



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-2-8>
УДК 549+550.4:543.064

О влиянии погрешностей геохимических анализов на генетические геодинамические и геологические выводы

К.С. Иванов

Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского 15,
г. Екатеринбург, 620010 Россия, ivanovks55@ya.ru

Статья поступила в редакцию 04.12.2025 г., после доработки 20.01.2026 г., принята к печати 07.02.2026 г

Аннотация. Влияние точности геохимических анализов на генетические выводы обычно сильно недооценивается исследователями. Как правило, состав породы или минерала на диаграммах изображается в виде точки, фактически не имеющей размера, однако любой анализ должен выражаться на графиках и диаграммах не точкой, а полем, причем тем большим, чем больше погрешность анализа. Показано, что при погрешностях анализов ~30 % и более все генетические геохимические диаграммы, построения и выводы теряют какой-либо смысл, поскольку при таких погрешностях площадь «фигуративной точки» (точнее поля) единичного анализа может перекрыть одновременно 2–3 разных «геодинамических поля точек». Приводятся ИСП-МС анализы разных пород с высокими погрешностями. Примером ошибочных геодинамических построений, базирующихся только на геохимических данных, является отнесение триасовых вулканитов Западной Сибири к островодужным формациям. Предлагаются меры по увеличению точности геохимических анализов.

Ключевые слова: ИСП-МС анализы, погрешность, точность, треугольные диаграммы, геодинамические обстановки, рифты Западной Сибири.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института геологии и геохимии УрО РАН, тема № 123011800014-3.

Благодарности. Автор благодарен своим коллегам, кандидатам геол.-мин. наук В.Н. Смирнову и Н.В. Вахрушевой за предоставленные анализы, Т.Н. Сурину, научным редакторам журнала Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцевой, а также анонимному рецензенту за полезные замечания.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Для цитирования: Иванов К.С. О влиянии погрешностей геохимических анализов на генетические геодинамические и геологические выводы. *Минералогия*, 2026, 12(2), 118–129. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-2-8>.

Influence of errors of geochemical analyses on genetic geodynamic and geological conclusions

K.S. Ivanov

Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15,
Yekaterinburg, 620010 Russia; ivanovks55@ya.ru

Received 04.12.2025, revised 20.01.2026, accepted 07.02.2026

Abstract. The influence of analytical errors of geochemical analyses on genetic conclusions is typically underestimated by researchers. The composition of rocks or minerals, as a rule, is shown on diagrams as a point, actually with no size, however, all analyses should be presented on diagrams as fields rather than points. The larger the analytical error, the larger the field. It is shown that all genetic geochemical diagrams, interpretations, and conclusions are senseless with analytical errors of ~30 % and more, because the area of the “point” (more precisely, the field) of a single analysis in this case can cover 2–3 different geodynamic fields. Specific examples of results of ICP-MS analyses of different rocks with high analytical errors are shown. An example of erroneous geodynamic interpretations, which are based on geochemical data only, includes the island-arc classification of Triassic volcanic rocks of Western Siberia. Initiatives for the increasing the accuracy of geochemical analyses are proposed.

Keywords: ICP-MS analyses, analytical error, ternary diagrams, geodynamic settings, Western Siberia rifts.

Funding. This work was supported by state contract of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS no. 123011800014-3.

Acknowledgements. The author thanks to colleagues, Cand. Geol.-Mineral. Sci. V.N. Smirnov and N.V. Vakhrusheva for analyses, T.N. Surin, scientific editors of the journal E.V. Belogub and I.Yu. Melekestseva, and an anonymous reviewer for their helpful comments.

Conflict of interest. The author declares that he has no conflicts of interest.

For citation: . Ivanov K.S. Influence of errors of geochemical analyses on genetic geodynamic and geological conclusions. *Mineralogy*, 2026, 12(2), 118–129. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-2-8>.

Посвящается памяти
Надежды Владимировны Вахрушевой

ВВЕДЕНИЕ

«Генетические» геолого-геохимические диаграммы в настоящее время чрезвычайно широко распространены в научной литературе – без них не обходится практически ни одна статья, посвященная магматизму, вулканизму и многим другим темам в геологии, петрологии и геодинамике. Такие диаграммы часто используются и в отчетах по составлению государственных геологических карт России. Влияние точности геохимических анализов на генетические выводы геологами, как правило, недооценивается, а, чаще всего, не оценивается совсем)¹, однако оно весьма велико. Нагляднее всего рассмотреть эту проблему можно на примере использования тройных диаграмм в геохимии, которые представляют собой треугольные изображения состава горных пород, минералов или других веществ в виде смеси трех компонентов (рис. 1). Помимо геологии и геохимии, тройные диаграммы широко используются в металлургии, химии и некоторых других науках.

Ранее при разработке и использовании таких диаграмм геологи-геохимики старались добиваться, чтобы сумма трех компонентов составляла не менее 70–80 % общей массы исследуемого объекта, иногда условно (и бездоказательно) считая при этом, что влиянием остальных компонентов состава можно в первом приближении пренебречь. С развитием геохимии редких, редкоземельных и рассеянных элементов (Балашов, 1976; Тейлор, МакЛеннан, 1988), особенно после внедрения масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), ситуация сильно изменилась. Сейчас уже широко распространены треугольные геохи-

мические диаграммы, базирующиеся на использовании только малых и редких элементов, составляющих чаще всего <1 % массы породы, но зачастую реперных для тех или иных геодинамических обстановок или иных условий образования, распространения и пр.

В геологии тройные диаграммы широко используются для отображения состава горных пород или минералов в зависимости от содержания минералов или пропорций химических элементов. На таких диаграммах основан ряд генетических геохимических классификаций. В современных научных статьях с помощью тройных геохимических диаграмм (основанных чаще всего на ИСП-МС анализах, полученных на квадрупольных масс-спектрометрах высокого разрешения с двойной фокусировкой) определяются, например, геодинамические обстановки формирования магматических горных пород, из чего следуют выводы об их генезисе, истории геологического развития региона, его металлогенической специализации и т. д.

