

## ПРИМЕНЕНИЕ РЯДА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГРАНИТОИДОВ ИЗ РАЗНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЗОН УРАЛА В КАЧЕСТВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИНДИКАТОРОВ ТИПА МАГМАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

© 2024 г. Г. Ю. Шардакова, В. В. Холоднов, А. В. Коровко, С. В. Прибавкин,  
Е. С. Шагалов, Н. А. Антонишин

На основе обобщения результатов лаборатории петрологии (последние 10 лет) по изучению гранитоидов из разных секторов Уральского Подвижного пояса продемонстрировано, как поведение ряда индикаторных элементов (Nb, Zr, Th, Ta, La, Y, Yb) и их отношения могут быть использованы для оценки состава магматических источников, степени их гетерогенности и геодинамических режимов формирования магматитов. Выбраны гранитоиды с  $\text{SiO}_2 > 63$  мас. %, имеющие широкий диапазон возрастов (1390–250 млн лет), образованные в разных геодинамических обстановках – многоактный континентальный рифтогенез, субдукция, (аккреция), коллизия, постколлизийные трансформные движения. Привлечены также данные по Nd-изотопии. Показано, что гранитоиды из разных структурных зон Уральского Подвижного пояса большей частью имеют гетерогенный, смешанный тип магматических источников: вклады OIB, E- и N-MORB, IAB меняются во времени. При этом сопоставление средних величин одного из ключевых отношений Nb/U (для примера) со средними значениями  $\epsilon\text{Nd}$  указывает на повышение роли вклада мантийно-корового источника типа IAB и “плюмового” – типа OIB в генерацию орогенных и собственно коллизийных гранитоидов и в целом на повышение роли корового компонента в субстрате. Очевидно, что достоверность палеогеодинамических реконструкций существенно возрастает при использовании всего комплекса данных по геохронологии, изотопии и геохимии.

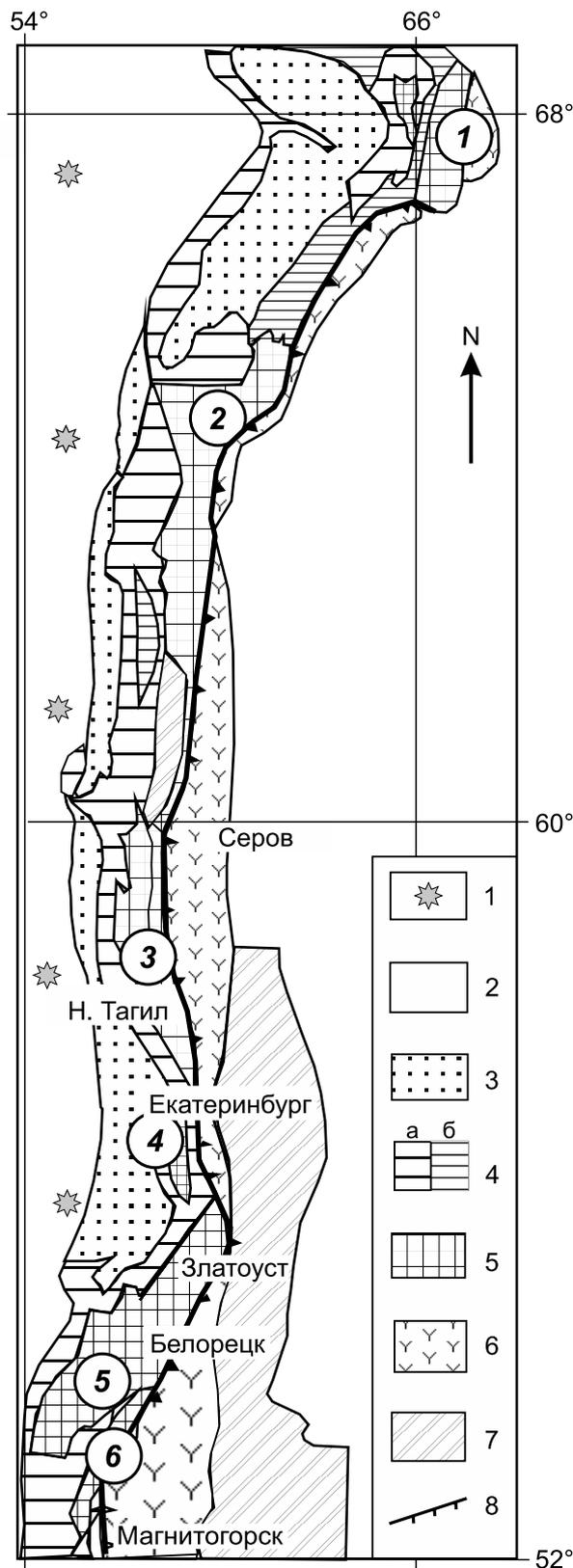
**Ключевые слова:** Уральский Подвижный пояс, гранитоиды, геохимия, изотопия, палеогеодинамика, тип субстрата

### ВВЕДЕНИЕ

В данной статье обобщены и дополнены результаты исследований “гранитной” группы лаборатории петрологии ИГГ УрО РАН, которые являются продолжением работ, начатых Г.Б. Ферштатером. В последние 5 лет публикации указанного коллектива, иногда совместно с сотрудниками других лабораторий, были посвящены минералогии, петрологии, изотопно-геохимическим особенностям многих гранитоидных массивов, как достаточно известных, так и почти не изученных. По породам многих из них, тем не менее, до сих пор отсутствуют изотопные данные, позволяющие оценить как тип магматического источника для выплавления гранитоидов, так и степень мантийно-корового взаимодействия при их генерации.

В настоящее время в петрологии развиваются представления о том, что в качестве косвенных признаков для оценки типа магматического источника можно использовать данные по соотношениям несовместимых элементов, в частности, элементов с близкими значениями комбинированных коэффициентов распределения между твердыми фазами и расплавом. Такие индикаторные отноше-

ния (Nb/U, Th/Ta, La/Yb, Zr/Nb, Ce/Pb) называют “каноническими” [Workman, Hart, 2005; Коваленко 2009а, б]. Среди этих элементов Zr-Nb и La-Yb “значительно разнятся по мантийной несовместимости” [Workman, Hart, 2005; Коваленко 2009а, б], но остаются постоянными как в процессе дифференциации исходных магм, так и при поздних процессах, которые могут быть наложены на магматические эдукты. Напомним, что для “эталонных” модельных источников (MORB, OIB, IAB), с которыми принято сравнивать особенности составов пород изучаемых объектов, характерны различные величины канонических отношений, тогда как отношения ряда сходных по несовместимости Nb-Ta и Zr-Hf в упомянутых типах источников – близки. Далее мы покажем на примере данных по более чем 30 массивов и комплексов, как величины ключевых отношений можно применить в качестве дополнительных геохимических критериев, позволяющих оценить тип магматических источников, черты сходства и различия в генезисе гранитов разных этапов геодинамического развития – доуральских (рифей-начало кембрия) и палеозойских, связанных с образованием и становлением собственно Уральского орогена.



**Рис. 1.** Схема тектонического районирования Урала [Пучков, 2010].

1 – отложения чехла Восточно-Европейского кратона; 2 – Западно-Сибирская плита: а – чехол, б – па-

леозойские отложения Зауральской мегазоны Урала под чехлом плиты; 3 – пермская моласса Предуральского краевого прогиба; 4 – Западно-Уральская мегазона: а – осадки Бельско-Елецкой зоны, б – Зилаир-Лемвинской зоны; 5 – Центрально-Уральская мегазона (цифрами в кружках обозначены антиклинории (блоки): 1 – Харбейский, 2 – Ляпинский, 3 – Ишеримский + Кваркушско-Каменногорский, 4 – Уфалейский, 5 – Башкирский, 6 – Уралтау); 6 – Тагило-Магнитогорская мегазона; 7 – Восточно-Уральская мегазона; 8 – Главный Уральский разлом.

### ЦЕЛИ, МЕТОДИКА, ОБЪЕКТЫ

Цель данной работы – показать черты сходства/различия в составах источников для гранитоидов, имеющих разный возраст и геодинамический режим формирования и становления. Для этого использована методика В.И. Коваленко – расчет индикаторных канонических отношений несовместимых элементов. Там, где это возможно, для сопоставлений привлечены данные по Nd-изотопии.

Кроме того, здесь нами использована авторская диаграмма Y-Nb с изолиниями величин отношения Y/Nb, которая показательна для реализации наших целей, и ранее нами была показана целесообразность ее применения для предварительных заключений о типе магматического источника и геодинамическом режиме [Холоднов и др., 2021a; 2022; Шардакова и др., 2023].

