igneous Provinces*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>
- Gertner, I. F., Vrublevskii, V. V., Voitenko, D. N. et al. (2007). Plume-related alkaline basic magmatism of the Kuznetsk Alanau: The Goryachegorsk complex. *Magmatism and metallogeny of the Altai and adjacent large igneous provinces with an introducing essay on the Altaids*. UK, London: CERCAMS/NHM, 141–153.
- Gordienko, I. V. and Metelkin, D. V. (2016). The evolution of the subduction zone magmatism on the Neoproterozoic and Early Paleozoic active margins of the Paleasian Ocean. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.005>
- Gorton, M. P. and Schandl, E. S. (2000). From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineral*. 38, 1065–1073. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Izokh, A. E., Polyakov, G. V., Shelepaev, R. A., Vrublevskii, V. V., Egorova, V. V., Rudnev, S. N., Lavrenchuk, A. V., Borodina, E. V. and Oyunchimeg, T. (2008). Early Paleozoic Large Igneous Province of the Central Asia Mobile Belt. *Large Igneous Province Commission*. Доступно на: <http://www.largeigneousprovinces.org/08may> [Дата доступа 16.11.2020].
- Jahn, B.-M., Wu, F. Y. and Chen, B. (2000). Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23 (2), 82–92. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2000/v23i2/001>
- Jourdan, F., Bertrand, H., Scharer, U., Blichert-Toft, J., Feraud, G. and Kampunzu, A. B. (2007). Major and Trace Element and Sr, Nd, Hf, and Pb Isotope Compositions of the Karoo Large Igneous Province, Botswana–Zimbabwe: Lithosphere vs Mantle Plume Contribution. *Journal of Petrology*, 48 (6), 1043–1077. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm010>
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K. and Greene, A. R. (2003). One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 593–659. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03035-8>
- Kuzmin, M. A. and Yarmolyuk, V. V. (2014). Mantle plumes of Central Asia (Northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 55, 120–143. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.002>
- Le Maitre, M. J., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J. et al. (2002). *Igneous Rocks*. UK: Cambridge University Press. Доступно на: https://www.researchgate.net/publication/234448684_Igneous_Rocks_A_Classification_and_Glossary_of_Terms [Дата доступа 16.11.2020].
- Ludwig, K. R. (2000). *User's manual for Isoplot/Ex, Version 2.2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication. Доступно на: <http://www.geo.cornell.edu/geol/classes/Geo656/Isoplot%20Manual.pdf> [Дата доступа 16.11.2020].