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ АНАЛИЗОВ НА ПОЛОЖЕНИЕ ФИГУРАТИВНЫХ ТОЧЕК НА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

Как видно из рис. 1а, состав вещества на любой тройной диаграмме изображается в виде точки. Три компонента, отображенными на диаграмме, могут быть, например, Nb–La–Yb или другие сочетания химических элементов (рис. 1б), соответственно, черная точка на рис. 1б будет отражать состав породы, содержащей 10 г/т La (компонент В), 15 г/т Yb (компонент С) и 25 г/т Nb (компонент А). Суммарное содержание этих трех компонентов составит в данном примере 50 г/т, т. е. 0.005 мас. %. Таким образом на диаграмму выносятся каждый анализ с любым содержанием трех элементов. Впоследствии эти точки соотносятся с какой-либо дискриминационной треугольной диаграммой, построенной на базе сотен или даже тысяч высокока-

¹ Отдельные работы в этом направлении имеются, например, (Rollinson, 1993; Чашухин, 2009)

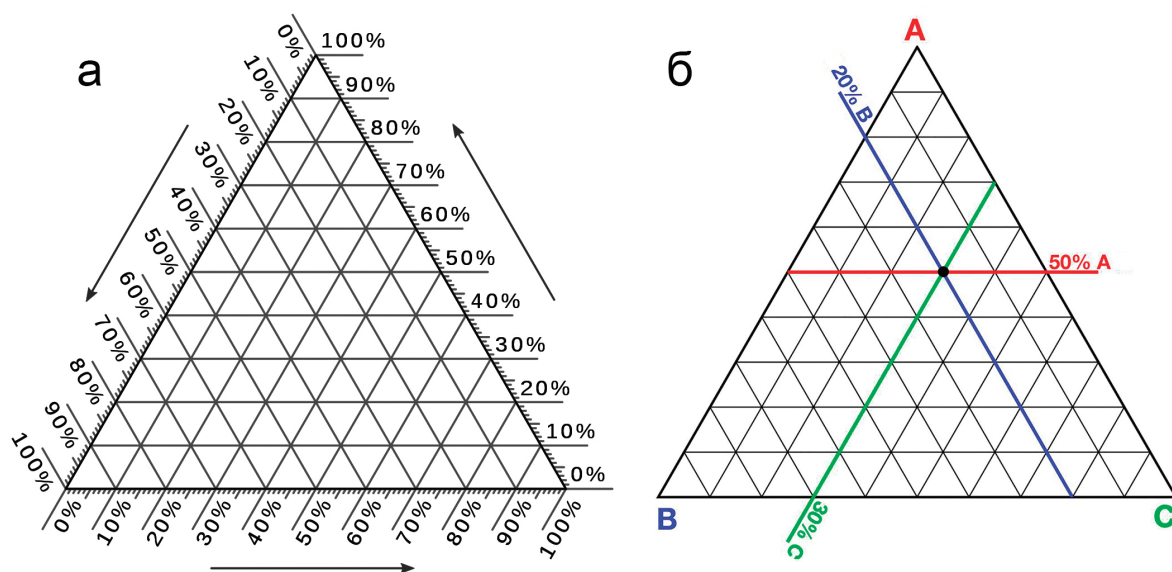


Рис. 1. Классический вид тройной диаграммы (а) и пример диаграммы для вещества, содержащего 50 % компонента А, 20 % компонента В и 30 % компонента С (б).

Fig. 1. Classic view of ternary diagram (a) and example of the diagram for a substance containing 50 % component A, 20 % component B and 30 % component C (б).

чественных анализов, полученных для, например, базальтов из заведомо известных геодинамических обстановок (Pearce et al., 1984; Mullen, 1983; Скляр и др., 2001; Гребенникова, Ханчук, 2021). По этим результатам на диаграммах оконтуриваются поля, куда попадают составы океанических базальтов, базальтов островных дуг, рифтов, внутренних зон континентов и т. д. (рис. 2).

Допустим, что от шести до десяти фигуративных точек из десяти анализов попали на диаграмме в область «базальтов островных дуг». Из этого, как правило, делается вывод, что и изучаемые породы также имеют островодужный генезис. Суть проблемы заключается в том, что любой анализ должен выражаться на графике или диаграмме не точкой (без площади), а областью, учитывающей погрешность анализа. Любая геолого-геохимическая диаграмма должна в идеале отражать также и точность анализов, что сейчас делается практически только в геохронологии. Таким образом, фактически порода содержит не 15 г/т Yb (как взято в вышеприведенном примере), а от 12 до 18 г/т при погрешности измерения, например, 20 %. В таком случае анализ должен изображаться на диаграмме не точкой, а фигурой, размер которой должен соответствовать погрешности анализа, как показано на примере тройной диаграммы вещества,

содержащего 20 % (± 8 %) компонента В, 30 % (± 7 %) компонента С и 50 % (± 5 %) компонента А (рис. 3), где заштрихованный шестиугольник отображает область, отвечающую таким содержаниям и погрешностям. Как видно из рисунка, это уже не точка, а многоугольник, учитывая, что аналитические погрешности в конкретном примере малы.

При увеличении погрешностей определения химических элементов площадь «точки анализа» (точнее, его поля неопределенности), показанная заштрихованным многоугольником, будет больше. Построение серии таких диаграмм показало, что критическая величина погрешности определения химических элементов составляет примерно 30 %: на рис. 4 показаны случаи с «точкой» анализа в центре и краевой части диаграммы. При дальнейшем увеличении погрешностей анализов, поле любого единичного анализа становится столь велико, что может перекрывать сразу 2–3 принципиально разных геодинамических поля: достаточно сопоставить площадь заштрихованных многоугольников на рисунке 5 с площадями разных «геодинамических полей» на рисунке 2.

Погрешность измерения содержаний редких и рассеянных элементов в реальных пробах составляет, к сожалению, нередко более 30 % (Rollinson, 1993; Begley, Sharp, 1997; Сермягин, Пупышев,