Анализы на редкие элементы были выполнены методом ICP-MS в лаборатории ФХМА ИГГ УрО РАН, позже преобразованной в ЦКП “Геоаналитик”, а также в Институте Гранады, Испания. Методы и лаборатории, в которых выполнялись U-Pb датировки (по цирконам), описаны в статьях, на которые даны соответствующие ссылки.

Набор объектов, гранитоиды которых в последнее десятилетие так или иначе рассматривались в работах сотрудников лаборатории петрологии, обширен. Далее последовательно приведены их набор и позиция на основе схемы [Пучков, 2010] (рис. 1). Центрально-Уральское поднятие, массивы: Мань-Хамбовский, Водораздельный (Ляпинский блок); Мойвинский, Велсовский, Посьмакский (Ишеримский блок); Никольский, Нижнеуфалейский (Уфалейский блок); Бердяушский, Уржумский, Киалимский, Юрминский, Рябиновский, Губенский, Ахмеровский (Башкирский блок); зона Главного Уральского разлома: Крутореченский, Крив-Вагранский, Сыростанский; Тагило-Магнитогорская мегазона: Ахуновский, Уйскоборский, Петропавловский, Верхнеуральский; Восточно-Уральская мегазона: Ялуниногорский, Синячихинский (островодужный сектор); Верхисетский, Мурзинский, Адуйский (северная часть мегазоны), Степнинский (южная часть). Большая часть данных о содержаниях элементов-примесей входит в базу данных лаборатории петрологии и опубликована в статьях, ссылки на которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. Объекты исследований: петротипы пород и современные возрастные датировки

№	Массив/комплекс	Изотопные параметры	Возраст*, млн лет, метод	Источник
1 2	Маньхамбо, I фаза II фаза	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = -2...+10$ $\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = -2.5...+6.7$	522 489, 507–513, 522	Udoratina et al., 2021; Холоднов и др., 2022
3	Водораздельный	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = +2...+6$	598	Шардакова и др., 2023
4	Мойвинский		530	Петров и др., 2014
5	Велсовский		566	Там же
6	Посьмакский		500	–“–
8	Никольский	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = +7$ , $\epsilon_{\text{Nd}} = +7$ $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70339$	520	Шардакова, 2016а, 2022; Шардакова, Червяковская, 2020
9	Н-Уфалейский	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70428$ $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +4$	317	Шардакова, 2016а
10	Слюдяногорская свита	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -3...-9$	1100–900 (до 515)	Нечеухин и др., 2000; Шардакова, 2016а
11	Бердяуш	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -2...-6$	1380	Ронкин и др., 2005, 2016
12	Рябиновский	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -2...+3$	1394	Краснобаев и др., 2006; Холоднов и др., 2017; Шардакова, 2016б
13	Губенский	То же	1388	Там же
14	Уржумский	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = +6$	336	Шардакова и др., 2020
15	Киалимский		314	Шардакова, 2016б
16	Юрминский к-с	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = 0...-2$ (неопубл)	540	Там же
17	Ахмеровский		1381	Краснобаев и др., 2008
18	Крутореченский	$\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = -6...-9$ , $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -6$	521	Шардакова, Коровко, 2021; Коровко и др., 2019
19	Крив-Вагранский	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70228$	639 (Rb-Sr)	Коровко и др., 2017
20	Сыростанский	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70338$	333–335	Ферштатер, 2013
21	Верхисетский	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +2...+5$	360–300	Путеводитель, 2017
22	Ахуновский	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +4$	310	Холоднов и др., 2021б; Салихов и др., 2019
23	Уйскоборский	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +6$	304	Там же
24	Петропавловский	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +3$ , $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70451$	347	–“–
25	Верхнеуральский	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = +1.5$ , $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70449$	362 (Rb-Sr)	Салихов и др., 2019
26	Степнинский	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70493$	283	Ферштатер, 2013
27	Ялуниногорский		D1	Прибавкин и др., 2018
28	Синячихинский		D1	Там же
29	Мурзинский массив	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.7042$ , $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -2...+2$	255	Шардакова и др., 2021; Ферштатер, Бородина, 2018; Ферштатер и др., 2018
30	Ватихский к-с	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = 0.70923$	250	
31	Южаковский к-с	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = -11.9...-8$ $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T}) = 0$	246	

\*Там, где не оговорено отдельно в скобках, представлены U-Pb датировки по цирконам.

Примечание. Породы представлены гранитами, кроме этого: Крив-Вагранский и Верхнеуральский массивы – граносиениты, Степнинский – граносиениты и граниты, Ялуниногорский и Синячихинский – гранит-порфиры, Верхисетский – диапазон параметров приведен для гранитов разных серий, см. ссылку.

Рассматриваемые здесь гранитоиды ( $\text{SiO}_2$  более 63 мас. %) из многих объектов входят в состав интрузивных серий, но мы не имеем возможности обобщать их эволюционные тренды.

### ЭТАПЫ ГРАНИТООБРАЗОВАНИЯ

Изученные гранитоиды имеют широкий диапазон возрастов и образованы в разных геодинамических обстановках (см. табл. 1). Наиболее древние из них, докембрийские граниты Бердяушского, Рябиновского, Губенского и, возможно, Амеровского массивов и гранитогнейсы в составе слюдяногорской свиты (доуралиды [Пучков, 2010]), приурочены к фрагментам Восточно-Европейской платформы (Башкирский и Уфалейский блоки), отделенным от ее края в результате рифейского рифтогенеза и скученные в зоне аккреции в палеозое в ходе собственно уральских орогенных событий. Основным источником энергии и, вероятно, вещества для магматитов этого этапа служил так называемый “машакский” плюм – крупнообъемный мантийный диапир, продукты деятельности которого фиксируются в виде дайковых роев в разных частях земного шара и объединены в древнюю LIP – крупную изверженную провинцию [Пучков, 2018]. Для ряда гранитов из этих массивов имеются данные по изотопии (см. табл. 1), например, величины  $\epsilon\text{Nd}$  изменяются от  $-9$  до  $+3$ .

Гранитоиды венд-кембрийского этапа, приуроченные к структурам западного склона Урала (в современных координатах), внедрялись в диапазоне 489–598 млн лет. Поскольку северная, средняя и южноуральская части протяженной аккреционной зоны между Уральским орогеном и Восточно-Европейской платформой развивались не вполне синхронно, геодинамическая их природа, этапы гранитообразования, степень мантийно-корового взаимодействия при генерации и изотопные характеристики очень сильно различаются. Геодинамические ситуации внедрения гранитоидов: Тиманский орогенез и постколлизийные движения (север) + плюм, импульсы рифтогенеза, трансформные движения (среднеуральская часть), кратковременное существование островной дуги (?) (крайний юг) [Самыгин и др., 2010]. Данные по изотопии Nd, которые, по мнению авторов, наиболее надежно характеризуют особенности источника, почти отсутствуют;  $\epsilon\text{Hf}$  (по цирконам) изменяется от  $-2$  до  $+10$ .

Гранитоиды венд-кембрийских массивов, лежащих в контурах зоны Главного Уральского разлома и, возможно, представляющих собой чужеродные блоки: Крив-Вагранский (639 млн лет) и Крутореченский (521 млн лет), также сильно различаются по роли мантийного и корового компонентов в источнике расплавов. Данные по изотопии Sr в гранитах Сыростанского массива, “запечатывающего”

зону ГУР и фиксирующего в этом секторе финальную стадию субдукции (335 млн лет), несут признаки участия в их образовании существенной доли мантийного вещества.