- Middlemost, E. A. K. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37, 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Middlemost, E. A. K. (1997). *Magmas, Rocks and Planetary Development*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781315843698>
- Morgan, W. J. (1972). Deep mantle convection plumes and plate motions. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 56, 203–213. Доступно на: <http://www.mantleplumes.org/WebDocuments/Morgan1972.pdf> [Дата доступа 16.11.2020].
- Mustafayev, A. A., Gertner, I. F. and Serov, P. A. (2017). Features of geology and composition of rocks from the alkaline-gabbroic University massif (N-E Kuznetsky Alatau ridge, Siberia). *Earth and Environmental Science*, 319, 012026. Доступно на: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/110/1/012016/meta> [Дата доступа 16.11.2020].
- Mustafayev, A. A., Gertner, I. F. and Serov, P. A. (2019). New Sm-Nd isotopic data on the University alkaline-gabbro massif (NE Kuznetsk Alatau). *LIP through earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues*, 90–92. Доступно на: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41503143> [Дата доступа 16.11.2020].
- Pirajno, F. and Santosh, M. (2014). Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview. *Ore Geology Reviews*, 63, 265–295. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.014>
- Pirajno, F. (2015). Intracontinental anorogenic alkaline magmatism and carbonatites, associated mineral systems and the mantle plume connection. *Gondwana Research*, 01328. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.008>
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A. and Burtman, V. S. (1993). Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia *Nature*, 364, 299–306. Доступно на: https://www.researchgate.net/publication/31960368_Evolution_of_the_Altaid_Tectonic_collage_and_Palaeozoic_Crustal_Growth_in_Eurasia [Дата доступа 16.11.2020].
- Steiger, R. H. and Jager, E. (1977). Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36 (3), 359–362. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7)
- Sun, S. and McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins*, 42, 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Tanaka, T., Togashi, S., Kamioka, H. et al. (2000). JNd1-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168, 279–281. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00198-4)
- Tomlinson, K. Y. and Condie, K. C. (2001). Archean mantle plumes: evidence from greenstone belt geochemistry. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 352, 341–358. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2352-3.341>
- Vrublevskii, V. V., Gertner, I. F., Gutiérrez-Alonso, G., Hofmann, M., Grinev, O. M. and Tishin, P. A. (2014). Isotope (U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr) geochronology of alkaline basic plutons of the Kuznetsk Alatau. *Russian Geology and Geophysics*, 55 (11), 1598–1614. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.10.002>
- Vrublevskii, V. V., Gertner, I. F., Ernst, R. E., Izokh, A. E. and Vishnevskii, A. V. (2019). The Overmarat-Gol Alkaline Pluton in Northern Mongolia: U–Pb Age and Preliminary Implications for Magma Sources and Tectonic Setting. *Minerals*, 9 (3), 170. <https://doi.org/10.3390/min9030170>
- Vrublevskii, V. V., Nikiforov, A. V., Sugorakova, A. M. and Kozulina, T. V. (2020). Petrogenesis and tectonic setting of the Cambrian Kharly alkaline–carbonatite complex (Sangilen Plateau, Southern Siberia): Implications for the Early Paleozoic evolution of magmatism in the western Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 188, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104163>
- Xiao, W. and Santosh, M. (2014). The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth. *Gondwana Research*, 25, 1429–1444. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2014.01.008>
- Yarmolyuk, V. V., Kuzmin, M. I. and Vorontsov, A. A. (2013). West Pacific-type convergent boundaries and their role in the formation of the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics*, 54, 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.012>
- Yarmolyuk, V. V., Kuzmin, M. I. and Ernst, R. E. (2014). Intraplate Geodynamics and Magmatism in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Asian Earth Sci.*, 93, 158–179. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.07.004>

York, D. (1966). Least squares fitting of straight line. *Canad. J. Phys.*, 44 (5), 1079–1086. <https://doi.org/10.1139/p66-090>

Zindler, A. and Hart, S.R. (1986). Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14, 493–571. <http://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>

Статья поступила в редакцию 12 мая 2020 г.
Статья рекомендована в печать 12 октября 2020 г.

Контактная информация:

Мустафаев Агабаба Асланович — alishka010593@gmail.com

Гертнер Игорь Федорович — labspm@ggf.tsu.ru

Isotope-geochemical (Sm–Nd, Rb–Sr, REE, HFSE) composition of the University foidolite-gabbro pluton, Kuznetsk Alatau ridge, Siberia*

A. A. Mustafaev, I. F. Gertner

Tomsk State University,
36, pr. Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

For citation: Mustafaev, A. A., Gertner, I. F. (2020). Isotope-geochemical (Sm–Nd, Rb–Sr, REE, HFSE) composition of the University foidolite-gabbro pluton, Kuznetsk Alatau ridge, Siberia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (4), 681–701. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.405> (In Russian)

