

УДК [551.2+551.73+552.32]:552.11:550.4:550.93
DOI 10.17513/use.38155

ПЛЮМОВАЯ ПРИРОДА И КОНВЕРГЕНТНОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ БАЗИТОВ ЭМСА – ЭЙФЕЛЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ РУДНОГО АЛТАЯ

Семиряков А.С., Гринев О.М., Бестемьянова К.В.,
Гринев Р.О., Морозова Е.Н., Адылбаев Р.Р.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск,
e-mail: alexey.semiryakov@mail.ru, tomskgrom@yandex.ru, ksenijavt@mail.ru,
jadestone@yandex.ru, Morozova-KatR97@yandex.ru, ruslan_ggf@mail.ru

В работе представлены результаты последних геохимических и изотопных исследований базитового магматизма северо-востока Рудного Алтая на примере оливиновых пироксенитов и габброидов I фазы алейского комплекса (эмс) массива «Мохнатые сопки», базальтов мельничной свиты (эмс-эйфель) и субвулканических долеритов (эйфель) Змеиногорского прогиба. По результатам Nd-Sr изотопных исследований установлена плюмово-мантийная природа базитового магматизма со следами взаимодействия с корово-литосферным веществом. Единым протолитом для эффузивов и интрузивов определяется шпинелевый лерцолит. Долериты депрессионных зон сохраняют мантийную изотопную последовательность с близостью к источнику PREMA за счет сохранения связи подводящих каналов с мантийными глубинами, а габброиды Алейского гранитно-метаморфического купола контаминированы в большей степени за счет ассимиляции пород рамы. Выплавка преобладающих в объемном отношении магм кислого состава возможна при разрыве связи головной части плюма с мантийным веществом с формированием промежуточных магматических камер, продуцирующих риолитовую и гранитную магмы. По ряду современных геохимических дискриминационных диаграмм устанавливается влияние источников N-MORB для оливиновых пироксенитов, E-MORB и IAB для габброидов, базальтов и долеритов. Предположено объяснение наличия геохимических признаков обстановки IAB вследствие переработки вещества каледонского зеленосланцевого фундамента, сформированного в островодужный этап развития АССО.

Ключевые слова: Центрально-Азиатский складчатый пояс, Рудный Алтай, Змеиногорск, девон, плюмовый магматизм, Nd-Sr, U-Pb, LA-ICP-MS

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-35-90036; в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ № 0721-2020-0041; с использованием оборудования Томского регионального Центра коллективного пользования в рамках гранта РФ № 075-15-2021-693.

PLUME COMPONENT AND GEOCHEMICAL CONVERGENCE FEATURES OF EMSIAN-EIFELIAN MAFIC ROCKS OF THE NORTHEASTERN RUDNY ALTAI

Semiryakov A.S., Grinev O.M., Bestemyanova K.V.,
Grinev R.O., Morozova E.N., Adylbaev R.R.

National Research Tomsk State University, Tomsk,
e-mail: alexey.semiryakov@mail.ru, tomskgrom@yandex.ru, ksenijavt@mail.ru,
jadestone@yandex.ru, Morozova-KatR97@yandex.ru, ruslan_ggf@mail.ru

The paper presents the results of the latest geochemical and isotopic studies of mafic magmatism in the northeast of Rudny Altai using the example of gabbroids and olivine pyroxenites of the first phase of the Alesky complex (Emsian) of the Mokhnatye Sopki massif, basalts of the mel'nichnaya formation (Emsian-Eifelian) and subvolcanic dolerites (Eifelian) of the Zmeinogorsk trough. Based on the results of Nd-Sr isotope studies, the plume-mantle nature of mafic magmatism with traces of interaction with crust-lithospheric material was established. The general protolith for effusive and intrusive rocks is spinel lherzolite. Dolerites of depression zones preserve the mantle isotopic sequence and there are affinity to the PREMA source due to the preservation of the connection of supply channels with mantle depths. The gabbroids of the Alesky granite-metamorphic dome were contaminated due to large-volume assimilation of host rocks. The smelting of dominant felsic magmas is possible when the connection between the plume head and the mantle material is broken, with the formation of intermediate magma chambers producing rhyolite and granite magmas. Based on a modern geochemical discrimination diagrams, the influence of N-MORB sources for olivine pyroxenites, E-MORB and IAB for gabbroids, basalts and dolerites is established. Presence of geochemical signs of the IAB due to the processing of the material of the Caledonian greenschist basement, formed during the island arc stage of the Altai-Sayan region formation.

Keywords: Central Asian fold belt, Rudny Altai, Zmeinogorsk, Devonian, Plume Magmatism, Nd-Sr, U-Pb, LA-ICP-MS

The study was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-35-90036; within the framework of the State assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 0721-2020-0041; using the equipment of the Tomsk Regional Center for Collective Use within the framework of the Russian Federation grant No. 075-15-2021-693.

Рудный Алтай, заключенный между Алтае-Саянской плюм-рифтогенной системой и поясом герцинских складчатых областей (Центрально-Западно-Сибирская, Обь-Зайсанская и Южно-Монгольская), имеет сложную историю формирования и ряд дискуссионных вопросов, касающихся обстановок его формирования и источников магматического и рудного вещества. В период его активного освоения и изучения в советское время разрабатывались крупнейшие барит- и колчеданно-полиметаллические месторождения, проводились детальные поиски на всей территории главных рудных районов (Змеиногорский, Рубцовский, Лениногорский и др.). Однако, несмотря на столь широкий охват, быстрое развитие аналитических методов дает возможность существенного уточнения некоторых важных элементов для понимания и осмысления истории развития региона.