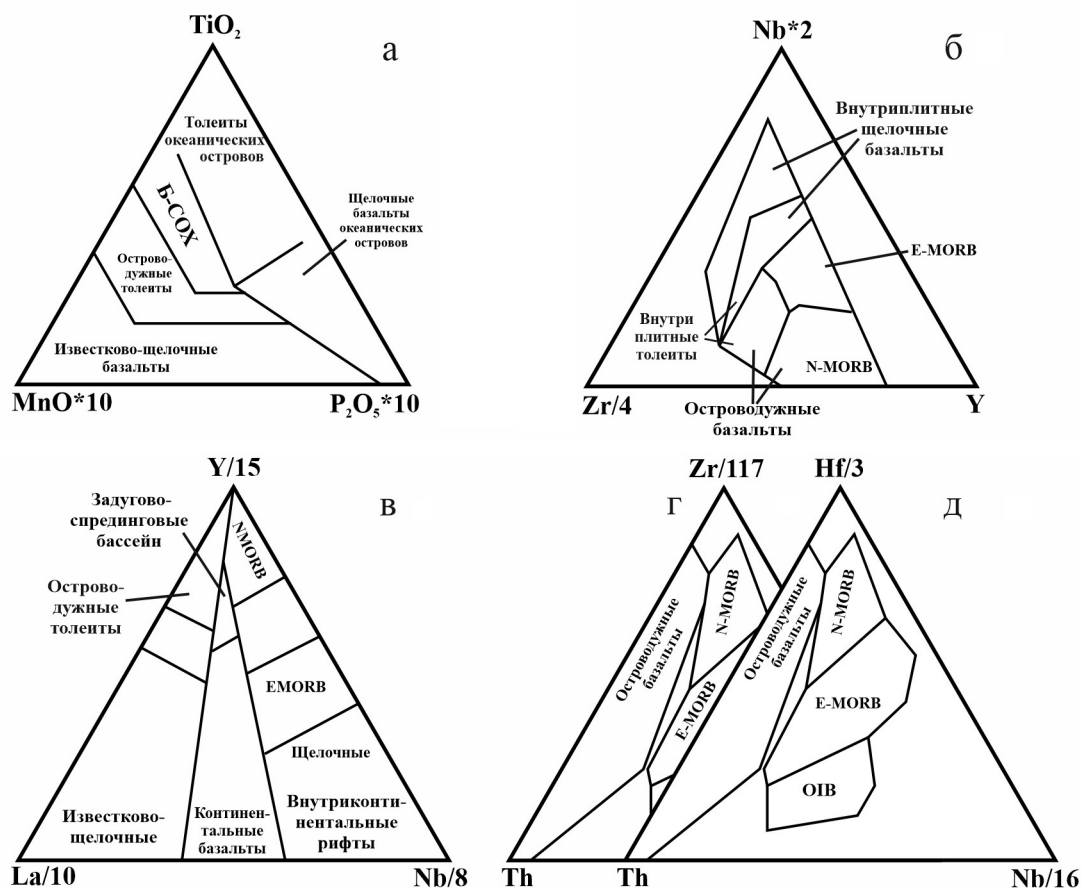


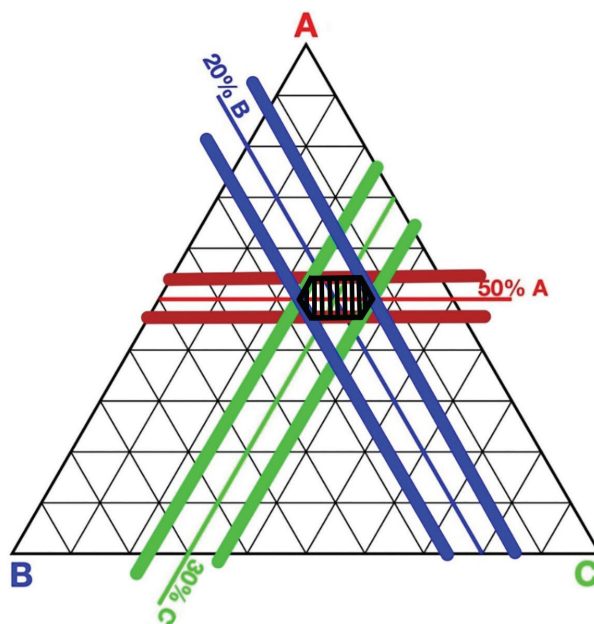
Рис. 2. Примеры дискриминационных геохимических диаграмм для базальтов: а) $10\text{MnO}-\text{TiO}_2-10\text{P}_2\text{O}_5$ (Mullen, 1983); б) $\text{Zr}/4-2\text{Nb}-\text{Y}$ (Meschede, 1986); в) $\text{La}/10-\text{Y}/15-\text{Nb}/8$ (Cabanis, Lecolle, 1989); г) $\text{Th}-\text{Zr}/117-\text{Nb}/16$ (Sun, McDonough, 1989); д) $\text{Th}-\text{Hf}/3-\text{Nb}/16$ (Sun, McDonough, 1989).

Fig. 2. Examples of ternary diagrams for basalts: а) $10\text{MnO}-\text{TiO}_2-10\text{P}_2\text{O}_5$ (Mullen, 1983); б) $\text{Zr}/4-2\text{Nb}-\text{Y}$ (Meschede, 1986); в) $\text{La}/10-\text{Y}/15-\text{Nb}/8$ (Cabanis, Lecolle, 1989); г) $\text{Th}-\text{Zr}/117-\text{Nb}/16$ (Sun, McDonough, 1989); д) $\text{Th}-\text{Hf}/3-\text{Nb}/16$ (Sun, McDonough, 1989).

2008; Пупышев, 2025). Причины погрешности могут быть разными, но как показывает практика, одна из главнейших причин – человеческий фактор. Важной составляющей погрешности измерения методом ИСП-МС является суммарный дрейф прибора (интенсивности, смещения максимумов массовых пиков и дискриминации ионов по массе) (Сермягин, Пупышев, 2008). Частой причиной ошибок является неполное разложение проб.

Рис. 3. Тройная диаграмма для вещества, содержащего 20% ($\pm 8\%$) компонента В, 30% ($\pm 7\%$) компонента С и 50% ($\pm 5\%$) компонента А.

Fig. 3. Ternary diagram for a substance containing 20% ($\pm 8\%$) component B, 30% ($\pm 7\%$) component C and 50% ($\pm 5\%$) component A.



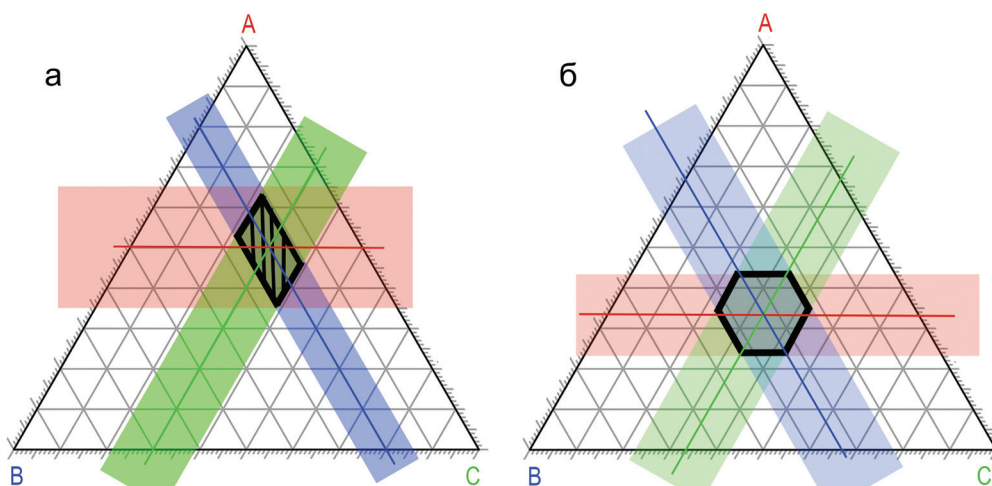


Рис. 4. Тройные диаграммы для вещества при погрешности определения содержаний элементов 30 %: а – $A = B = C = 33.3\%$ (погрешность 30 % на диаграмме составит 10 %); б – 20 % ($\pm 6\%$) компонента В, 30 % ($\pm 9\%$) компонента С и 50 % ($\pm 15\%$) компонента А (что также отвечает аналитической погрешности 30 %). Черные многоугольники соответствуют полю значений с погрешностями 30 %.