The University foidolite-gabbro pluton is located among the Cambrian carbonate-volcanogenic deposits. Its composition is dominated by subalkaline and alkaline mafic rocks, broken by dikes of ijolite-urtites, nepheline and alkaline syenites. The chemical composition of igneous rocks is characterized by low silica contents ($\text{SiO}_2 = 41\text{--}49$ wt. %), wide variations of alkalinity ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3\text{--}19$ wt. %; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.2\text{--}7.2$ wt. %), low titanium content ($\text{TiO}_2 = 0.07\text{--}1.59$ wt. %) and high alumina content ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\text{--}28$ wt. %), which corresponds to the K-Na derivatives of the basic-alkaline formation. By their content of rare earth elements, alkaline rocks (104–246 ppm; $\text{La}/\text{Yb}_{(n)} = 5.79\text{--}12.73$) are more differentiated derivatives than gabbro (94–111 ppm; $\text{La}/\text{Yb}_{(n)} = 6.87\text{--}6.95$). All varieties are characterized by low concentrations of most highly charged elements (Nb, Ta, Zr, Hf, +Y), which in terms of accumulation are located between the basalts of oceanic islands and basalts of island arcs. The presence of negative Nb–Ta anomaly and the relative enrichment of Rb, Ba, Sr, and U indicate the probable interaction of plume material with previously formed accretionary complexes of subduction zones. The primary isotope $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio ($\sim 0.705\text{--}0.706$) and a wide range of ϵ_{Nd} (T) from +3.2 to +8.7 in the rocks also indicate a mantle-crustal nature and a complex geodynamic setting of the Paleozoic alkaline magmatism of the Kuznetsk Alatau. The obtained results of Sm–Nd dating suggest the formation of subalkaline gabbroids in the Early Paleozoic (494–491 ± 36 Ma), with the intrusion of dikes of alkaline rocks of the Middle Paleozoic age (394 ± 16 and 389 ± 37 Ma).

Keywords: subalkaline and alkaline magmatism, Sm–Nd and Rb–Sr isotope geochronology, geochemistry, mantle plume, accretionary complex, Kuznetsk Alatau.

* The geochemical study was funded by Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-35-90030). Isotope-geochronological studies were carried out at the expense of the Russian Science Foundation (project No. 18-17-00240). Clarification of the geological structure of the massif was carried out at the expense of the State Task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0721-2020-0041).

References

- Anoshkina, Y. V., Asochakova, E. M., Bukharova, O. V. and Tishin, P. A. (2012). Improvement of schemes for chemical sample preparation of carbonaceous rocks with subsequent analysis of high-charge elements by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Bulletin of TSU*, 359, 178–181. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/usovershenstvovanie-shem-himicheskoy-probopodgotovki-uglerodistyh-porod-s-posleduyuschim-analizom-vysokozaryadnyh-elementov-metodom/viewer> [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- Bogatikov, O. A., Kovalenko, V. I. and Sharkov, E. V. (2010). *Magmatism, Tectonics, and Geodynamics of the Earth.*, Moscow: Nauka Publ. Available at: <http://www.geokniga.org/books/1051> [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- Bouvier, A., Vervoort, J. D. and Patchett, P. J. (2008). The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth Planet. Sci. Letters*, 273 (1–2), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Condie, K. C. (2001). *Mantle Plumes and Their Record in Earth History.* Cambridge, UK. Available at: <http://www.geokniga.org/books/10617> [Accessed Nov. 16, 2020].
- Doroshkevich, A. G., Ripp, G. S., Izbrodin, I. A. and Savatenkov, V. M. (2012). Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data. *Lithos*, (152), 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>
- Ellam, R. M. (2006). New constraints on the petrogenesis of the Nuanetsi picrite basalts from Pb and Hf isotope data. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.004>
- Esin, S. V., Korchagin, S. A., Esina, O. A. and Gertner, I. F. (1987). Nepheline ore-bearing rocks of Universitetskii 1 and 2 sites (Kuznetsk Alatau). *Alkaline and subalkaline rocks of the Kuznetsk Alatau*, 74–82. (In Russian)
- Ernst, R. E. and Buchan, K. L. (2003). Recognizing Mantle Plumes in the Geological Record. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 469–523. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.145500>
- Ernst, R. E. (2014). *Large igneous Provinces.* Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>
- Faure, G. (1986). *Principles of Isotope Geology.* Moscow: Mir Publ. Available at: <http://www.geokniga.org/books/116> [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- Gertner, I. F., Vrublevskii, V. V., Voitenko, D. N. et al. (2007). Plume-related alkaline basic magmatism of the Kuznetsk Alanau: The Goryachegorsk complex. *Magmatism and metallogeny of the Altai and adjacent large igneous provinces with an introducing essay on the Altaiids.* UK, London: CERCAMS/NHM, 141–153.
- Gertner, I. F., Vrublevskii, V. V., Tishin, P. A. et al. (2013). Timelines, magma sources, and the formation status of Paleozoic feldspathic intrusions of the North-East of the Kuznetsk Alatau. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent)*, 11, 71–73. (In Russian)
- Gertner, I. F., Vrublevskii, V. V. and Krasnova, T. S. (2015). Evolution of high-alumina alkaline magmatism in the Central Asian fold belt. *LIP, Mantle Plumes and Metallogeny in the history of the Earth.* Irkutsk. Available at: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000525413/SOURCE1> [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- Gordienko, I. V. and Metelkin, D. V. (2016). The evolution of the subduction zone magmatism on the Neoproterozoic and Early Paleozoic active margins of the Paleasian Ocean. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.005>
- Gordienko, I. V. (2019). Relationship between subduction related and plume magmatism at the active boundaries of lithospheric plates in the interaction zone of the Siberian continent and Paleasian Ocean in the Neoproterozoic and Paleozoic. *Geodynamics and Tectonophysics*, 10 (2), 405–457. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0420> (In Russian)
- Gorton, M. P. and Schandl, E. S. (2000). From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineral.* 38, 1065–1073. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Grinev, O. M. (1987). Geology and petrography of the Belogorsk alkaline-gabbroid massif. *Alkaline and subalkaline rocks of the Kuznetsk Alatau*, 43–62. (In Russian)