В структурно-тектоническом отношении в пределах севера-востока Рудно-Алтайского мегапрогиба выделяются два типа морфоструктурных единиц. Первая – отрицательная – прибортовая депрессионная зона, приуроченная к Северо-Восточной зоне смятия, в состав которой входит Змеиногорский прогиб. Последний в эмс-эйфельское время стадийно заполнялся прибрежно-морскими терригенными и карбонатными отложениями с прослоями вулканогенного материала: эксплозивными отложениями кислого состава, лавами риолитов, риодацитов и резко подчиненными в количественном отношении лавами базальтов. Второй тип региональной морфоструктуры – положительный – Алейский гранитно-метаморфический купол (ГМК), сформированный интрузивными образованиями алейского (D_1a), змеиногорского (D_{2-3z}), устьянского (D_3u) и постдевонских комплексов. ГМК сложен в подавляющем объеме плагиогранитами, гранитами и лейкогранитами с локально проявленными штокавыми телами габброидов – преимущественно I фазы алейского и змеиногорского комплексов. По периферии Алейского ГМК и реже в центральной части выходят на дневную поверхность раннепалеозойские метаморфогенно-осадочные отложения корбалихинской толщи, формирующие каледонский фундамент северной части Рудного Алтая.

Базитовая составляющая вулканогенно-терригенных разрезов и интрузивных массивов, максимально связанная с исходным магматическим очагом, дают возможность

геохимически и изотопно-геохимически определить их природу на современном уровне понимания.

Целью является изотопно-геохимическая аттестация эффузивных и интрузивных базитовых образований северо-восточной части Рудного Алтая для установления природы и эволюции магматической системы в ранне- и (частично) среднедевонский этапы.

Материалы и методы исследования

В работе используется материал, собранный авторами в полевые сезоны 2011–2022 гг., а также керновый материал, представленный Рудно-Алтайской экспедицией.

Определения петро- и геохимического состава пород методами ICP-AES (iCAP7400Duo / Thermo Fisher Scientific) и ICP-MS (Agilent 7500 / Agilent Technologies), а также качественное определение минеральных фаз пород на РЭМ с применением РСМА (Tescan VEGA II LMU / INCA Energy 350) выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования НИ ТГУ. Центр поддержан Грантом Минобрнауки РФ № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012).

Изотопный анализ циркона проводился в лаборатории геохронологии и геодинамики ТГУ методом лазерной абляции и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (LA-Q-ICP-MS) с использованием системы лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Photon Machines) с эксимерным лазером (193 нм) и квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7900. Диаметр лазерного пучка – 25, 35 и 50 мкм. Частота импульсов – 8 Гц, плотность полотка энергии – 3 Дж/см². Время анализа – 30 с, время измерения фона – 20 с. Используемые международные стандарты цирконов – Temora II, Plešovice и 91500. Для определения средневзвешенного конкордантного возраста цирконов использовались изотопные отношения $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Определения источника вещества проводились Sm-Nd (Finnigan MAT-262 RPQ) и Rb-Sr (МИ-1201) изотопными исследованиями в Центре коллективного пользования ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты.

1. Геолого-петрографическая характеристика

Согласно принятой геологической основе [1, 2], в северо-восточной части Рудно-Алтайского мегапрогиба базитовые породы эмс-эйфеля развиты в составе двух интрузив-

ных комплексов: (1) алейского габбро-плагиогранитного и (2) змеиногорского габбро-плагиогранит-лейкогранитового комплексов,

а также в составе стратиграфического разреза мельничной свиты (D_1mn) и мельнично-сосновского субвулканического комплекса.