Fig. 4. Ternary diagram for a substance with analytical error of 30 %: а – $A = B = C = 33.3\%$ (analytical error of 30 % will be 10 % on the diagram); б – 20 % ($\pm 6\%$) component В, 30 % ($\pm 9\%$) component С and 50 % ($\pm 15\%$) component А (which also corresponds to analytical error of 30 %). Black polygons correspond to the field of values with analytical errors of 30 %.

Представление о погрешностях определения содержаний химических элементов дает простой эксперимент. Если взять одну и ту же представительную геологическую пробу, тщательно ее истереть и отквартовать, после чего отдать ее в разные лаборатории или даже в одну и ту же лабораторию несколько раз, то, как правило, будут получены разные значения содержаний химических элементов. Иногда, к сожалению, они могут отличаться не на 5–30 %, а значительно больше (до 10 раз и более). Такая работа была проделана в лаборатории региональной геологии и геотектоники Института геологии и геохимии УрО РАН (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия) и часть данных представлена в таблицах 1 и 2.

Очевидно, что аналогичный опыт имеется и у многих других геологов². Если подобные результаты анализов вынести на корректную и информативную геохимическую диаграмму, то зачастую в итоге получается «мнимая реальность», т. е. артефакты. В качестве примера рисунок 5 показы-

вает состав вещества, содержащего 20 % ($\pm 10\%$) компонента В, 30 % ($\pm 15\%$) компонента С и 50 % ($\pm 20\%$) компонента А. Площадь точки конкретного анализа будет сопоставима с площадью того или иного геодинамического поля, и площадь одной точки (поля неопределенности, показанного на рис. 3–5 заштрихованными многоугольниками) одного анализа может одновременно перекрывать 2–3 разных геодинамических поля. Очевидно, на практике такое происходит часто и далеко не все анализы даже единого магматического комплекса попадают в пределы одного геодинамического поля.

Важно отметить, что истинное положение точки реального состава породы равновероятно в любом месте заштрихованного шестиугольника. Нельзя сказать, что его центр (в данном примере с 20, 30 и 50% содержаний компонентов – см. выше) является более вероятным, чем любой из периферических участков шестиугольника (этот вопрос хорошо изучен в геохронологии). При дальнейшем увеличении погрешности анализов все геохимические генетические диаграммы, построения и выводы теряют смысл. Это справедливо не только для тройных, но и для многих других типов дискриминационных диаграмм.

Все вышесказанное в полной мере относится и к так называемым геохимическим отношениям или геохимическим меткам, на соотношениях которых зачастую делаются геодинамические выводы.

² Прим. ред. Процедура постоянного контроля правильности получаемых анализов и расчета погрешностей предусмотрена в «Руководстве по качеству», обязательном для исполнения в аккредитованных химических лабораториях, при этом используются стандартные образцы, рекомендованные уполномоченными органами по аккредитации в Российской Федерации: Федеральной службой по аккредитации (Росаккредитация) и Ассоциацией аккредитованных центров «Аналитика».

Таблица 1. Содержание элементов-примесей в ультраосновных породах и хромитовой руде (г/т) по данным ИСП-МС, полученным в разных лабораториях

Table 1. Trace element content of ultramafic rocks and chromite ore (ppm) according to ICP-MS data from different laboratories

Номер условной лаборатории	№ пробы	№ лаб.	Li	Rb	Cs	Be	Sr	Ba	Co	Y	La	Ce	Pr
1	У-3164/1	18	1.4	3.3	0.02	0.04	71	49	150	1.40	0.898	2.090	0.166
2	У-3164/1	17-159	0.4	0.7	0.02	0.00	16	8	171	1.13	0.391	0.992	0.134
3	Р 4025/10	Р 4025/10	1.4	1.2	0.02	0.023	1.79	18.53	116.4	0.954	0.337	0.770	0.098
2	Р-4025-10	13-1954	0.9	н/о	0.005	н/о	1.15	0.70	95.8	0.041	0.007	0.024	0.001
3	Р 4025/17	Р 4025/17	0.9	0.4	0.02	0.01	2.58	7.21	115.1	0.412	0.163	0.377	0.045
2	Р-4025-17	13-1958	0.6	н/о	0.00	0.03	1.52	0.74	83.9	0.04	0.004	0.014	0.001
4 ¹	3826	Х-1517-4	1.5	1.1	0.04	0.05	1.14	5.59	167.2	0.18	0.048	0.111	0.014
4 ²	3826	Х-1517-4	–	0.3	0.04		1.05	1.83	69.6	0.15	0.031	0.070	0.009
Номер условной лаборатории	№ пробы	№ лаб.	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	У-3164/1	18	1.334	0.240	0.082	0.276	0.064	0.273	0.053	0.145	0.011	0.154	0.025
2	У-3164/1	17-159	0.633	0.177	0.062	0.207	0.028	0.189	0.038	0.111	0.016	0.098	0.015
3	Р 4025/10	Р 4025/10	0.420	0.110	0.024	0.114	0.027	0.157	0.037	0.107	0.017	0.121	0.022
2	Р-4025-10	13-1954	0.009	0.003	н/о	0.005	н/о	0.006	н/о	0.006	н/о	0.014	0.003
3	Р 4025/17	Р 4025/17	0.188	0.053	0.012	0.044	0.013	0.072	0.016	0.052	0.0079	0.055	0.010
2	Р-4025-17	13-1958	0.004	0.003	н/о	0.004	н/о	0.006	н/о	0.005	н/о	0.013	0.001
4 ¹	3826	Х-1517-4	0.059	0.020	0.012	0.024	0.004	0.025	0.006	0.022	0.004	0.029	0.005
4 ²	3826	Х-1517-4	0.039	0.011	0.004	0.012	0.002	0.018	0.005	0.015	0.003	0.021	0.004

Примечание. Породы: У-3164/1 – клинопироксенсодержащий дунит; Р 4025/10, Р 4025/17 – дуниты с акцессорной вкрапленностью хромшпинелида; 3826 – бедно-среднеокрапленная хромитовая руда (годы измерений: ¹ – 2007, ² – 2005). Пробы Н.В. Вахрушевой. Здесь и в табл. 2, красным выделены результаты с максимальной погрешностью, где содержания элементов в одной и той же пробе отличаются в два раза и более.