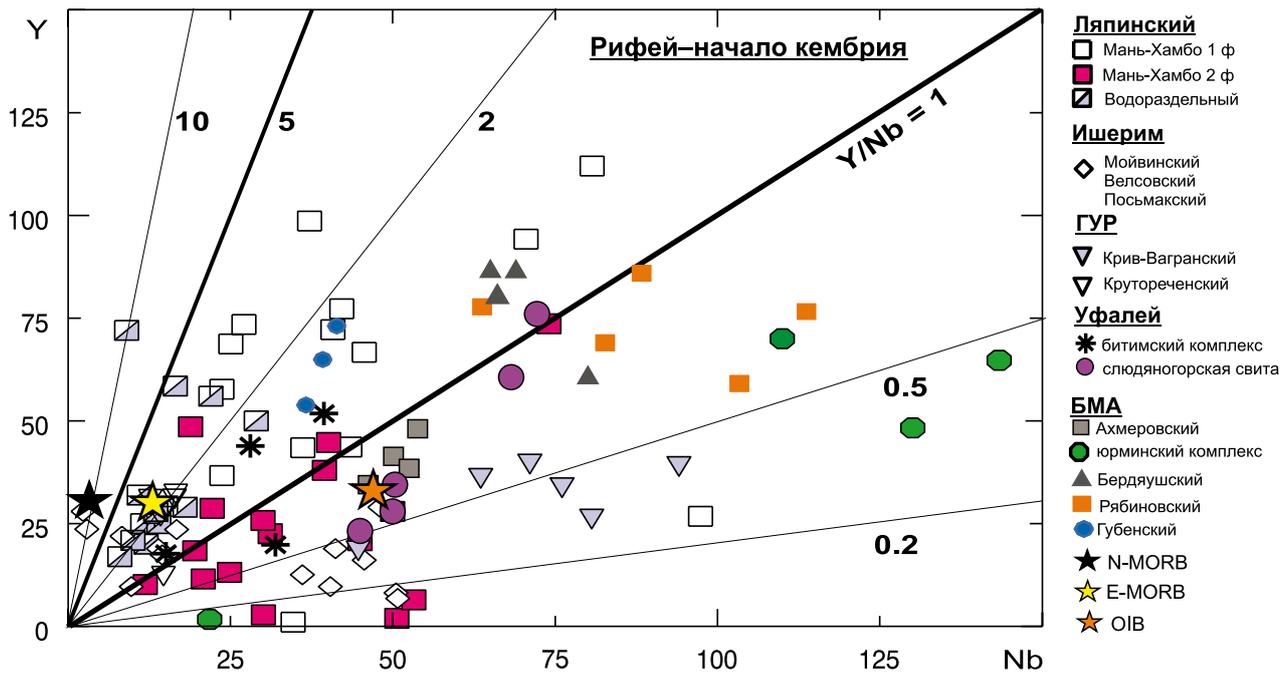
Большая часть гранитоидов Тагило-Магнитогорской мегазоны, внедренных в диапазоне 362–304 млн лет (Степнинский – 283 млн лет), имеет положительные значения  $\epsilon\text{Nd}$  и величину  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  не выше 0.704 [Ферштатер, 2013].

Гранитоиды континентального сектора Урала, здесь представленные гранитами мурзинского комплекса (246 млн лет), входящего в контуры полихронного одноименного массива, и внедренные в древние гнейсы, которые являются породами фундамента микроконтинентального блока, имеют  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7042$  и большой разброс величины  $\epsilon\text{Nd} = -8 \dots +4$ . Граниты сопряженного ватихского комплекса гораздо более “коровые”  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7093$ ,  $\epsilon\text{Nd}(\text{T})$  от  $-11.9$  до  $-0.05$  [Ферштатер, 2013].

### Y/Nb-ИНДЕКС И “КАНОНИЧЕСКИЕ” ОТНОШЕНИЯ В ГРАНИТОИДАХ РАЗНЫХ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ (ДОУРАЛИДЫ И УРАЛИДЫ) И ИХ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

**1. Доуралиды (рифей–начало кембрия).** Ранее на примере ряда палеозойских габбро-гранитных серий было показано, что для гранитоидов разных геодинамических обстановок характерны свои вариации величины Y/Nb-индекса, а позиция на диаграмме Y–Nb точек ключевых магматических комплексов позволяет провести первичную геохимическую типизацию магматических серий, наметить геодинамический режим и тип источника первичных магм [Холоднов и др., 2022]. Составы изученных гранитоидов на диаграмме Y–Nb (рис. 2, 3) четко распределяются в соответствии с геодинамическими режимами их формирования, которые связаны с типами мантийных источников [Sun, McDonough, 1989]. Nb наряду с Ti и Ta является типоморфным элементом для обогащенных мантийных магм. Существенное увеличение в них содержания Nb указывает на участие в магомгенерации плюмовых источников, подобных E-MORB и OIB-типам, тогда как значительное снижение содержания Nb при выдержанных концентрациях Y характеризует повышение деплетированности магматических источников (от OIB- к E-MORB и N-MORB).

Проследим поведение этих индикаторных элементов сначала в гранитоидах доуральского этапа развития. Наиболее древние среди них – породы Бердяушского плутона, Губенского, Рябиновского и Амеровского массивов, относимых к продуктам “машакского” плюма, а также гранитогнейсы юрминского комплекса (все объекты из контуров Башкирского блока) и слюдяногорской сви-



**Рис. 2.** Соотношения Y-Nb в гранитах рифейско-венд-кембрийского возрастного интервала из разных структурных зон Урала.

Области между изолиниями с величиной Y/Nb-индекса: 20–5 – магматизм островных дуг; 5–1 – активных окраин конвергентного и трансформного типов; 1.0–0.2 и менее – плюм-зависимые серии внутриплитного типа [Холоднов и др., 2021a, 2022; Шардакова и др., 2023].

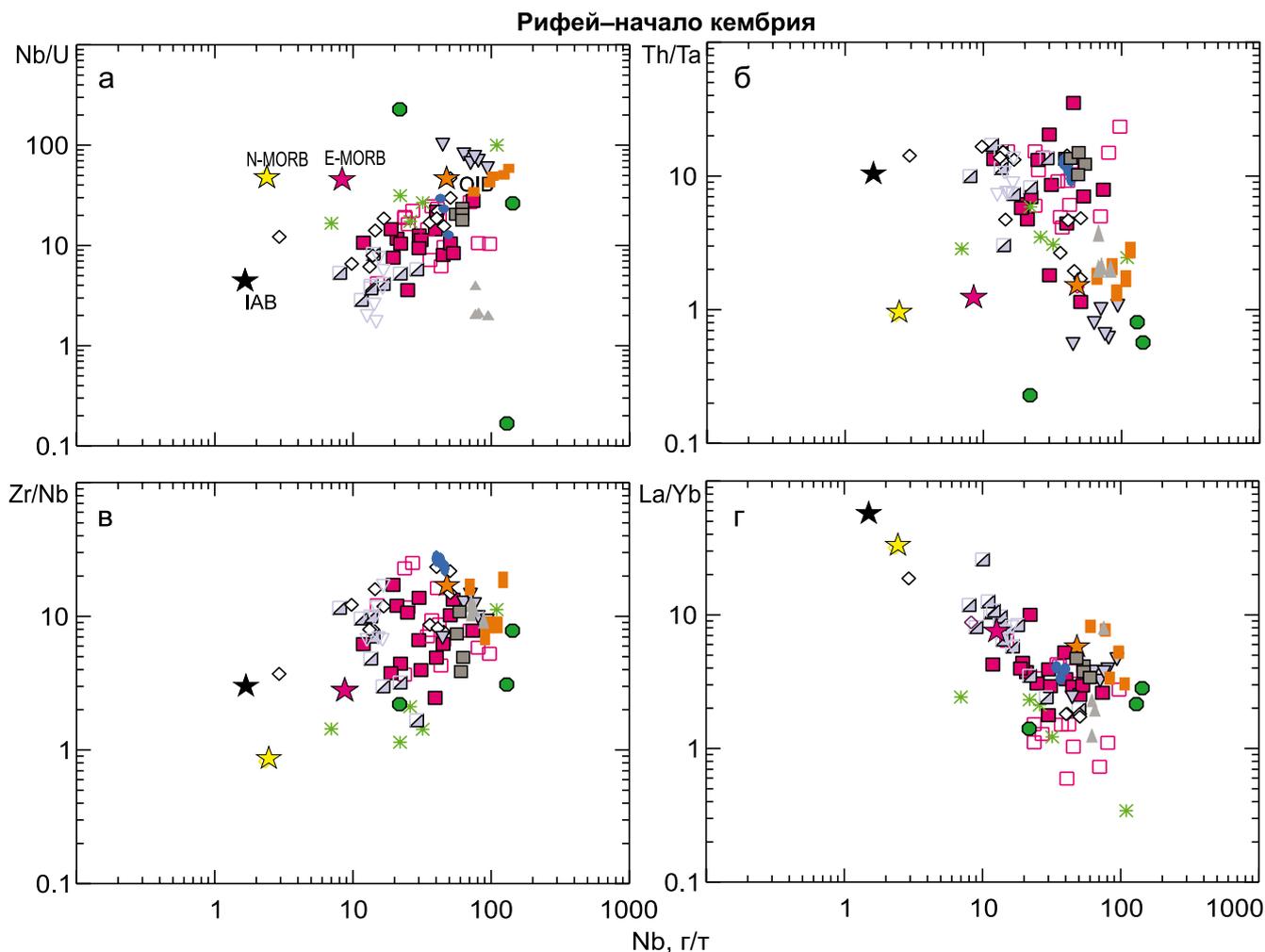
ты (Уфалейский блок, геологически обоснованный возраст – древнее венда [Шардакова, 2016a]). Все они имеют не очень широкий диапазон вариаций содержаний Y (20–75 г/т) при более существенном интервале по Nb (30–150 г/т). Величина Y/Nb-индекса в большинстве проб 0.5–1.5, что близко к этому параметру в OIB и характерно для обогащенного источника, имеющего место при генерации плюм-зависимых образований.