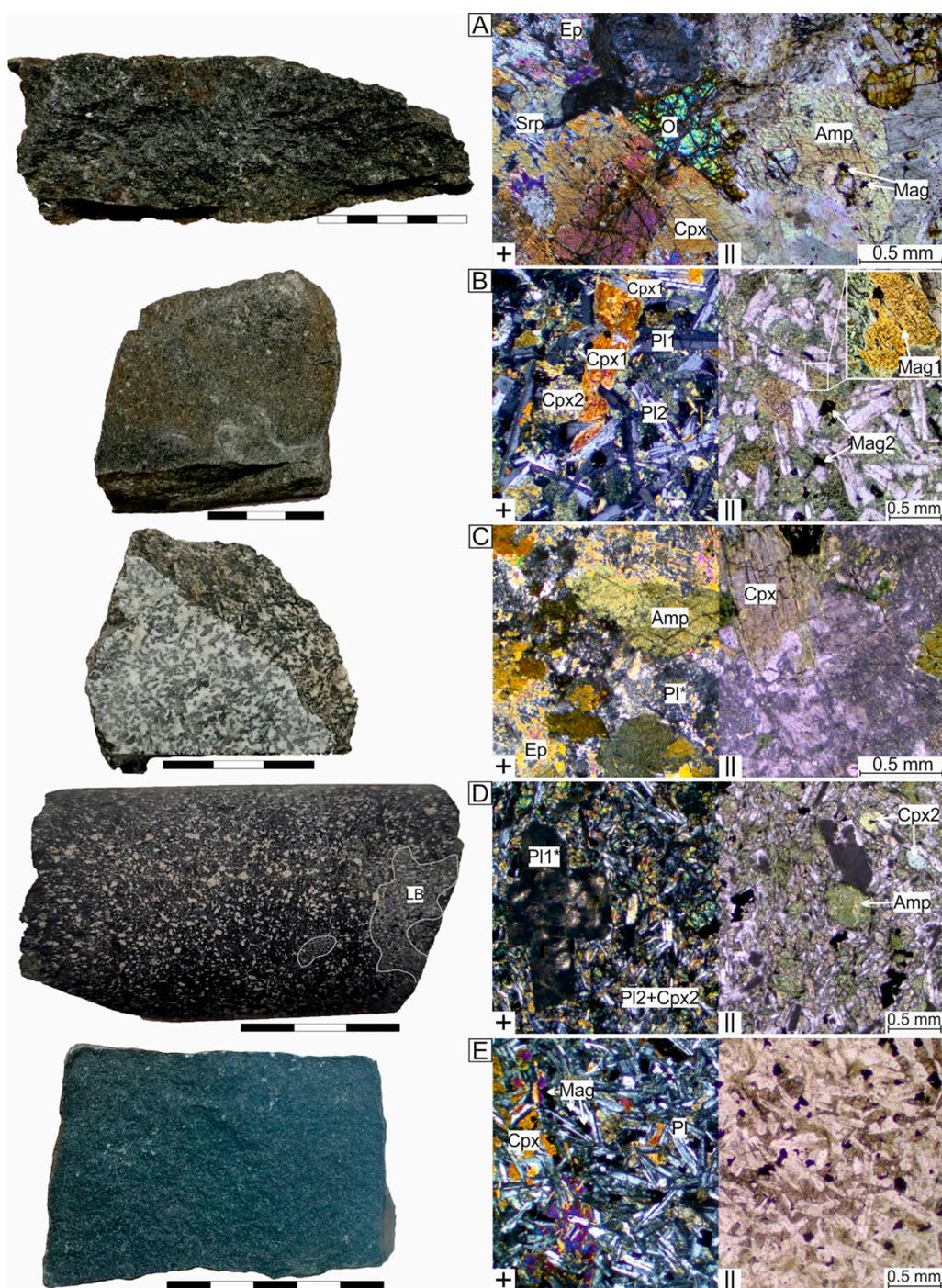


Рис. 1. Основные разновидности базитовых пород Змеиногорского рудного района: А – оливиновый пироксенит (D_1a), В – мелкозернистое габбро (D_1a), С – среднезернистое мезократовое габбро (D_1a), D – порфировый интергранулярный базальт (D_1mn), E – мелкозернистый долерит (D_1ms): Amp – амфибол, Cpx1 – вкрапленник клинопироксена, Cpx2 – клинопироксен основной массы, Ep – эпидот, Pl1 – вкрапленники плагиоклаза, Pl2 – плагиоклаз основной массы, Pl* – метаплагиоклаз, Srp – серпентин. Николи: + – скрещены, || – параллельны

Базиты алейского комплекса (D_1a_1) развиты ограниченно и представлены останцами в гранитоидном батолите Алейского ГМК, в частности в составе массива «Мохнатые сопки». Тело формирует шток размером 2×4 км и представлено несколькими фазами внедрения и контактово-измененными разностями. Оливиновые пироксениты развиты в западной части штока и раскристаллизованы до средне-крупнозернистой размерности. В их состав входят: железисто-магнезиальный оливин; клинопироксен, занимающий промежуточное положение между геденбергитом и диопсидом; в неизмененных разностях встречается ортопироксен близкий к энстатиту, вторичные эпидот и серпентин (рис. 1, А). Пироксениты частично амфиболизированы с развитием вторичной идиоморфной роговой обманки.

Центральную часть штока слагают мелкозернистое порфировидное габбро, вкрапленники которого представлены плагиоклазом (до 1 мм) и клинопироксеном (до 2 мм по удлинению), а в основной массе развиты плагиоклаз № 53–70, клинопироксен (диопсид – геденбергит), рудные ильменит и магнетит (рис. 1, В). Эндоконтактовая фация габбро имеет мезократовую окраску, в ее состав входят преобразованный вторичными изменениями (сосюритизация, серицитизация) плагиоклаз, клинопироксен близкий к авгиту, амфибол, близкий к роговой обманке (рис. 1, С). Из рудных минералов методом РСМА установлены: ильменит, хромшпинелиды; из аксессуарных – фторпатит, перовскит.

Базиты Змеиногорского прогиба представлены эмс-эйфельскими базальтами мельничной свиты, вскрытые бурением Рудно-Алтайской экспедиции. Эмский возраст определен по остаткам флоры и фауны (брахиоподы, конодонты, кораллы) во вмещающих отложениях. Базальты представляют собой мезократовую порфировую породу с мелкозернистой основной массой (рис. 1, D). Вкрапленники сложены метаплагиоклазом (до 3 мм) и геденбергитом (до 0.4 мм). В основной массе развиты плагиоклаз № 40–55, диопсид, магнетит. Также в Змеиногорском прогибе отмечаются небольшие штоковые и дайковые тела долеритов, геохронологически и геохимически близкие эмским базальтам, вследствие чего они были отнесены к мельнично-сосновскому субвулканическому комплексу. Долериты сложены основным плагиоклазом (№ 60–72), клинопироксеном, по составу близким к геденбергиту и магнетитом (рис. 1, E).