Note. Rocks: У-3164/1 – clinopyroxene-bearing dunite; Р 4025/10 and Р 4025/17 – dunite with accessory chromite; 3826 – weakly and medium-disseminated chromite ore (years of analyses: ¹ – 2007, ² – 2005). Samples of N.V. Vakhrusheva. Here and in Table 2, the results with maximum analytical errors, locally, exceeding two times and more are highlighted in red.

Рис. 5. Тройная диаграмма для вещества, содержащего 20 % ($\pm 10\%$) компонента В, 30 % ($\pm 15\%$) компонента С и 50 % ($\pm 20\%$) компонента А. Заштрихованный шестиугольник соответствует полю значений с указанными погрешностями.

Fig. 5. Ternary diagram for a substance containing 20 % ($\pm 10\%$) component B, 30 % ($\pm 15\%$) component C and 50 % ($\pm 20\%$) component A. The hatched hexagon corresponds to the field of values with indicated analytical errors.

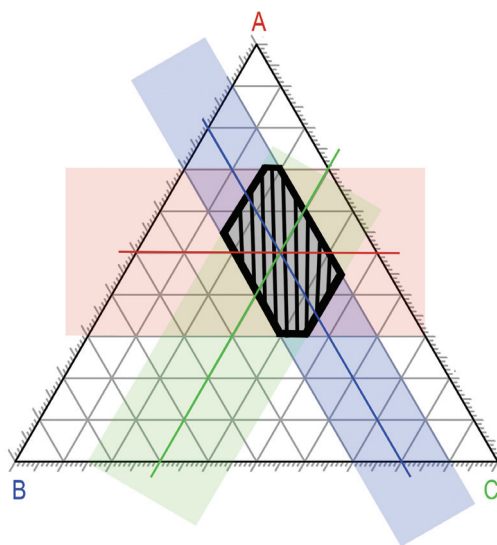


Таблица 2. Содержание элементов-примесей (г/т) в некоторых магматических породах по данным повторных «слепых» ИСП-МС анализов, полученных в одной лаборатории

Table 2. Trace element content of some igneous rocks (ppm) according to repeated "blind" ICP-MS data from one laboratory

№ пробы	№ лаб.	Li	Rb	Cs	Be	Sr	Ba	Co	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Sm-1-2 ¹	19-1537	27	0.8	0.6	0.11	140	30	27	16	1.4	4.7	0.9	5	2	0.8	2.9	0.5	3.1	0.6	1.9	0.26	1.7	0.25
Sm-1-2 ²	21-372	24	1.4	0.7	0.1	300	40	31	25	1.6	5	0.8	4.6	1.6	0.6	2.3	0.4	2.3	0.5	1.4	0.19	1.2	0.18
Sm-2-2 ¹	19-1539	30	2.7	0.34	0.31	300	90	39	16	3.3	9	1.5	8	2.3	0.9	3.1	0.5	3	0.6	1.8	0.26	1.6	0.25
Sm-2-2 ²	21-373	25	4	0.41	0.25	600	100	230	24	4	10	1.4	6	1.8	0.7	2.4	0.4	2.3	0.5	1.4	0.19	1.2	0.18
Хом-1 ³	19-1542	4.0	2.4	37.0	0.37	400	40.0	32.0	11.0	2.0	0.36	0.9	4.4	1.3	0.60	1.7	0.27	1.8	0.37	1.1	0.15	0.9	0.14
Хом-1 ²	21-377	1.5	2.4	40.0	0.19	600	40.0	34.0	16.0	2.3	0.81	0.8	3.9	1.1	0.45	1.5	0.22	1.5	0.29	0.9	0.12	0.8	0.11
Хом-6 ³	19-15-46	1.7	0.4	60.0	0.050	60	10.0	37.0	6.0	0.21	0.23	0.19	1.3	0.70	0.26	1.10	0.19	1.3	0.28	0.8	0.12	0.8	0.12
Хом-6 ²	21-378	1.8	0.7	70.0	0.039	180	14.0	41.0	10.0	0.24	0.67	0.18	1.1	0.50	0.19	0.85	0.14	0.9	0.20	0.6	0.09	0.6	0.09
Хом-9 ³	19-1548	1.5	11.0	1.8	1.30	17	170	1.10	2.2	1.3	0.37	0.44	1.8	0.45	0.08	0.49	0.09	0.7	0.15	0.5	0.08	0.6	0.09
Хом-9 ²	21-379	1.3	29.0	4.1	1.20	180	370	1.00	24.0	17.0	0.73	3.60	13.0	2.50	0.45	2.80	0.40	2.5	0.50	1.5	0.23	1.5	0.23

Примечание. Породы: Sm-1 и Sm-2 – долерит; Хом-1 – габронорит; Хом-6 – габбро; Хом-9 – гранит. Годы измерений: ¹ – 2019, ² – 2021, ³ – 2020. Пробы В.Н. Смирнова.

Note. Rocks: Sm-1 and Sm-2 – dolerite; Хом-1 – gabbro; Хом-6 – gabbro; Хом-9 – granite. Years of measurements: ¹ – 2019, ² – 2021, ³ – 2020. Samples of V.N. Smirnov.

Таких соотношений используется, как известно, уже несколько десятков, например, Ba/Nb, Nb/Ta, Rb/Sr, Th/Yb, Sc/Y, Ti/Cr, Cr/Ni и т. д.

Погрешности дополнительно увеличиваются также из-за геологических причин, например, отбор непредставительных проб (измененных, выветрелых, с объемом, не соответствующим структуре и однородности породы и т. д.) или использование диаграмм, разработанных на примере свежих кайнотипных пород (подавляющее большинство диаграмм) для измененных палеотипных пород (практически все породы на Урале именно такие) или же для метаморфизованных пород высоких ступеней, когда постулируется так называемый «изохимический характер метаморфизма».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В таблице 1 показано содержания элементов-примесей в ультрамафитах и хромитовой руде, полученные методом ИСП-МС анализа для одних и тех же проб в разных лабораториях. В таблице 2 представлены результаты ИСП-МС анализа одних и тех же проб основных пород, которые измерены в одной лаборатории, но в разные годы. Во многих случаях, особенно, в таблице 1 эти данные свидетельствуют о высоких погрешностях ИСП-МС анализа даже в одной и той же лаборатории.