Показательно поведение этих компонентов в гранитоидах Ляпинского антиклинория (Маньхамбо, две фазы, и Водораздельный массивы). Породы I фазы массива Маньхамбо (юг структуры) имеют  $Y/Nb = 1–3$  (позиция точек близка к E-MORB), тогда как для большей части проб II фазы эта величина  $<1$  (около значений в OIB). В работе [Холоднов и др., 2022] на основе широкого набора петрогеохимических данных показано, что для кислых пород массива Маньхамбо, которые могли образоваться при дифференциации близких по составу первично обогащенных Nb мантийных магм, участие корового компонента также имело место (граниты II фазы массива Маньхамбо). Наряду с этим наличие значительного объема кислых пород в позднем венде и кембрии в Маньхамбовском блоке предполагает присутствие на глубине также крупных масс дифференцированного плюм-зависимого базитового вещества. Это в определенной мере подтверждают и геофизические данные.

Авторы работы [Холоднов и др., 2022] предлагают считать Маньхамбовский блок, насыщенный магматами среднерифейско-венд-кембрийского возраста, фрагментом трансформной континентальной окраины, на которой рифтогенез сопровождался внедрением вещества обогащенного мантийного диапира, одновременно с участием слэбового компонента, а на верхних уровнях – при контаминации – коровым компонентом.

Совершенно иные признаки характерны для гранитов массива Водораздельный (север Ляпинского антиклинория, Кожимский блок). Их петрогеохимические особенности свидетельствуют о том, что эти породы относятся к I-гранитам и являются надсубдукционными образованиями [Шардакова и др., 2023]. В их генерации участвовали преимущественно базиты плавящегося слэба и флюид, отделившийся при их дегидратации. Это подтверждает и величина  $Y/Nb = 2–10$ , характерная для типичных гранитов, образование которых связано с субдукционными процессами.

В гранитах крутореченского комплекса (521 млн лет), лежащих в блоках полимиктового меланжа зоны ГУР, также проявлено некоторое влияние субдукционного компонента, но улавливается и воздействие плюмового фактора ( $Y/Nb = 2$ , компонент OIB), тогда как изотопные параметры подчеркивают важную роль корового (см. табл. 1) вещества. В то же время породы из другого фрагмен-



**Рис. 3.** Величины “канонических” [Коваленко и др., 2009a] отношений в древних (рифей–начало кембрия) гранитах из разных зон Урала в сравнении со средними составами мантийных источников.

Условные обозначения – см. рис. 2.

та из зоны ГУР, Крив-Вагранского массива (638 млн лет), по величине  $Y/Nb < 1$  и высоким содержаниям Nb более всего соответствуют геохимическим параметрам плюм-зависимых образований. Первичное отношение изотопов Sr здесь низкое, “мантийное”. Это не противоречит ранее высказанному предположению [Коровко и др., 2017], что Крив-Вагранский массив может быть отторженцем докаледонского основания раннепалеозойского рифта на восточной окраине Русской платформы. Близкой величиной отношения  $Y/Nb$  (1 и менее, почти в точке OIB) характеризуется большая часть гранитоидов из расположенного западнее зоны ГУР Ишеримского антиклинория (Мойвинский и Велсовский массивы), по поводу природы которых есть разные мнения.

Гранитоиды Никольского массива (битимский комплекс, Уфалейский блок), почти аналогичного по возрасту указанным гранитам зоны ГУР и Ише-

римского блока, имеют величину  $Y/Nb$  от 0.6 до 1.5 при “мантийных” метках изотопов Sr и Nd. Породы этих объектов также можно отнести к продуктам повторных (трансформных?) движений по глубокому, ранее существовавшему рифтогенному нарушению, при влиянии энергии и/или вещества мантийного диапира [Шардакова, Червяковская, 2020].

На рис. 3 представлены величины “канонических” отношений в гранитоидах описываемых объектов в сравнении со средними составами эталонных источников (N-MORB, E-MORB, IAB, OIB) [Sun, McDonough, 1989; Kelemen et al., 2007]. К позиции источника OIB-типа на всех графиках приближены точки плюм-связанных (что фиксируется и по другим параметрам) образований: Рябиновского, Губенского, Ахмеровского и Крив-Вагранского массивов. Отметим, что точки бердяшских гранитов сильно сдвинуты от этого репера вниз на гра-

фике Nb/U–U за счет повышенных содержаний U. На остальных графиках (см. рис. 3б–г) позиция точек этих гранитов близка к ОИВ.

Точки составов гранитов Ишеримского антиклинория (три массива, см. табл. 1) лежат практически линейно в направлении от IAB к ОИВ; наиболее приближены к обогащенному источнику граниты самого молодого, раннекембрийского Велсовского массива, которые Г.А. Петров с соавторами [2014] относят к коллизионным образованиям, тогда как более ранние, вендские (Мойвинский и Посьмакский) – к надсубдукционным. То есть по мере эволюции расплава в гранитах Ишеримского блока возрастает доля обогащенного вещества в источнике. Подобная тенденция фиксируется и в изменении состава фаз гранитов массива Маньхамбо (также отражено на рис. 3). В.Н. Пучков относит граниты обеих этих структур к продуктам деятельности “маньхамбовского” плюма [Пучков, 2018]. Возможно, с начальными этапами его деятельности связаны и породы Крив-Вагранского массива, причлененного в зону ГУР (как вариант) из близлежащего Ишеримского окраинно-континентального блока [Коровко и др., 2017].

На рис. 3а можно проследить некоторый сдвиг точек битимского комплекса в сторону E-MORB, а составы явных субдукционно-зависимых образований – Крутореченского и Водораздельного массивов (на всех графиках) – приближены к позиции IAB, что вполне закономерно.

Отметим, что по соотношению Nb–Zr/Nb (см. рис. 3в) положение большей части точек всех объектов близко к ОИВ. Лишь составы двух указанных

“надсубдукционных” гранитов более других на ярко выраженном линейном тренде сдвинуты в сторону источника (E-MORB), не достигая значений IAB.

**2. Уралиды (средний палеозой–пермь).** Для гранитоидов более поздних, палеозойских этапов развития Уральского подвижного пояса и становления его зрелой континентальной коры характерны в целом более низкие, чем в доуралидях, уровни содержаний Y и особенно Nb, как, собственно, и для “коровых” эталонов (НKK, ВKK). Несмотря на возможное присутствие значительной доли силикатического вещества в субстрате для выплавления некоторых из них, они также имеют существенный разброс по уровню содержаний Nb и Y и величине Y/Nb-индекса (рис. 4). Наиболее высокие содержания Nb характерны для гранитоидов постколлизионного Степнинского массива на Южном Урале (показано серым полем на рис. 4). Считается, что особенности петрогеохимии пород этого массива подтверждают его плюма-зависимую природу [Пучков, 2018].