2. Петро- и геохимическая дискриминация

Петрохимически рассматриваемые интрузивные породы массива «Мохнатые сопки» относятся к габбро-перидотитам, оливиновым пироксенитам, габбро-пироксенитам и габбро, а вулканические и субвулканические породы Змеиногорского прогиба представляют собой долериты, базальты, андезибазальты и трахиандезибазальты (рис. 2, А). По характеру распределения микроэлементов (рис. 2, В) все рассматриваемые магматиты имеют схожие черты с реперными спектрами базальтов островных дуг (IAB) и базальтами E-MORB. Уровень содержания микроэлементов у базальтов и габброидов в целом одинаковый, пироксениты обеднены относительно габбро на полпорядка, а эйфельский долерит на полпорядка обогащен микроэлементами. Резкий пик Ba у долерита объясняется его внедрением в пределах рудного поля барит-полиметаллического Змеиногорского месторождения.

Магматиты обнаруживают геохимические черты сразу нескольких геодинамических обстановок: на диаграмме Ta/Yb – Th/Yt (рис. 2, С) [3] фигуративные точки вулканитов, вулканиты ложатся преимущественно в поле активной континентальной окраины (ACM), а интрузивы равно попадают в поля ACM и внутриплитных вулканических зон (WPVZ).

На диаграмме La/Lu – Gd/Yb (рис. 2, D) [4] поле интрузивных и эффузивных пород тяготеет исключительно к реперу MORB, при этом малая часть базальтов эмса вытягивается к реперу IAB. По расположению точек можно говорить о высокой степени плавления вещества и об относительно небольшой глубине плавления, что, по-видимому, обуславливается воздействием аномально го тепла плюма на верхние слои литосферы. На тройной диаграмме Y/15 – La/10 – Nb/8 (рис. 2, E) [5] вулканиты занимают поля континентальных толеитов, кальциево-щелочных базальтов и частично заходят в поле E-MORB. Габбро и пироксениты в свою очередь располагаются в полях кальциево-щелочных базальтов, толитовых островных дуг и задуговых бассейнов. На диаграмме Ce/Nb – Th/Nb (рис. 2, F) [6] базиты не дискриминируются между собой и расположены на равном удалении от реперов компонента зоны субдукции (SDC) и валового состава континентальной коры (BCC). Долерит эйфеля обособляется от всей группы точек и попадает под влияние полей OIB и E-MORB, однако с учетом других дискриминационных главенствующую роль здесь играет именно E-MORB.