- Izokh, A. E., Polyakov, G. V., Shelepaev, R. A., Vrublevskii, V. V., Egorova, V. V., Rudnev, S. N., Lavrenchuk, A. V., Borodina, E. V. and Oyunchimeg, T. (2008). Early Paleozoic Large Igneous Province of the Central Asia Mobile Belt. *Large Igneous Province Commission*. Available at: <http://www.largeigneous-provinces.org/08may> [Accessed Nov. 16, 2020].
- Jahn, B.-M., Wu, F. Y. and Chen, B. (2000). Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23 (2), 82–92. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2000/v23i2/001>
- Jourdan, F., Bertrand, H., Scharer, U., Blichert-Toft, J., Feraud, G. and Kampunzu, A. B. (2007). Major and Trace Element and Sr, Nd, Hf, and Pb Isotope Compositions of the Karoo Large Igneous Province, Botswana–Zimbabwe: Lithosphere vs Mantle Plume Contribution. *Journal of Petrology*, 48 (6), 1043–1077. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm010>
- Karmanova, N. G. and Karmanov, N. S. (2011). Universal XRF silicate analysis of rocks using the ARL-9900XP spectrometer. In: *All-Russian Conference on X-ray Spectral Analysis*. Iss. 7. Novosibirsk: IGM SB RAS Publ. (In Russian)
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K. and Greene, A. R. (2003). One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 593–659. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03035-8>
- Kuzmin, M. A. and Yarmolyuk, V. V. (2014). Mantle plumes of Central Asia (Northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits. *Russian Geology and Geophysics*, 55, 120–143. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.002>
- Kuzmin, M. I. and Yarmolyuk, V. V. (2016). Plate tectonics and Mantle Plumes have been the basis of the endogenous tectonic activity of the Earth for the last 2 billion years. *Geology and Geophysics*, 57 (1), 11–30. <https://doi.org/10.15372/GiG20160102> (In Russian)
- Le Maitre, M. J., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J. et al. (2002). *Igneous Rocks*. UK: Cambridge University Press. Available at: https://www.researchgate.net/publication/234448684_Igneous_Rocks_A_Classification_and_Glossary_of_Terms [Accessed Nov. 16, 2020].
- Ludwig, K. R. (2000). *User's manual for Isoplot/Ex, Version 2.2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication. Available at: <http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/Geo656/Isoplot%20Manual.pdf> [Accessed Nov. 16, 2020].
- Makarenko, N. A. and Kotelnikov, A. D. (2018). The Kashpar Cambrian-Ordovik gabbro-diorite-quartz-montsodiorite-syenite Complex-New Petrography Department on the Eastern Slope of the Kuznetsk Alatau. *Geosphere studies*, 2, 52–71. <https://doi.org/10.17223/25421379/7/4> (In Russian)
- Middlemost, E. A. K. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37, 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Middlemost, E. A. K. (1997). *Magmas, Rocks and Planetary Development*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781315843698>
- Morgan, W. J. (1972). Deep mantle convection plumes and plate motions. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geols.*, 56, 203–213. Available at: <http://www.mantleplumes.org/WebDocuments/Morgan1972.pdf> [Accessed Nov. 16, 2020].
- Mustafayev, A. A., Gertner, I. F. and Serov, P. A. (2017). Features of geology and composition of rocks from the alkaline-gabbroic University massif (N-E Kuznetsky Alatau ridge, Siberia). *Earth and Environmental Science*, 319, 012026. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/110/1/012016/meta> [Accessed Nov. 16, 2020].
- Mustafayev, A. A., Gertner, I. F. and Serov, P. A. (2019). New Sm-Nd isotopic data on the University alkaline-gabbro massif (NE Kuznetsk Alatau). *LIP through earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues*, 90–92. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41503143> [Accessed Nov. 16, 2020].
- Osipov, P. V., Makarenko, N. A., Korchagin, S. A., Gertner, I. F. and Grinev, O. M. (1989). New alkaline-gabbroid ore-bearing massif in the Kuznetsk Alatau. *Russian Geology and Geophysics*, 11, 79–82. (In Russian)
- Pirajno, F. and Santosh, M. (2014). Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview. *Ore Geology Reviews*, 63, 265–295. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.014>