Максимальная (среди последевонских образований) величина Y/Nb около 2 присуща породам Петропавловского массива (Магнитогорская мегазона, Ахуново-Петропавловский ареал), в которых концентрации Nb не превышают 5 г/т, а изотопные параметры Sr, Nd указывают на присутствие деплетированного мантийного материала в субстрате. В работе [Холоднов и др., 2021б] показано, что для источника расплавов, исходных для пород Петропавловского массива, характерен вклад субдукционного компонента и процессов флюидно-

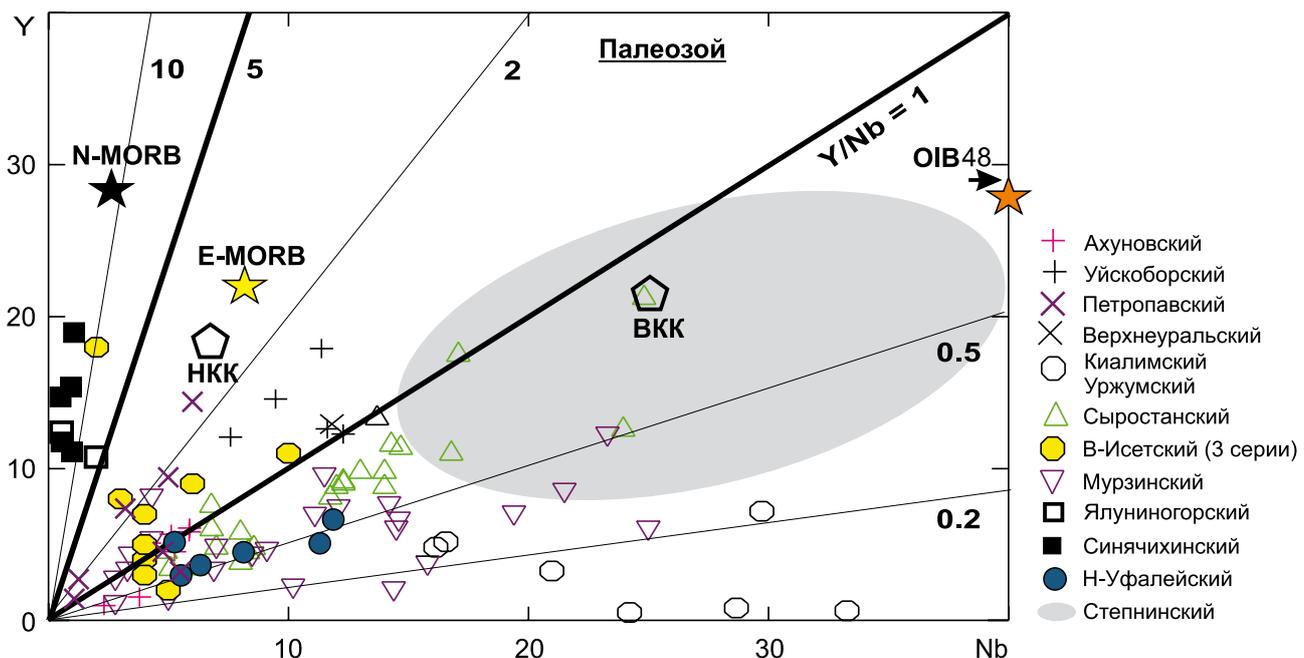


Рис. 4. Соотношения Y–Nb в гранитах (девон–пермь) из разных структурных зон Урала.

магматического взаимодействия. Это наиболее ранний, “фемичный” по составу субстрата член Ахуново-Петропавловского гранитоидного ареала. Для других представителей этой группы отношения  $Y/Nb$  понижаются от Уйскоборского массива (от  $<2$  до 1) к Верхнеуральскому (1.0) и Ахуновскому (0.5). Анализ данных показывает, что в отличие от множества магматических полигенных массивов Уральского орогена направление эволюции изотопно-геохимических параметров при гранитообразовании в данном ареале прямо противоположно: от Петропавловского и Верхнеуральского массивов – к интрузиям ахуново-карагайского комплекса и далее к Уйскоборскому. Это указывает на их формирование из различного субстрата, а также на разную интенсивность процессов мантийно-корового взаимодействия. Это отражается и на величине  $Y/Nb$ .

Геодинамическая ситуация в ходе формирования этого полихронного ареала менялась: импульсы гранитоидного магматизма чередовались с этапами коллизионных сдвига-раздвиговых деформаций и рифтогенного растяжения. На раннем этапе, собственно, и был образован Петропавловский габбро-гранитоидный массив (347 млн лет), сходный с надсубдукционными образованиями – продуктами плавления мантийного субстрата. Затем (310–306 млн лет), на этапе коллизионного сжатия, внедрялись мантийно-коровые интрузии ахуново-карагайского гранодиорит-гранитного комплекса, близкие к окраинно-континентальным габбро-тоналит-гранодиорит-гранитным (ГТТГ) батолитам Среднего Урала (точки средних составов серий Верхисетского массива на рис. 4 лежат рядом с ахуновскими). На финальном этапе, при переходе от окраинно-континентального режима к более жесткой коллизии между Восточно-Европейским и Казахстанским континентами, при усилении интенсивности сдвига-раздвиговых деформаций внедрялся Уйскоборский граносиенит-гранитный массив (304 млн лет), более богатый калием и HFSE.

Граниты Сыростанского массива, который блокирует средне-южноуральскую часть зоны ГУР и фиксирует завершение субдукции на окраине континента, имеет  $Y/Nb = 0.5–1.0$  и содержания этих элементов, близкие к таковым однотипных пород Ахуново-Петропавловского ареала, что вполне логично.

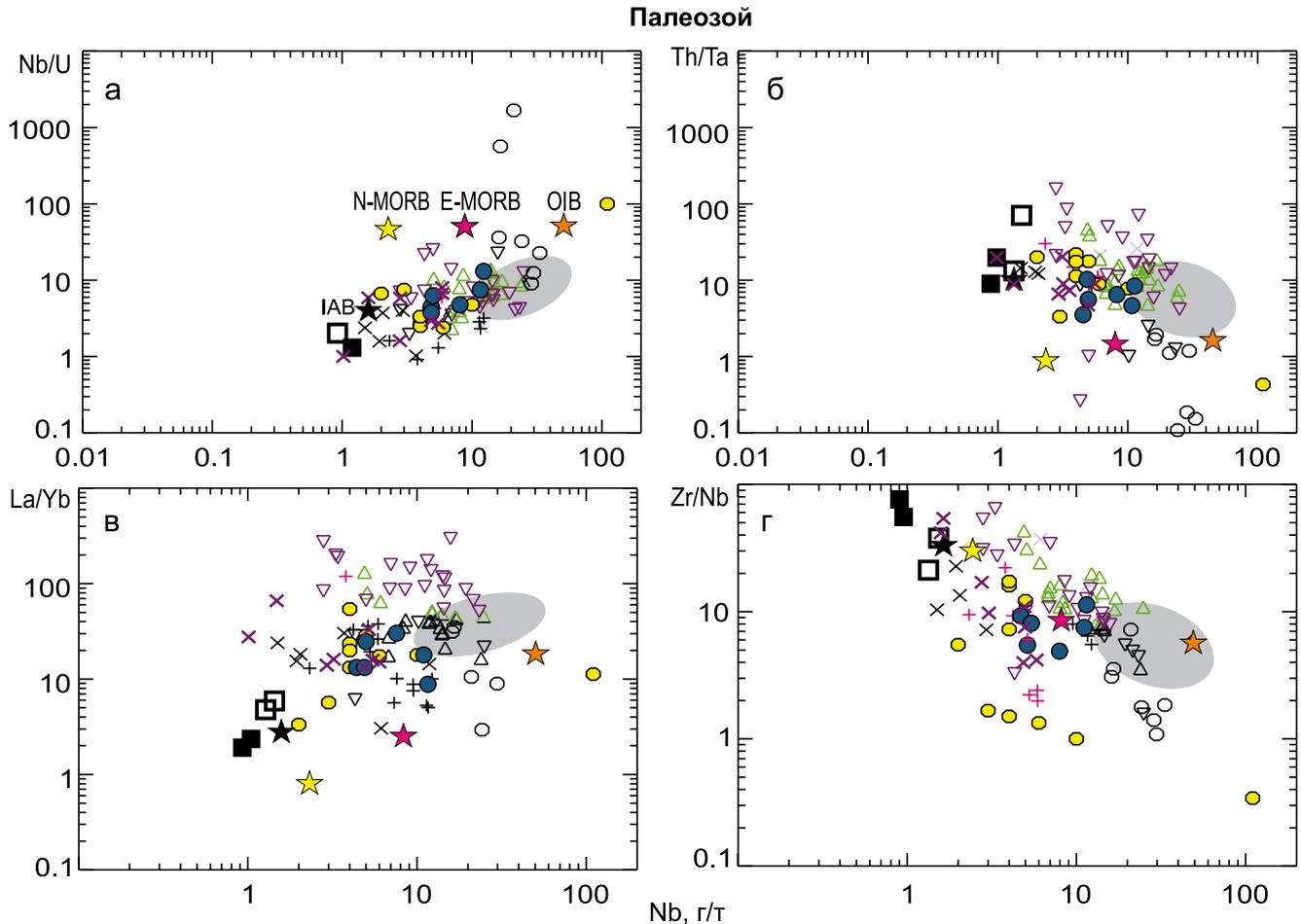
Несколько обособляются на рис. 4 точки гранитов Киалимского и Уржумского массивов, находящихся к западу от Сыростанского, в контурах Башкирского мегантиклинория. По петрогеохимическим особенностям и возрасту они близки к раннеорогенным (надсубдукционным) образованиям [Шардакова, 2016б; Шардакова и др., 2020], петротипом которых являются гранитоиды Верхисетского массива. В то же время в отличие от ранноро-

генных “эталонов” для них фиксируется минимальная величина  $Y/Nb < 0.5$  при высоких концентрациях Nb, что нетипично для пород данной геодинамической обстановки, а скорее присуще плюм-зависимым магматитам. Ранее мы показали наличие рифейских образований такого типа в пределах Башкирского мегантиклинория. Во всяком случае, присутствие в источнике расплавов OIB-компонента для палеозойских орогенных гранитов этой структуры можно констатировать.