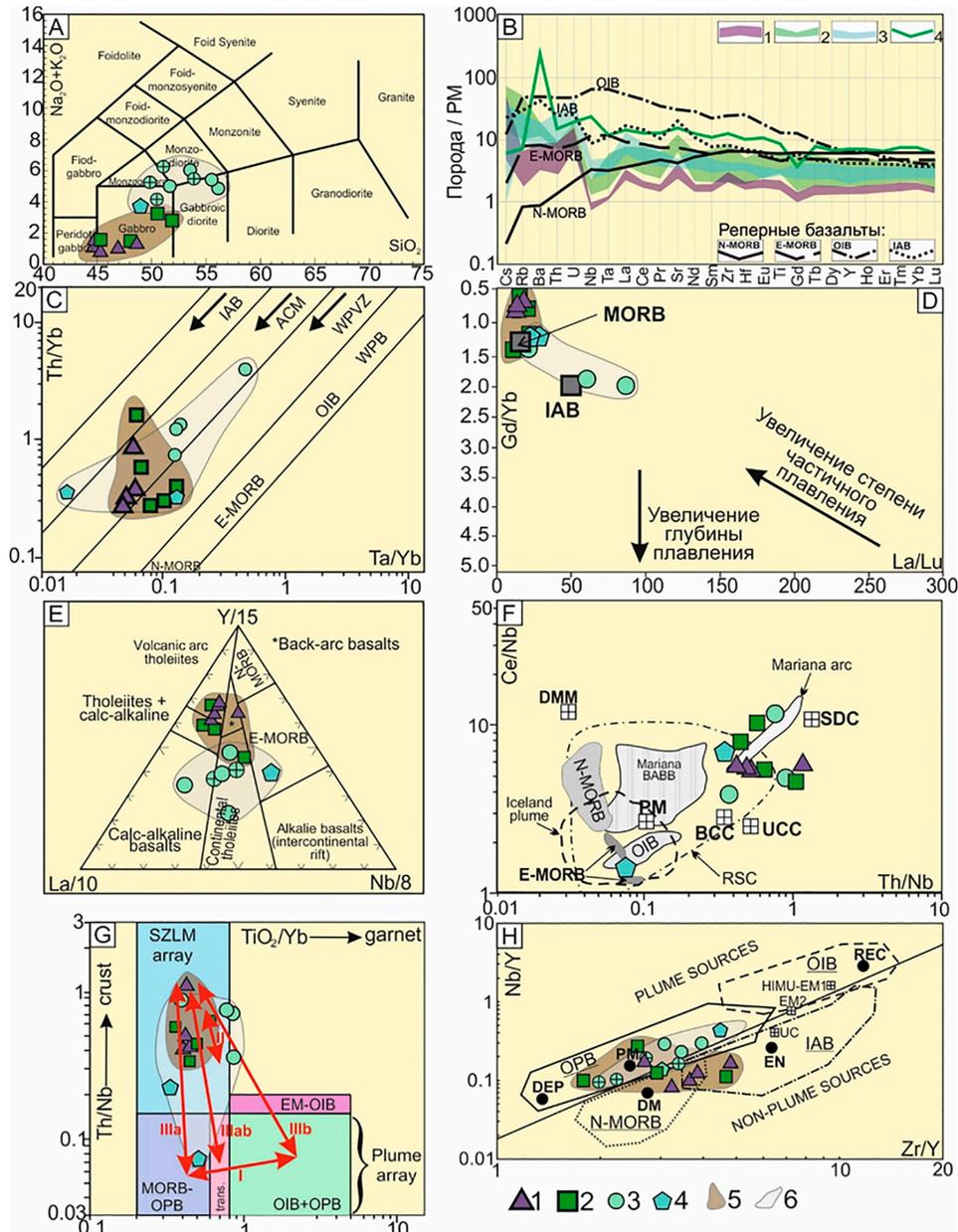


Рис. 2. Петро- и геохимическая аттестация и геодинамические обстановки формирования базитов Змеиногорского рудного района: А – TAS-диаграмма; В – спектры распределения микроэлементов; С – диаграмма Ta/Yb – Th/Yt по [3]; D – диаграмма La/Lu – Gd/Yb [4]; E – диаграмма Y/15 – La/10 – Nb/8 [5]; F – диаграмма Ce/Nb – Th/Nb [6]; G – Th/Nb – TiO₂/Yb [7]; H – диаграмма Nb/Y – Zr/Y [8]. Фигуративные точки: 1–2 – алейский комплекс: 1 – габбро, 2 – пироксениты; 3 – базальты мельничной свиты (⊕ – по данным [9]), 4 – долериты мельнично-сосновского комплекса; 5 – поля интрузивов; 6 – поля вулканитов

На диаграмме Th/Nb – TiO₂/Yb (рис. 2, G) [7] точки попадают преимущественно в поле метасоматизированной литосферы (SZLM) при частичном тяготении долеритов прогиба к полю базальтов океанического плато (MORB-OPB). По классификации [7] данные тренды укладываются во II и IIIa типы, обусловленные взаимодействием плюмового и литосферного вещества.

На диаграмме Nb/Y – Zr/Y (рис. 2, H) [8] напротив преобладают мантийные источники вещества: вулканиты Змеиногорского прогиба целиком попадают в поле базальтов океанического плато (OPB), в то время как интрузивные породы массива «Мохнатые сопки» распространяются в полях OPB, N-MORB и в поле базальтов островных дуг (IAB).

3. Источники вещества

На диаграмме La/Yb – Zr/Nb (рис. 3, А) [10] фигуративные точки выстраиваются вдоль линии мантийной последовательности, при этом непосредственно соприкасаются с ней лишь часть точек, находясь в близости к реперу E-MORB. Точки пироксенитов расположены вне области MOBR, при этом приближены к реперу нормальных базальтов COX (N-MORB).

На диаграмме в осях $\epsilon Nd(t)$ – $\epsilon Sr(t)$ (рис. 3, В) долериты Змеиногорского прогиба расположены в поле мантийной последовательности, при этом тяготеют к реперу PREMA. Его резко положительное значение $\epsilon Nd(t)$ говорит о происхождении долерита из остаточных твердых фаз резервуара, после удаления из него магмы в более ранний момент, вероятно в процессе многочисленных извержений в эмском веке. Точки

плутонических пород обладают повышенным отношением $^{87}Sr/^{86}Sr$ и укладываются в тренд контаминационной природы, что обуславливается характером взаимодействия интрузивных тел с вмещающими породами.

Обогащение радиогенным ^{87}Sr магм вполне ожидаемо в свете их контаминации флишоидных толщ континентального склона, где помимо выносимого терригенного материала присутствует карбонатное вещество. Причем процесс контаминации магм мог осуществляться как крупнообъемной ассимиляцией, так и путем миграции несовместимых LILE элементов в виде концентрированных растворов. Это подтверждает и формирование барит-полиметаллических месторождений и непосредственно баритовых рудных тел, приуроченных к риолитовым куполам [11, 12].