Приведем пример ошибочных геодинамических построений, базирующихся только на геохимических данных по вулканитам Западной Сибири, геологическое строение которой неоднократно описано автором данной статьи (Иванов и др., 2003, 2009, 2016, 2018а, 2018б). В этом регионе известны (Сурков и др., 1982) крупные триасовые линейные структуры (рис. 6), выполненные, преимущественно, базальтами и, реже, риолитами, перекрытыми песчаниками. По данным геологических наблюдений считается, что это грабены или рифты. Ранее было показано (Сурков и др., 1982, Иванов и др., 2018б), что данная рифтовая система обусловила формирование как самого Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского нефтегазоносного мегабассейна, так и предопределила размещение в нем фаций (и мощностей) осадочного чехла и месторождений нефти и газа. Для триасовых базальтов Западной Сибири характерен кайнотипный облик и присутствие свежего вулканического стекла. Вторичные изменения, как правило, не превышают уровень цеолитовой фации.

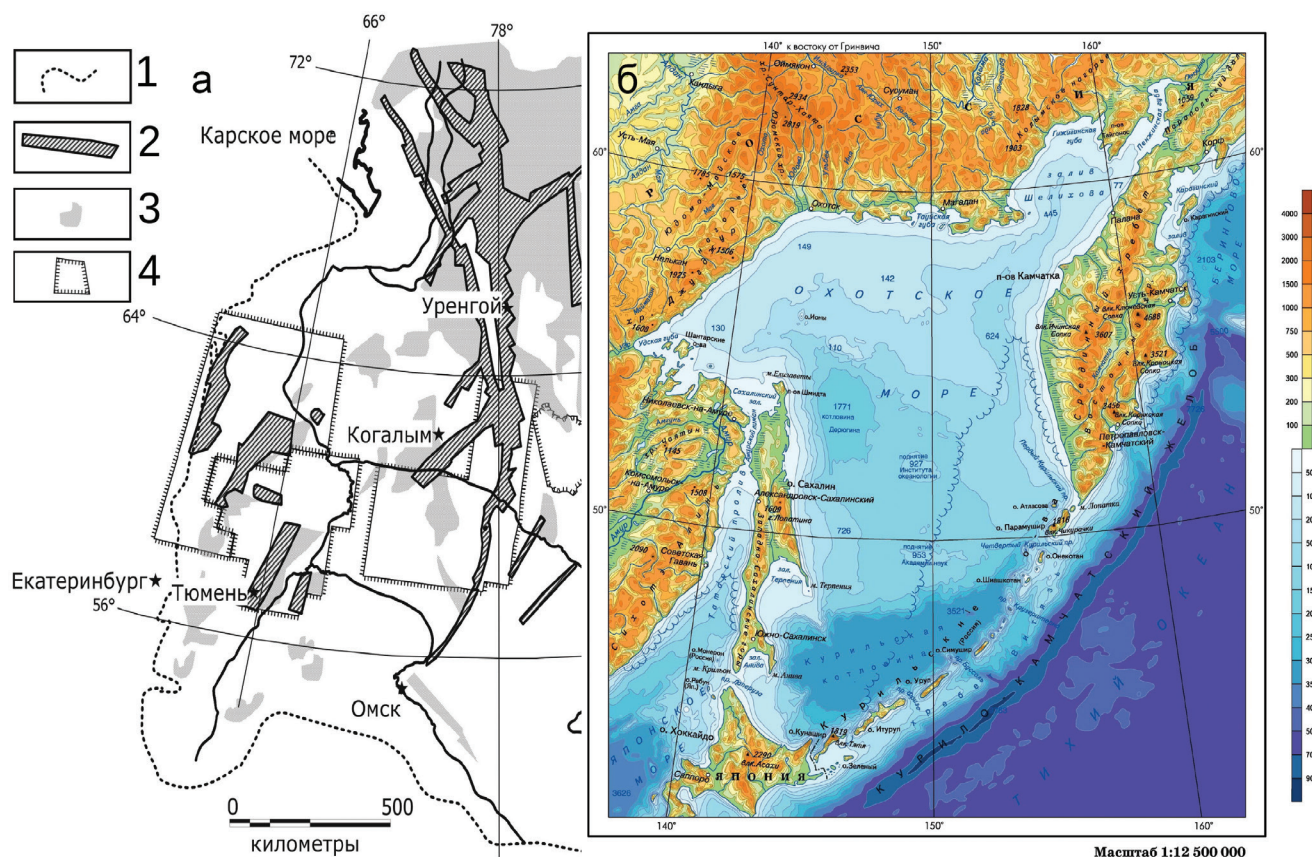


Рис. 6. Западно-Сибирская система триасовых рифтов (а) в сопоставлении с Курильско-Камчатской островной дугой (б) по данным (Сурков и др., 1982).

1 – границы Западно-Сибирской плиты; 2 – рифты; 3 – эффузивно-осадочный комплекс триаса (Т1–Т2) вне рифтов; 4 – границы территорий, где автор проводил картирование фундамента.

Fig. 6. West Siberian system of Triassic rifts (a) in comparison with Kuril-Kamchatka island arc (b) after (Surkov et al., 1982).

1 – boundaries of the West Siberian Plate; 2 – rifts; 3 – Triassic effusive-sedimentary complex (T1–T2) outside the rifts; 4 – boundaries of areas, where the author mapped the crystalline basement.

Не так давно стала активно высказываться альтернативная точка зрения на происхождение как этих вулканитов, так и слагаемых ими линейных триасовых структур. Представления об островодужном генезисе этих триасовых «вулканогенных поясов» основывались на интерпретации базы геохимических данных (Коровина, Кропотова, 2011; Шадрина и др., 2012). Так, авторы указывали, что «На классификационных диаграммах Н. Куно и Е. Муллена фигуративные точки базитов попадают в поле известково-щелочных базальтов, что принципиально отличает их от рифтогенных образований, представленных существенно толеитовыми разностями. На графиках $Zr-Nb-Y$ и $La-Y-Nb$ точки, характеризующие основные магматиты, локализованы в поле внутриплитных толеитовых базальтов и базальтов островных дуг. Аналогичная геодинамическая обстановка образования отражена на

диаграмме $Hf-Rb-Ta$, построенной по данным состава средне-кислых вулканитов... Геохимические особенности исследованных вулканитов свидетельствуют о смешанных источниках магм, включающих компоненты как глубинных, так и коровых уровней генерации расплава. Такая бимодальность магматизма отмечается в зрелых островных дугах и в магматитах активных континентальных окраин, в частности, в образованиях трансформной континентальной окраины» (Шадрина и др., 2012).