Граниты “межформационного” [Ферштатер, Бородин, 2018; Ферштатер и др., 2018] Мурзинского массива, молодого, типично коллизионного образования, приуроченные к одноименному микроконтинентальному блоку (Средний Урал), имеют разброс величины  $Y/Nb$  от 0.2 до 1.2. Содержания Nb более высоки в гранитах мурзинского комплекса, которые при этом имеют самое низкое среди описываемых аналогов первичное отношение изотопов Sr и высокое –  $\epsilon Nd$ . По мнению Г.Б. Ферштатера, “изотопные характеристики разновозрастных (255 млн лет) гранитов ватихского ( $Sr_i = 0.70868–0.70923$  и  $\epsilon Nd(T)$  от  $-8.9$  до  $-11.9$ ) и мурзинского ( $Sr_i = 0.70419–0.70549$ ,  $\epsilon Nd(T)$  от  $-2.6$  до  $+2.3$ ) комплексов указывают на то, что субстратом первых были протерозойские гранитогнейсы, а вторых – породы новообразованной коры, возможно, сходные с силуро-девонскими вулканогенно-осадочными толщами, контактирующими с мурзинскими гранитами” [Ферштатер, Бородин, 2018]. В пользу большей сиаличности субстрата может говорить и отличная от других комплексов минимальная величина  $Y/Nb$  в гранитах ватихского комплекса.

На рис. 5 представлены величины индикаторных отношений в гранитах более молодых этапов развития уже собственно Уральского палеозойского орогена в сравнении со средними составами эталонных источников (N-MORB, E-MORB, IAB, OIB). Видно, что точки пород большинства объектов формируют вытянутые поля между IAB–(E-MORB)–OIB. Типичные девонские островодужные образования, Ялуниногорский и Синячихинский массивы, составы которых для явного контраста также приведены на рис. 4 (где для них  $Y/Nb > 5–10$ ) и рис. 5, лежат близко к IAB, как и на рис. 4 – в зоне островных дуг. В эту же сторону сдвинуты точки наиболее ранних гранитоидов Верхисетского плутона и Верхнеуральского массива – окраинно-континентальных образований.

К OIB (как и в случае с  $Y/Nb$ ) тяготеют составы гранитоидов Степнинского, а также Киалимского или Уржумского массивов. Некоторая часть точек двух последних массивов сдвинута и в сторону E-MORB. По нашему мнению, уржумские граниты могут иметь одни корни и с породами обогащенного Nb Сыростанского массива. На всех графиках рис. 5 они продолжают (в сторону OIB) поле сыро-



**Рис. 5.** Величины “канонических” отношений в гранитоидах (девон–пермь) разных зон Урала в сравнении со средними составами мантийных источников.

Условные обозначения – см. рис. 4, пояснения – в тексте.

станских гранитов, указывая на вовлечение в магмообразование обогащенного мантийного компонента: изотопные метки также этому соответствуют (см. табл. 1).

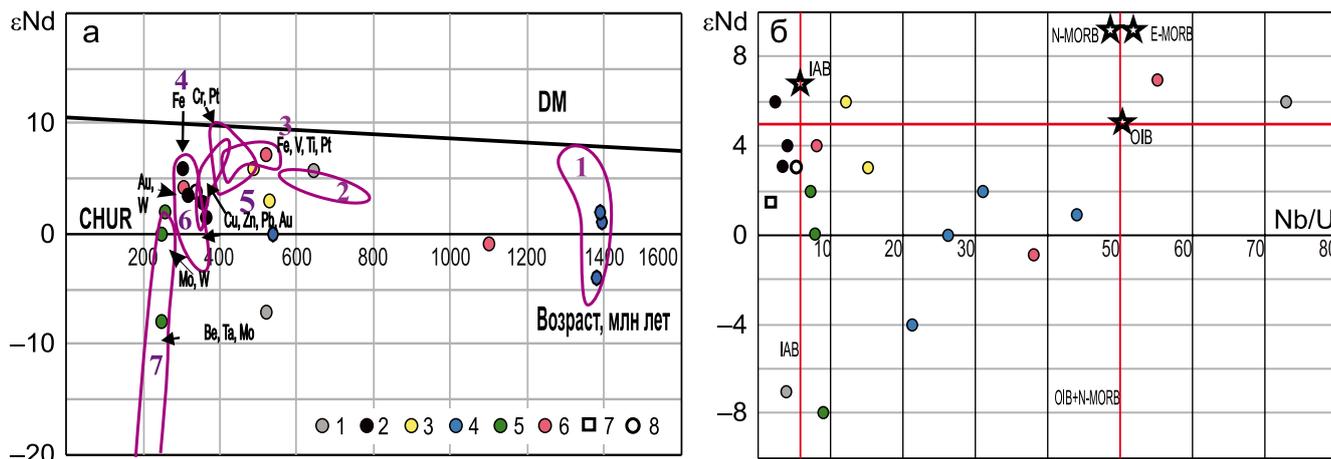
По уровням ключевых отношений ряд точек гранитов Петропавловского массива сдвинут в сторону IAB, что объясняется, вероятно, вовлечением в их генерацию существенного объема более деплетированного мантийного материала.

В целом гранитоиды уральских этапов развития относительно доуралид имеют существенно более низкие отношения Nb/U на фоне общего спада в содержаниях Nb (см. рис. 5а) при заметно повышенных Th/Ta, La/Yb и Zr/Nb, особенно в синколлизийных гранитах Мурзинского массива (см. рис. 5б–г). Среди исследованных массивов послекембрийского возраста доля надсубдукционных гранитоидов (с учетом островодужных образований) явно преобладает над плюм-зависимыми сериями, роль источника типа OIB возрастает в период жесткой коллизии континентов в пермский период орогенеза.

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ЭВОЛЮЦИЯ ТИПОВ МАГМАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Наиболее информативны с точки зрения роли мантийного материала в субстрате, конечно, изотопно-возрастные данные в комплексе с геохимическими. На рис. 6б нанесены возраст –  $\epsilon\text{Nd}$  (рис. 6а) и средние “метки”  $\epsilon\text{Nd}$  по отношению к средним величинам отношений Nb/U (для примера, рис. 6б) для тех объектов, по которым эти данные имеются.

Для подавляющей массы гранитоидов характерно отсутствие признаков деплетированного мантийного вещества в источнике. Показана также позиция исследуемых гранитов на схеме Г.Б. Ферштатера с соавторами [2018], демонстрирующей связь магматических серий с рудообразованием. Возраст гранитоидов Уфалея (слюдяногорская свита) показан условно, поскольку валидные современ-



**Рис. 6.** Соотношения средних величин  $\epsilon Nd$  с возрастом (а) и величиной отношения Nb/U (б) в изучаемых гранитоидах.

а – поля рудоносных магматических образований из [Ферштатер и др., 2018]: 1 – массивы, Ti-Fe-V и редкометалльные магматогенные месторождения Башкирского мегантиклинория; 2 – лерцолитовые комплексы Южного Урала (Нурали, Миндяк) и базиты Кваркушского антиклинория; 3 – массивы и Fe-V-Ti-Pt месторождения Уральского платиноносного пояса; 4 – офиолитовые массивы (с Cr-, Pt-оруденением); 5 – островодужные ассоциации (Cu, Zn, Au, Pb); 6 – окраинно-континентальные массивы и месторождения (Cu-Mo, Au-W, Fe-Ti-V); 7 – позднеорогенные и орогенные массивы и рудоносные комплексы (Mo-W, Be-Ta-Li и др.).