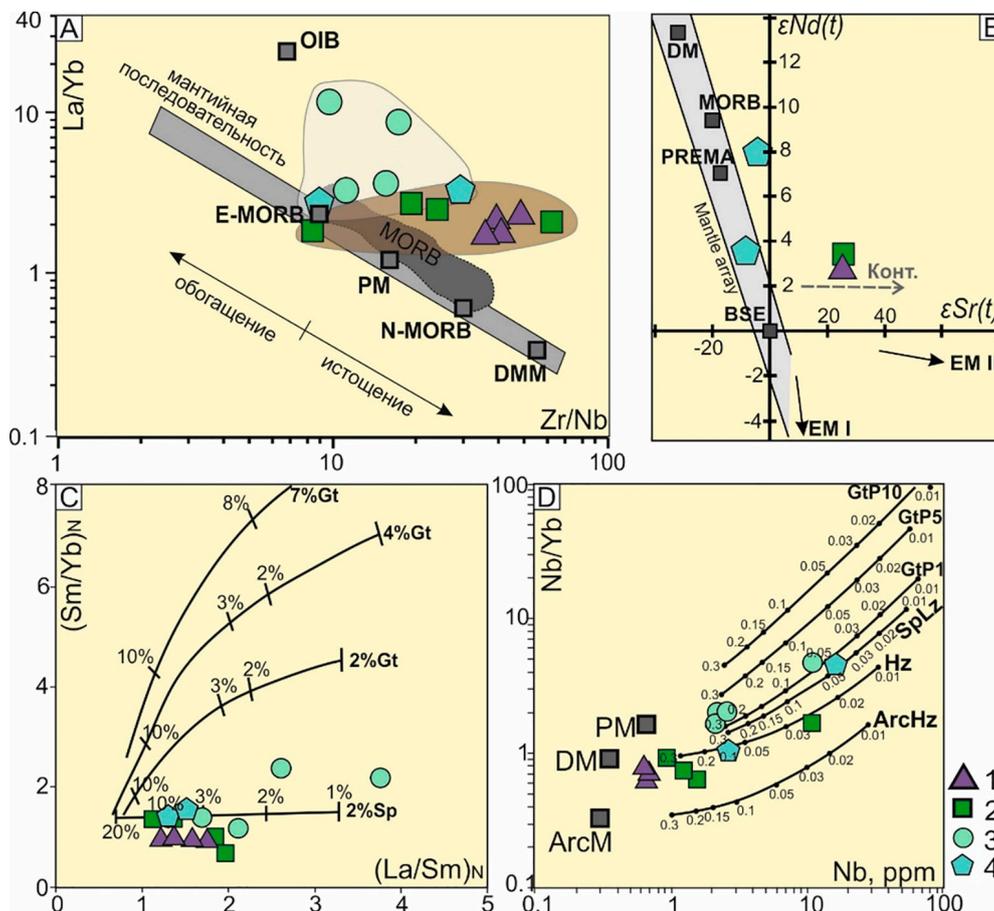


Рис. 3. Геохимические и изотопно-геохимические характеристики плюмово-мантийного компонента: А – диаграмма La/Yb – Zr/Nb [10]; В – диаграмма источников в осях $\epsilon Nd(t)$ – $\epsilon Sr(t)$; С – диаграмма $(Sm/Yb)_N - (La/Sm)_N$ [13] с нормированными на хондрит (по Sun, McDonough, 1989) содержанием P3Э; D – диаграмма Nb – Nb/Yb [14]. Фигуративные точки: 1–2 – алейский комплекс: 1 – габбро, 2 – пироксениты; 3 – базальты мельничной свиты, 4 – долериты мельнично сосновского комплекса

Для оценки условий выплавления магм и установления возможных мантийных геохимических резервуаров использованы две индикаторные системы геохимического моделирования. Первая из них – диаграмма $(\text{Sm}/\text{Yb})_N - (\text{La}/\text{Sm})_N$ (рис. 3, С) [13], использующая нормированные значения редких земель по отношению к хондриту. В результате построений точки базитов как прогиба, так и алейского комплекса выстраиваются вдоль кривой двухпроцентного шпинелевого лерцолита (2 % Sp) с преимущественным плавлением от 3 до 10 %. Два базальта выбиваются из общей группы фигуративных точек, в сторону уменьшения степени плавления до 2 % и менее 1 %, при этом они так же приурочены к кривой шпинелевого лерцолита.

Вторая система – Nb–Yb (рис. 3, D) [14], согласно которой базиты дискриминируются по генетическому признаку: точки базальтов Змеиногорского прогиба и долерит Змеиногорского рудного поля выстраиваются вдоль кривой шпинелевого лерцолита (SpLz), генерируемого примитивной мантией (PM); точки пироксенитов, габброидов и даек Алейского комплекса, а также долерит Стрижковского рудного поля выстраиваются вдоль кривой гарцбургита (Hz), происходящего из деплетированной мантии

(DM). Процент плавления для интрузивов устанавливается на уровне от 3 до ~40%, причем наибольший процент выплавки наблюдается для оливиновых пироксенитов; для эффузивов – в интервале от 5 до 30%.

4. U-Pb датирование

Из мезократового среднезернистого габбро-алейского комплекса массива «Мохнатые сопки» было выделено 40 зерен циркона. При катодолюминесцентном исследовании они обнаруживают широкую зональность в ядерной части и более тонкую concentрическую зональность к периферии. При датировании из 40 зерен критерию конкордантности в диапазоне $\pm 10\%$ отвечают 28 замеров. В результате получен конкордантный возраст 402 ± 10 млн лет (рис. 4, А), что соответствует середине эмского века раннего девона.

В образцах из штоково-дайкового тела долеритов центральной части Змеиногорского месторождения было обнаружено шесть зерен циркона, два из которых имеют реликтовую природу. Их кристалломорфологическая форма описывается как простая тетрагональная призма с пирамидой (рис. 4, В). Поверхность этих зерен корродирована и шероховата, ребра округлые. Характер их зональности – слабовыраженный секториальный. Возраст их определен как AR_2 .