С нашей точки зрения, эти аргументы представляются недостаточными. Триасовые комплексы и структуры в Западной Сибири, как известно, образуют так называемый «промежуточный этаж» – они несогласно накладываются на смятые палеозойские комплексы, слагающие фундамент Западно-Сибирской плиты, и перекрываются юрскими и более молодыми субгоризонтальными рыхлыми

мелководными осадками платформенного чехла. В палеозое Западная Сибирь прошла полный цикл геодинамического развития, включая рифтогенный (вулканотерригенные толщи кембрия, вскрытые скважинами в ЮВ части региона (Конторович и др., 2021)) и океанический (ультрабазиты и базальты с прослоями яшм, содержащими радиолярии и конодонты ордовика (Иванов К.С. и др., 2007) этапы. Островодужные породы силура и девона развиты здесь практически повсеместно (Иванов и др., 2016; Сенников и др., 2024). Коллизионная стадия развития проходила в течение карбона и перми и завершилась внедрением гранитных массивов ~275 млн лет назад. Следовательно, в раннем триасе здесь не могли возникнуть островные дуги, т. к. это нарушало бы последовательность геодинамических событий. Если допустить, что Западная Сибирь являет собой какой-то геодинамический феномен, это все равно не представляется возможным.

Поскольку в юре и позднее триасовые комплексы практически не испытали значительных тектонических перемещений, то их структуры находятся под покровом мезо-кайнозойских рыхлых отложений практически в том же виде, что и в доюрское время. Как видно из рис. 6, мегаформа триасовых вулканитов Западной Сибири не напоминает структуру островной дуги. Здесь нет ни открытого океана, ни предостроводужного глубоководного желоба. Это можно утверждать вполне определенно, т. к. регион хорошо изучен с применением сейсмических методов и бурения. Таким образом, отнесение триасовых комплексов Западной Сибири к островодужным образованиям (или же «образованиям трансформной континентальной окраины») это геологическая ошибка.

Отчасти процитированные авторы правы – «субдукционная» геохимическая компонента в триасовых вулканитах Западной Сибири действительно имеется. Эта субдукционная компонента была зафиксирована ранее с другим объяснением (Иванов К.П. и др., 2007). Формирование триасовых базальтов происходило в условиях рифтогенного растяжения молодой континентальной литосферы, сформировавшейся в позднем палеозое в результате процессов субдукции и коллизии, в связи с чем на ряде геохимических диаграмм в составе базальтов постоянно устанавливается и «субдукционная» компонента (Иванов К.П. и др., 2007). Таким образом, триасовые рифтовые базальты Западной Сибири формировались на островодужном субстрате, состоящем из вулканогенных толщ, близких к сла-

гающим восточный островодужный сектор Урала. Поднимаясь к поверхности, триасовые базальты частично проплавливали и ассимилировали палеозойские островодужные комплексы фундамента молодой Западно-Сибирской платформы. Позднее это было подтверждено другими исследователями (Ivanov et al., 2013).

ВЫВОДЫ

Таким образом, использование геохимических данных (диаграмм и т. д.) для определения геодинамической природы геологических комплексов, их условий образования и других генетических выводов, не является панацеей. Они могут (и должны) использоваться с осторожностью, учетом погрешностей анализов и обязательно принимая во внимание независимые геологические факторы, такие, например, как форма геологических тел, последовательность их формирования и др., иначе ошибки, зачастую очень значительные, становятся фактически неизбежными. Критическая величина погрешности определения малых и редких химических элементов составляет примерно 30 %. При дальнейшем увеличении погрешности анализов все дискриминационные геохимические диаграммы, построения и выводы теряют смысл и приводят к ошибочным выводам.

Для уменьшения вероятности этих ошибок, прежде всего, необходимо признать наличие большой вышеописанной проблемы. Эффективные пути ее решения (т. е. повышения точности анализов), по-видимому, должны быть выработаны геологами и аналитиками совместно. Заказчики должны гарантировать представительность проб, т. е. использовать достаточное количество материала, который был правильно подготовлен (издроблен, отквартован и истерт), что особенно важно для крупнозернистых пород. Следует отдавать на химические анализы партии не менее чем из десяти проб. В каждую партию необходимо закладывать не менее одной «слепой» контрольной пробы. Эту пробу желательно проанализировать в разных аккредитованных лабораториях и иметь такие контрольные пробы для разных по составу пород (например, гранитов, андезитов, базальтов, ультраосновных пород). Заказчики должны тщательно изучать результаты химических анализов, быть осведомлены о величине погрешности анализа и приводить эти данные в методических частях своих статей.