б – границы “полей” взаимодействия источников разных типов [Коваленко и др., 2009а]. Точки исследуемых гранитоидов (см. табл. 1) из массивов разных структур и зон: 1 – зоны ГУР, 2 – Магнитогорской мегазоны; 3 – Маньхамбовского блока; 4 – Башкирского мегантиклинория; 5 – Мурзинско-Адуйского блока; 6 – Уфалейского блока; 7, 8 – Восточно-Уральской мегазоны: 7 – островодужные плагиигранитоиды, несущие Cu-порфиоровое оруденение (неопубликованные данные Г.Ю. Шардаковой), 8 – окраинно-континентальные (Верхисетский).

ные датировки пока отсутствуют; вероятно, поэтому точка их состава лежит между полями.

Произвести увязку Nd-изотопии с типом магматического источника [Коваленко и др., 2009а] мы попытались на рис. 6б (приведя среднюю величину одного из “канонических” отношений – Nb/U, где мантийные источники (MORB, OIB) отделены от мантийно-корового (IAB)). Для образований, для которых и другие особенности петрогеохимии указывают на связь с мантийным плюмом (среднерифейских гранитов БМА и кембрийских гранитов и I фазы Маньхамбовского массива), фиксируется позиция в средней части смешения мантийных источников MORB и OIB. Сдвиг в область отрицательных значений  $\epsilon Nd$  (Бердяуш, гнейсы слюдяногорской свиты) указывает на присутствие существенной добавки сиалического вещества в субстрате. На это же указывают и повышенные величины первичного отношения Sr в данных породах.

В поле влияния обогащенного мантийного источника E-MORB находится точка гранитогнейсов Никольского массива (начало кембрия), для которых характерны самые высокие величины  $\epsilon Nd$  (+7) и Hf (+7) и низкое, “мантийное”  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.70339$ , а также гранитов Крив-Вагранского массива (венд), имеющего близкие параметры.

В поле источников OIB + IAB лежит состав гранитов II фазы массива Маньхамбо, гранитов Нижнеуфалейского (карбон) и Мурзинского (пермь)

массивов. При этом для пород последнего характерна наибольшая гетерогенность, что отражается и в величинах  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  (см. табл. 1). В поле влияния источников IAB + MORB попадают точки гранитов Крутореченского и массивов Магнитогорской (палеостроводужной) мегазоны. Для последних наиболее близка к IAB точка уйскоборских гранитов (304 млн лет), внедряющихся при усилении интенсивности сдвига-раздвиговых (трансформных) движений при смене окраинно-континентального режима на жесткую коллизию между Восточно-Европейским и Казахстанским континентами.

Таким образом, путем обращения к данным по каноническим отношениям и информации по изотопии Nd показано, что для структур, представляющих Уральский Подвижный пояс, и его ближайшего обрамления, характерны разновозрастные гранитоиды, имеющие гетерогенный тип источника. На ранних этапах (рифей–кембрий) – источники мантийные OIB + MORB с некоторой добавкой сиалического вещества, на островодужном (граниты Магнитогорской мегазоны) и раннеорогенном (карбоновые Верхисетский и Нижнеуфалейский массивы “надсубдукционного” типа) этапах – мантийно-коровый IAB при небольшом влиянии MORB и OIB. Для коллизионных гранитов (Мурзинский массив) характерно влияние источника IAB-типа, небольшое – OIB-типа, при изотопной неоднородности, связанной с разной степенью

частичного плавления и объема вводимого в магмообразование вещества коры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной обобщающей статье на основе результатов, полученных за последние 10 лет по изучению гранитоидов Урала, мы постарались показать, что соотношения ряда индикаторных элементов могут быть использованы для оценки состава магматических источников, степени их гетерогенности и геодинамических режимов формирования магматитов.

Например, для плюм-зависимых континентально-рифтогенных образований характерна величина отношения  $Y/Nb$  1 и менее, при сильных вариациях в уровнях содержаний ( $Nb = 5-150$ ,  $Y = 5-75$  г/т), для островодужных гранитоидов  $Y/Nb > 10$ , субдукционно-связанных – 2–5 (до 10). При этом в гранитоидах последовонского (собственно уральский этап развития) возраста уровни содержания обоих этих элементов существенно ниже ( $Nb = 2-40$ ,  $Y = 0.2-20.0$  г/т), а колебания величин отношения  $Y/Nb$  – менее стабильны и определяются в основном разной степенью вовлечения сиалического вещества в магмогенерацию. Эмпирически выделенные поля для магматитов разных обстановок и возрастов приведены нами в работах [Ферштатер и др., 2019; Холоднов и др., 2021a].

Анализ величин индикаторных отношений ( $Nb/U$ ,  $Th/Ta$ ,  $La/Yb$ ,  $Zr/Nb$ ) и их соотношений с  $Nb$  как одним из ключевых геохимических индикаторов лишней раз подтвердил, что гранитоиды из разных структурных зон современного Уральского Подвижного пояса большей частью имеют гетерогенный, смешанный тип магматического источника: соотношения OIB, E- и N-MORB, IAB меняются во времени. При этом сопоставление средних величин отношения  $Nb/U$  (для примера, одно из ключевых соотношений) со средними значениями  $\epsilon Nd$  (см. рис. 6б) указывает на повышение роли вклада мантийно-корового источника типа IAB в раннеорогенных и собственно коллизионных гранитоидах, возрастание роли корового компонента в субстрате для выплавления гранитоидов.

Представленные в данной работе материалы демонстрируют возможные подходы для использования геохимических данных при оценке типов магматических источников, степени мантийно-корового взаимодействия и геотектонических режимов проявления магматизма. Достоверность таких реконструкций существенно возрастает при использовании всего комплекса данных по геохронологии, изотопии и геохимии.

*Работа выполнена в рамках темы № 123011800009-9 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Коваленко Д.В., Козловский А.М., Андреева И.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Вариации изотопного состава неодайма и канонических отношений содержаний несовместимых элементов как отражение смешения источников щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Бурегтейского массива и одноименного редкометалльного месторождения, Западная Монголия // Петрология. 2009а. Т. 17. № 3. С. 249–275.
- Коваленко В.И., Козловский А.М., Ярмолюк В.В. Отношения элементов-примесей как отражение смесимости источников и дифференциации магм щелочных гранитоидов и базитов Халдзан-Бурегтейского массива и одноименного редкометалльного месторождения, Западная Монголия // Петрология. 2009б. Т. 17. № 2. С. 175–196.
- Коровко А.В., Бородин Н.С., Солошенко Н.Г., Стрелецкая М.В., Вишнякова М.Д. О возрасте Крив-Вагранского сиенитового массива (Салатимская зона смятия, Северный Урал) // Чтения памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 20. Пермь: ПГУ, 2017. С. 120–126.
- Коровко А.В., Шардакова Г.Ю., Хубанов В.Б. Венд-раннекембрийские граниты крутореченского комплекса (Присалатимская зона, Северный Урал): возраст протолита, геодинамические условия образования и преобразования // Геодинамика и Тектонофизика. 2019. Т. 10. № 4. С. 863–878.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Родионов Н.В., Нехорошева А.Г., Кисеева К.Н. Ахмеровский гранитный массив – представитель мезопротерозойского интрузивного магматизма на Южном Урале // Докл. АН. 2008. Т. 418. № 2. С. 241–246.
- Нечухин В.М., Краснобаев А.А., Соколов В.Б. Геохронология и структурное положение нижнего докембрия в Уральском аккреционно-складчатом обрамлении Русской плиты // Общие вопросы расчленения докембрия. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. С. 201–203.
- Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. Цирконовый возраст габбро и гранитоидов кусинско-копанского комплекса (Южный Урал) // Тр. ИГГ УрО РАН. 2006. Вып. 153. С. 300–303.
- Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Тристан Н.И., Гердес А., Маслов А.В. Новые данные о составе и возрасте гранитов Ишеримского антиклинария и положение границы тиманид на Северном Урале // Докл. АН. 2014. Т. 459. № 6. С. 721–725.
- Прибавкин С.В., Готтман И.А., Коровко А.В. Петрология Ялуниногорского гранитоидного массива (Алапаевско-Сухоложская медно-порфировая зона, Средний Урал) // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 46–60.
- Путеводитель Среднеуральской полевой экскурсии (26–27 августа 2017 г.) // Граниты и эволюция Земли: мантия и кора в гранитообразовании / Мат-лы III Междунар. геол. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. Ч. 1. С. 5–27.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Пучков В.Н. Плюм-зависимый гранит-риолитовый магматизм // Литосфера. 2018. № 5. С. 692–705.

- Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Попова О.Ю. Основные геохимические характеристики гранитов-рапакиви и ассоциирующих пород Бердяшского плутона (тектономагматическая позиция и типология) // Тр. ИГГ УрО РАН. 2005. Вып. 152. С. 211–219.
- Ронкин Ю.Л., Тихомирова М.Т., Маслов А.В. ~1380 млн лет ЛП Южного Урала: прецизионные Rb-TIMS-ограничения // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 6. С. 674–679.
- Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р. Магнитогорская зона Южного Урала в позднем палеозое: магматизм, флюидный режим, металлогения, геодинамика. М.: Наука, 2019. 392 с.
- Самыгин С.Г., Белова А.А., Рязанцев А.В., Федотова А.А. Фрагменты вендской конвергентной окраины на Южном Урале // Докл. АН, 2010. Т. 432. № 5. С. 644–649.
- Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 368 с.
- Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С. Мурзинский массив на Среднем Урале как пример межформационного гранитного плутона: магматические источники, геохимическая зональность, особенности формирования // Литосфера. 2018. № 5. С. 672–691.
- Ферштатер Г.Б., Бородин Н.С., Беа Ф., Монтеро П. Модель мантийно-корового взаимодействия и сопряженного магматизма в надсубдукционном орогене (палеозой Урала) // Литосфера. 2018. № 2. С. 177–207.
- Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Монтеро П., Беа Ф., Бородин Н.С., Вишнякова М.Д., Солошенко Н.Г., Стрелецкая М.В. Возраст и изотопно-геохимические особенности мурзинско-адуйского метаморфического комплекса в связи с проблемой формирования Мурзинского межформационного гранитного плутона // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 3. С. 342–365.
- Холоднов В.В., Ферштатер Г.Б., Шардакова Г.Ю., Шагалов Е.С. Рифейский магматизм и рудообразование, предшествующие раскрытию Уральского палеоокеана (западный склон Южного Урала) // Литосфера. 2017. № 2. С. 5–26.
- Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Каллистов Г.А., Шардакова Г.Ю., Салихов Д.Н., Коновалова Е.В. Ахуново-Петропавловский гранитоидный ареал как окраинно-континентальный центр длительного мантийно-корового взаимодействия: роль субдукционных и рифтогенно-плюмовых магматических и флюидных источников // Геология и геофизика. 2021б. Т. 62. № 6. С. 648–665.
- Холоднов В.В., Шардакова Г.Ю., Пучков В.Н., Петров Г.А., Шагалов Е.С., Салихов Д.Н., Коровко А.В., Прибавкин С.В., Рахимов И.Р., Бородин Н.С. Палеозойский гранитоидный магматизм Северного, Среднего и Южного Урала как отражение этапов геодинамической и геохимической эволюции коллизионного орогена // Геодинамика и тектонофизика. 2021а. Т. 12. № 2. С. 225–245.
- Холоднов В.В., Шардакова Г.Ю., Душин В.А., Коровко А.В., Шагалов Е.С. Рифей-венд-кембрийский магматизм Маньхамбовского блока (Приполярный Урал): геохимическая типизация, корректировка геодинамических представлений, роль плюм-литосферного взаимодействия // Петрология. 2022. Т. 30. № 4. С. 404–431.
- Шардакова Г.Ю. Гранитоиды Уфалейского блока: геодинамические обстановки, возраст, источники, проблемы // Литосфера. 2016а. № 4. С. 133–137.
- Шардакова Г.Ю. Геохимические особенности и изотопный возраст гранитоидов Башкирского мегантиклинория – свидетельства импульсов эндогенной активности в зоне сочленения Уральского орогена с Восточно-Европейской платформой // Геохимия. 2016б. № 7. С. 607–622.
- Шардакова Г.Ю. Новые данные по геохимии и изотопии цирконов из раннекембрийских гранитов Уфалейского блока (Средний Урал): шаг к корректировке геодинамических представлений // Литосфера. 2022. Т. 22. № 1. С. 55–74.
- Шардакова Г.Ю., Коровко А.В. Венд-кембрийские гранитоиды Салатимской сутурной зоны (Северный Урал): геохимия цирконов, состав субстрата, геохронологические и геодинамические следствия // Литосфера. 2021. № 1. С. 32–54.
- Шардакова Г.Ю., Червяковская М.В. Венд-кембрийские гранитоиды Уфалейского блока (Средний Урал): новые изотопные данные, состав субстрата, потенциальная рудоносность // Изв. УГГУ. 2020. № 2(58). С. 48–63.
- Шардакова Г.Ю., Червяковская М.В., Червяковский В.С., Крупенин М.Т., Хубанов В.Б. Новые данные о возрасте, составе и Lu-Hf изотопии цирконов из гранитоидов и базитов северной части Башкирского мегантиклинория (Южный Урал): состав субстрата, геодинамические заключения // Тр. ИГГ УрО РАН. 2020. Вып. 167. С. 103–110.
- Шардакова Г.Ю., Прибавкин С.В., Краснобаев А.А., Бородин Н.С., Червяковская М.В. Цирконы из пород мурзинско-адуйского метаморфического комплекса (Средний Урал): геохимия, термометрия, генетические следствия // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. 335–349.
- Шардакова Г.Ю., Волчек Е.Н., Червяковский В.С., Червяковская М.В., Холоднов В.В. Гранитный массив Водораздельный (Приполярный Урал) и проблемы корреляции доордовикских гранитоидов и вулканитов северной части Ляпинского антиклинория // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2023. Т. 31. № 3. С. 3–31.
- Kelemen P.V., Hanghøj K., Greene A.R. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Magmatism in the ocean basins // Treatise on Geochemistry. 2007. P. 749–806.
- Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Magmatism in the ocean basins // Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
- Udoratina O.V., Kulikova K.V., Shuyskiy A.S., Soboleva A.A., Andreichev V.L., Golubeva I.I., Kapitanova V.A. Granitoid magmatism in the north of the Urals: U-Pb age, evolution, sources // Geodynam. Tectonophys. 2021. V. 12. No. 2. P. 287–309.
- Workman R.K., Hart S.R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (MORBm) // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. V. 231. P. 53–72.

## APPLICATION OF A NUMBER OF GEOCHEMICAL FEATURES OF GRANITOIDS FROM DIFFERENT STRUCTURAL ZONES OF THE URALS AS ADDITIONAL INDICATORS OF THE MAGMATIC SOURCES TYPE

G. Yu. Shardakova, V. V. Kholodnov, A. V. Korovko, S. V. Pribavkin,  
E. S. Shagalov, N. A. Antonishin

In this paper we summarize some (last 10 years) research results of the the Laboratory of Petrology (IGG UB RAS) focused on granitoids from different parts of the Uralian Mobile Belt. This investigation is demonstrated how the behavior of some indicator elements (Nb, Zr, Th, Ta, La, Y, Yb) and their relations can be used to assess the magmatic source composition, the degree of their heterogeneity and geodynamic regimes during magma generation. Granitoids with  $\text{SiO}_2 > 63$  wt % were selected. These rocks have a wide age range (1390–250 Ma), different geodynamic settings (multi-stages continental rifting, subduction, (accretion), collision, post-collision transform processes). Results of Nd-isotopy are also involved. It is shown that granitoids from different structural zones of the Uralian Mobile Belt mostly have a heterogeneous, mixed type of magmatic sources: the contributions of OIB, E- and N-MORB, IAB vary over time. The comparison of the average key values of Nb/U-ratios (for example) with average values of  $\epsilon\text{Nd}$  indicates an increased role of the contribution of a mantle-crustal source of type IAB and a “plume factor” (OIB) to the genesis of orogenic and collisional granites and in general – to increased the crustal component role in the melt source. Obviously, the reliability of paleogeodynamic reconstructions increases when using the entire set of data on geochronology, isotopy and geochemistry.

**Keywords:** *Uralian Mobile belt, granitoids, geochemistry, isotopy, paleogeodynamics, source type*

**Для цитирования:** Шардакова Г.Ю., Холоднов В.В., Коровко А.В., Прибавкин С.В., Шагалов Е.С., Антонин Н.А. Применение ряда геохимических особенностей гранитоидов из разных структурных зон Урала в качестве дополнительных индикаторов типа магматических источников // Труды ИГГ УрО РАН. 2024. Вып. 168. С. 62–74. <https://doi.org/10.24930/0371-7291-2024-168-62-74>