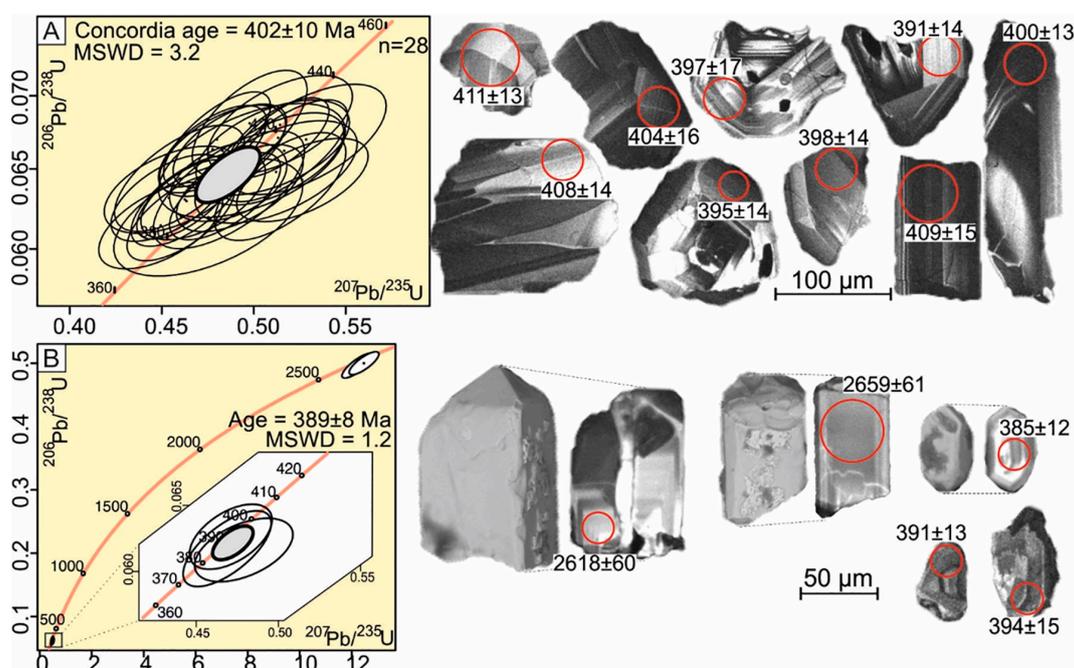


Рис. 4. Результаты U-Pb датирования цирконов методом LA-Q-ICP-MS:

А – среднезернистый габбро-алейского комплекса, массив «Мохнатые сопки»;
 В – долерит Змеиногорского прогиба. Возраст на CL изображениях указан по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ изотопной системе (для архейских зерен по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ системе). Величина ошибки $\pm 2\sigma$

Остальные зерна представлены слабо-выраженной дитетрагональной призмой и пирамидой, имеют размер по удлинению до 110 мкм. Их возраст установлен как 389 ± 8 млн лет, что относится к среднему эйфелю. Если эти зерна не являются так же захваченным, а истинный возраст долеритового тела более молодым, то устанавливается единовременное и единопространственное проявление кислого и основного магматизма в районе, что говорит о наличии двух одновременно работающих магматических очагов на разных корово-литосферных уровнях, генерирующие контрастные по составу расплавы.

Результаты исследования и их обсуждение

По геохимическим и изотопно-геохимическим данным магматиты несут в себе черты изначально плюмового происхождения, что устанавливается по геохимическим и Nd-Rb изотопным данным, располагаясь в поле мантийной последовательности вблизи репера PREMA. Родоначальным протолитом определяется шпинелевый лерцолит, плавление которого по системе геохимического моделирования [13] достигало 40 % при средней оценке 3–10 %. Обнаруженный в образцах эмского габбро перовскит косвенно говорит о мантийном происхождении расплава. Мантийные источники подтверждаются и изотопией серы: $\delta^{34}\text{S}$ от -4,2 до +5,2 ‰, основная часть проб – от -2,2 до +2,0 ‰ [12]. В работе по исследованию изотопного состава серы сульфидов разных стадий минеральных комплексов барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района [15] отмечается смена мантийного источника серы на коровый.

Следы последующего взаимодействия вещества плюма с литосферой и земной корой (SZLM), устанавливаемые по ряду диаграмм, обуславливаются наличием каледонского структурного этажа, накапливающегося в $\text{E}_3\text{-O}$, за счет денудации островодужных комплексов Горного Алтая. Ассимиляция вещества фундамента не могла не привести к контаминации магмы и приобретению отдельных геохимических черт, характерных для островодужных базальтов, например, Ta-Nb минимум. Габброиды и пироксениты алейского комплекса, наиболее активно контаминируемые веществом фундамента, располагаются в начале кривой смещения магм основного состава с гранитизированной корой.

По-видимому, установленные сходства и различия магматитов обусловлены основными параметрами, определяющими проявление вулканизма и плутонизма. Для вулкаников Змеиногорского прогиба, приуроченного к прибортовой зоне, логично предположить непосредственную связь подводящих каналов с мантийными глубинами в пределах депрессионных зон. На характер проявления прибортового вулканизма оказывало влияние взаимодействие тектонических процессов, проходящих в смежных региональных структурах – Обь-Зайсанской области и Алтае-Саянской плюм-рифтогенной системе, в которых наблюдается региональная, а может, и глобально проявленная трансгрессивно-регрессивная цикличность. Можно предполагать, что это тектоническое взаимодействие мегаструктур способствовало периодическому нарушению связи плюмово-мантийного очага Рудного Алтая с верхними этажами литосферы.

Далее следует отметить, что для вулканизма Змеиногорского прогиба характерна слабая количественная роль базальтов в ходе раннего и среднего девона и, наоборот, явная доминанта риолитовых вулканических построек и массовых туфовых извержений кислого состава. Это наводит на мысль об особой роли в этом процессе тектоники и флюидно-магматического режима, заключающейся в непостоянной связи каналов литосферно-корового магматизма с плюмово-мантийным очагом. По-видимому, что-то подобное проявлялось при формировании Тунгусской мегасинеклизы Сибирской платформы, где массовым извержениям траптовых лав предшествовали обильные туфовые извержения основного состава.

Вследствие кратковременного тектонического перекрытия связи вулканических каналов с плюмово-мантийным очагом предположительно происходил «отрыв» флюидонасыщенной головной колонны и проникновение ее в пределы метасоматизированной субдуцированной литосферной мантии и в гранитно-метаморфический слой. Под влиянием аномального тепла плюма и активного воздействия его головной флюидно-магматической части возникали литосферно-коровые промежуточные очаги, генерировавшие массовые извержения риодацитовых и риолитовых туфов. Интрузивный магматизм осевой зоны Рудно-Алтайского мегапрогиба, представленный на северо-востоке Алейским ГМК, не имел сообщения с поверхностью, но по тем же причинам, что и вулканизм, переживал пре-

кращение связи с глубинным очагом после внедрения тел пироксенитов и габбро. Оторвавшаяся часть интрузивно-магматической колонны субсинхронно, но с некоторым временным отрывом от вулканизма формировала промежуточные очаги, генерировавшие большие объемы плагиогранитных и гранитных магм.