- Pirajno, F. (2015). Intracontinental anorogenic alkaline magmatism and carbonatites, associated mineral systems and the mantle plume connection. *Gondwana Research*, 01328. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.008>
- Pokrovskii, B. G., Andreeva, E. D., Vrublevskii, V. V. and Grinev, O. M. (1998). Contamination mechanisms of alkaline-gabbro intrusions in the southern periphery of the Siberian craton: evidence from strontium and oxygen isotopic compositions. *Petrologiia*, 6 (3), 237–251. (In Russian)
- Pokrovsky, B. G. (2000). *Crustal contamination of mantle magmas according to isotope geochemistry*. Moscow: Nauka Publ. Available at: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_259 [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- Report on the search for naturally rich and easily ore-rich nepheline ores within the Universitetskii 1 and 2, Voskresenka and Bezymianka sites conducted by the Martaigin expedition in 1983–1987*. (1987). S. A. Korchagin, I. F. Gertner, Russia, Novokuznetsk. (In Russian)
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A. and Burtman, V. S. (1993). Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364, 299–306. Available at: https://www.researchgate.net/publication/31960368_Evolution_of_the_Altaid_Tectonic_collage_and_Palaeozoic_Crustal_Growth_in_Eurasia [Accessed Nov. 16, 2020].
- Serov, P. A., Ekimova, N. A., Bayanova, T. B. and Mitrofanov, F. P. (2014). Sulfide minerals — new geochronometers during Sm–Nd dating of ore genesis of stratified mafic-ultramafic intrusions of the Baltic Shield. *Lithosphere*, 4, 11–21. Available at: <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/418/417> [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- State geological map of the Russian Federation*. (2007). Scale 1:1 000 000 (third generation). Sheet N-45 (Novokuznetsk). G. A. Babin, A. A. Yuriev, A. I. Bychkov et. al. St. Petersburg. VSEGEI. Available at: http://www.vsegei.com/en/info/pub_ggk1000-3/Altae-Sayanskaya/n-45.php [Accessed Nov. 16, 2020]. (In Russian)
- Steiger, R. H. and Jager, E. (1977). Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36 (3), 359–362. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7)
- Sun, S. and McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins*, 42, 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Tanaka, T., Togashi, S., Kamioka, H. et al. (2000). JNd-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168, 279–281. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00198-4)
- Tomlinson, K. Y. and Condie, K. C. (2001). Archean mantle plumes: evidence from greenstone belt geochemistry. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 352, 341–358. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2352-3.341>
- Vrublevskii, V. V., Gertner, I. F., Gutiérrez-Alonso, G., Hofmann, M., Grinev, O. M. and Tishin, P. A. (2014). Isotope (U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr) geochronology of alkaline basic plutons of the Kuznetsk Alatau. *Russian Geology and Geophysics*, 55 (11), 1598–1614. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.10.002>
- Vrublevskii, V. V. (2015). Sources and geodynamic setting of petrogenesis of the Middle Cambrian Upper Petropavlovka alkaline basic pluton (Kuznetsk Alatau, Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 56 (3), 379–401. <https://doi.org/10.15372/GiG20150302> (In Russian)
- Vrublevskii, V. V., Grinev, O. M., Izokh, A. E. and Travin, A. V. (2016). Geochemistry, isotopic (Nd–Sr–O) triad and ⁴⁰Ar–³⁹Ar age of the Paleozoic alkaline-mafic intrusions of the Kuznetsk Alatau (on the example of the Belogorsky pluton). *Russian Geology and Geophysics*, 57 (3), 592–602. <https://doi.org/10.15372/GiG20160308> (In Russian)
- Vrublevskii, V. V., Kotelnikov, D. A., Izokh, A. E. (2018). Age, petrological and geochemical conditions of the formation of the Kogtakh gabbro-monzonite complex of the Kuznetsk Alatau. *Geology and Geophysics*, 59 (7), 900–930. <https://doi.org/10.15372/GiG20180702> (In Russian)
- Vrublevskii, V. V., Gertner, I. F., Ernst, R. E., Izokh, A. E. and Vishnevskii, A. V. (2019). The Overmarat-Gol Alkaline Pluton in Northern Mongolia: U–Pb Age and Preliminary Implications for Magma Sources and Tectonic Setting. *Minerals*, 9 (3), 170. <https://doi.org/10.3390/min9030170>
- Vrublevskii, V. V., Nikiforov, A. V., Sugorakova, A. M. and Kozulina, T. V. (2020). Petrogenesis and tectonic setting of the Cambrian Kharly alkaline-carbonatite complex (Sangilen Plateau, Southern Siberia): Implications for the Early Paleozoic evolution of magmatism in the western Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 188, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104163>