На завершающих этапах девонской истории связь с глубинным очагом возобновилась и способствовала внедрению многочисленных тел даек основного состава – габбро-долеритовые штоки и дайки V фазы змеиногорского комплекса (D₃fm). Характерно, что вулканизм прогибов так же завершился внедрением даек долеритов и излиянием базальтовых в составе каменевской и шипуновской свит (фран – фамен).

Выводы

1. Интрузивный магматизм в пределах Алейского ГМК начал проявляться с базитовой составляющей – габбро и пироксенитов – в эмском веке (402±10 млн лет), а в конце раннего девона сменился выплавкой больших объемов плагиогранитных, гранитных и лейкогранитных масс.

2. Эмский и эйфельский базитовый магматизм района имеет плюмовое происхождение, близкое к источнику PREMA. Единным протолитом является шпинелевый лерцолит.

3. Вулканисты прибортовых депрессионных зон, в частности Змеиногорского прогиба, через подводящие каналы имели непосредственную связь с мантийными глубинами, вследствие чего долериты сохранили мантийную последовательность. Интрузивные же фации вследствие объемной ассимиляции или за счет поглощения мигрирующих флюидов контаминированы коровым веществом островодужного этапа развития Горного Алтая.

4. Тектонический режим способствовал прерыванию связи литосферных промежуточных магматических очагов с мантийными источниками, вследствие чего происходила выплавка в раннем и среднем девоне преобладающих по объему кислых магм.

Список литературы

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Алтайская. Лист М-44-ХI (Змеиногорск). Объяснительная записка / Составители: С.И. Федак и др., редактор: В.М. Исаков. М. – СПб., 2008. 263 с.

2. Kruk N.N., Kuybida M.L., Murzin O.V. et al. Granitoids of the North-West Altai. Guide of geological excursions (21–27 August 2014, Zmeinogorsk, Russia) of the 2nd International Geological Conference «Granites and Earth's evolution: granites

and continental crust» (17–20 August 2014, Novosibirsk, Russia) / Sci. ed. A.G. Vladimirov. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2014. 84 p.

3. Gorton M.P., Schandl E.S. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for Arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks // *The Canadian Mineralogist*. 2000. Vol. 38, Is. 5. P. 1065–1073. DOI: 10.2113/gscanmin.38.5.1065.

4. Boyce J.A., Nicholls I.A., Keays R.R., Hayman P.C. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex poly-magmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. Vol. 169 (11). DOI: 10.1134/S0869591121010082.

5. Cabanis B., Lecolle M. The La/10-Y/15-Nb/8 diagram: a tool for discrimination volcanic series and evidencing continental crust magmatic mixtures and/or contamination (en) // *Compte Rendus de l'Académie des Sciences. Series II*. 1989. Vol. 309, Is. 20. P. 2023–2029.

6. Khanna T.C. Sesha Sai V.V., Bizimis M., Krishna K. Petrogenesis of Basalt–high-Mg Andesite–Adakite in the Neoproterozoic Veligallu Greenstone Terrane: Geochemical evidence for a rifted back-arc crust in the eastern Dharwar craton, India // *Precambrian Research*. 2015. Vol. 258. P. 260–277. DOI: 10.1016/j.precamres.2015.01.004.

7. Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // *Lithos*. 2021. Vol. 392–393. 106068. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106068.

8. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. Vol. 79, Is. 3–4. P. 491–504. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.09.014.

9. Гринев О.М., Бестемьянова К.В., Гринев Р.О. Морфоструктуры и вещественный состав эмс-раннейфельских вулканистов Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // *Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием (28 ноября – 2 декабря 2017 г.)*. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2017. С. 118–127.

10. Yang G., Li Y., Xiao W., Sun Y., Tong L. Petrogenesis and tectonic implications of the middle Silurian volcanic rocks in northern West Junggar, NW China // *International Geology Review*. 2014. Vol. 56, Issue 7. DOI: 10.1080/00206814.2014.905214.

11. Гринев О.М., Семиряков А.С., Бестемьянова К.В., Гринев Р.О. Морфоструктура и этапность формирования Змеиногорского барит-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 8. С. 81–95. DOI: 10.17513/use.37872.

12. Дьячков Б.А., Мизерная М.А., Пяткова А.П., Бисатова А.Е., Мирошникова А.П., Кузьмина О.Н., Зимановская Н.А., Ойцева Т.А., Черненко З.И. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая // *Отечественная геология*. 2021. № 5. С. 3–16. DOI: 10.47765/0869-7175-2021-10024.

13. Bi J.-H., Ge W.-C., Yang H., Zhao G.-C., Xu W.-L., Wang Z.-H. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Dongfanghong gabbroic complex at the eastern margin of the Jiamusi Massif, NE China: Petrogenesis and tectonic implications // *Lithos*. 2015. Vol. 234–235. P. 27–46. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.07.015.

14. Yang G., Li Y., Safonova I., Yi S., Tong L., Seltmann R. Early Carboniferous volcanic rocks of West Junggar in the western Central Asian Orogenic Belt: implications for a supra-subduction system // *International Geology Review*. 2014. Vol. 56. P. 823–844. DOI: 10.1080/00206814.2014.902757.

15. Бестемьянова К.В., Гринев О.М. Минералогия барит-полиметаллических месторождений Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 9. С. 210–222. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3370.