- Xiao, W. and Santosh, M. (2014). The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth. *Gondwana Research*, 25, 1429–1444. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2014.01.008>
- Yarmolyuk, V. V. and Kovalenko, V. I. (2003). Deep geodynamics and mantle plumes: their role in the formation of the Central Asian orogenic belt. *Petrology*, 11 (6), 504–531. (In Russian)
- Yarmolyuk, V. V., Kuzmin, M. I. and Vorontsov, A. A. (2013). West Pacific-type convergent boundaries and their role in the formation of the Central Asian Fold Belt. *Russian Geology and Geophysics*, 54, 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.012>
- Yarmolyuk, V. V., Kuzmin, M. I. and Ernst, R. E. (2014). Intraplate Geodynamics and Magmatism in the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Asian Earth Sci.*, 93, 158–179. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.07.004>
- York, D. (1966). Least squares fitting of straight line. *Canad. J. Phys.*, 44 (5), 1079–1086. <https://doi.org/10.1139/p66-090>
- Yashina, R. M. (1982). *Alkaline magmatism of folded-block areas (on the example of the southern framing of the Siberian platform)*. O. A. Bogatikov, ed., Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Zindler, A. and Hart, S. R. (1986). Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14, 493–571. <http://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>

Received: May 12, 2020
Accepted: October 12, 2020

Contact information:

Agababa A. Mustafaev — alishka010593@gmail.com
Igor F. Gertner — labspm@ggf.tsu.ru