ЛИТЕРАТУРА

- Балашов Ю.А. (1976) Геохимия редкоземельных элементов. М., Наука, 268 с.
- Гребенников А.В., Ханчук А.И. (2021) Геодинамика и магматизм трансформных окраин Тихоокеанского типа: основные теоретические аспекты и дискриминантные диаграммы. *Тихоокеанская геология*, 40(1), 3–24. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24>
- Иванов К.П., Иванов К.С., Федоров Ю.Н. (2007) Геохимия триасовых вулканитов Западно-Сибирской плиты (на примере туринской серии) / Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 767–790.
- Иванов К.С., Коротеев В.А., Печеркин М.Ф., Федоров Ю.Н., Ерохин Ю.В. (2009) История геологического развития и строение фундамента западной части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна. *Геология и геофизика*, 50(4), 484–501.
- Иванов К.С., Костров Н.П., Вахрушева Н.В., Ерохин Ю.В., Берзин С.В., Погромская О.Э., Степанов А.Е. (2018а) Геологическое строение фундамента центральной части Западно-Сибирской платформы (Югано-Колтогорский регион). Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 325 с.
- Иванов К.С., Лац С.А., Коротеев В.А., Костров Н.П., Погромская О.Э. (2018б) Главные причины закономерности размещения месторождений нефти Западно-Сибирской платформы. *Доклады Академии наук*, 481(3), 286–289. <https://doi.org/10.31857/S086956520001379-9>
- Иванов К.С., Смирнов В.Н., Ширяев П.Б. (2023) Исследования хромитовосности ультрабазитов. Посвящение Н.В. Вахрушевой (1959–2023). *Известия Уральского государственного горного университета*, 3(71), 172–176. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-3-157-158>
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Амон Э.О., Ерохин Ю.В., Бороздина Г.Н. (2007) О возрасте и составе офиолитов фундамента Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна. *Доклады Академии наук*, 413(4), 535–540.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. (2016) Геологическое строение фундамента Приуральской части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 302 с.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Коротеев В.А., Печеркин М.Ф., Кормильцев В.В., Погромская О.Э., Ронкин Ю.Л., Ерохин Ю.В. (2003) Строение и природа области сочленения Урала и Западной Сибири. *Доклады Академии наук*, 393(5), 647–651.
- Конторович А.Э., Варламов А.И., Ефимов А.С., Конторович В.А., Коровников И.В., Кринин В.А., Саравев С.В., Сенников Н.В., Филиппов Ю.Ф. (2021) Стратиграфическая схема кембрийских отложений юга Преденисейской части Западной Сибири. *Геология и геофизика*, 62(3), 443–465. <https://doi.org/10.15372/GiG2020206>
- Коровина Т.А., Кропотова Е.П. (2011) Геохронология и геодинамика формирования промежуточного комплекса по данным изотопных исследований. Материалы XIV научно-практической конференции «Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО – Югры». Т. 1. Ханты-Мансийск, 246–250.
- Пупышев А.А. (2025) Печатные и электронные издания по методу масс спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП). Библиографический указатель. *Аналитика и контроль*, 29(1), 96–116. <https://doi.org/10.15826/analitika.2025.29.1.007>
- Сенников Н.В., Обут О.Т., Изох Н.Г., Тимохин А.В., Филиппов Ю.Ф., Хабибулина Р.А., Киприянова Т.П., Перегоедов Л.Г., Кульков Н.П., Ратанов Л.С., Макаренко С.Н., Родыгин С.А., Савина Н.И., Татьянин Г.М., Ковешников А.Е., Исаев Г.Д., Бочкарев В.С., Тимчук А.С., Иванов К.С., Якупов Р.Р., Модзалевская Т.Л., Нехорошева Л.В. (2024) Региональная стратиграфическая схема силурийских отложений Западной Сибири. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, 2(58), 3–41. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-2-3-41>
- Сермягин Б.А., Пупышев А.А. (2008) Некоторые вопросы оценки погрешностей масс-спектрометрических измерений изотопного состава элементов. *Масс-спектрометрия*, 5(3), 163–184.
- Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Миронов А.Г., Бараш И.Г., Буланов В.А., Сизых А.И. (2001) Интерпретация геохимических данных. М., Интермет инжиниринг, 288 с.
- Сурков В.С., Трофимук А.А., Жеро О.Г., Конторович А.Э., Смирнов Л.В. (1982) Триасовая рифтовая система Западно-Сибирской плиты, ее влияние на структуру и нефтегазоносность платформенного мезозойско-кайнозойского чехла. *Геология и геофизика*, (8), 3–15.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М., Мир, 381 с.
- Чашухин И.С. (2009) Определение РЗЭ в ультрамафитах с использованием ICP-MS масс-спектрометров ELAN 6100 DRC и ELAN 9000 и различных способов разложения образцов. *Ежегодник-2008. Труды ИГГ УрО РАН*, 156, 350–353.
- Шадрин С.В., Чирков В.Л., Крицкий И.Л. (2012) Геодинамические обстановки древних континентальных окраин, возможность их диагностики и реконструкций и нефтегазоносности (Западная Сибирь). *Всероссийская конференция по глубинному генезису нефти*. Москва, ЦГЭ.
- Begley I.S., Sharp D.L. (1997) Characterisation and correction of instrumental bias in inductively coupled plasma quadrupole mass spectrometry for accurate measurement of lead isotope ratios. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 12, 395–402. <https://doi.org/10.1039/A605078F>
- Cabanis B., Lecomte M. (1989) Le diagramme La/10- Y/15-Nb/8; un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 309(20), 2023–2029.

Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Paleskii S.V., Nikolaeva I.V., (2013) Siberian traps large igneous province: evidence for two flood basalt pulses around Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 122, 58–76. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>.

Meschede M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56, 207–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)

Mullen E.D. (1983) MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 53–62. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90070-5)

Pearce J.A., Harris N., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>

Rollinson H.R. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman, UK, 352 p.

Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society Special Publication*, 42, 313–345.

REFERENCES

Balashov Yu.A. (1976) Geochemistry of rare earth elements. Moscow, Nauka, 268 p. (in Russian)

Begley I.S., Sharp D.L. (1997) Characterisation and correction of instrumental bias in inductively coupled plasma quadrupole mass spectrometry for accurate measurement of lead isotope ratios. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 12, 395–402. <https://doi.org/10.1039/A605078F>

Cabanis B., Lecolle M. (1989) Le diagramme La/10- Y/15-Nb/8; un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 309(20), 2023–2029.

Chashchukhin I.S. (2009) Analysis of rare earth elements in ultramafic rocks using ELAN 6100 DRC and ELAN 9000 ICP-MS mass spectrometers and various methods of sample decomposition. *Ezhgodnik-2008. Trudy IGG UrO RAN (Yearbook-2008. Proceedings of the IGG UB RAS)*, 156, 350–353 (in Russian).

Grebennikov A.V., Khanchuk A.I. (2021) Geodynamics and magmatism of the Pacific-type transform margins: aspects and discriminant diagrams. *Tikhookeanskaya geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)*, 40(1), 3–24. (in Russian) <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-1-3-24>

Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Amon E.O., Erokhin Yu.V., Borozdina G.N., Fedorov Y.N. (2007) Age and composition of ophiolites from the basement of the West Siberian petroliferous megabasin. *Doklady Earth Sciences*, 413, 415–419. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0703021X>

Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S. (2016). Geological structure of the basement of the Cis-Urals part of the West Siberian petroleum megabasin. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 302 p. (in Russian)

Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Koroteev V.A., Pecherkin M.F., Kormiltsev V.V., Pogromskaya O.E., Ronkin Yu.L., Erokhin Yu.V. (2003) Structure and nature of the conjugation of the Urals and Western Siberia. *Doklady Earth Sciences*, 393(9), 1230–1234.

Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Paleskii S.V., Nikolaeva I.V., (2013) Siberian traps large igneous province: evidence for two flood basalt pulses around Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 122, 58–76. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>.

Ivanov K.P., Ivanov K.S., Fedorov Yu.N. (2007) Geochemistry of Triassic volcanic rocks of the West Siberian Plate on example of the Tura Group. *Geodinamika, magmatizm, metamorfizm i rudoobrazovanie (Geodynamics, Magmatism, Metamorphism and Ore Formation)*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 767–790. (in Russian)

Ivanov K.S., Koroteev V.A., Pecherkin M.F., Fedorov Yu.N., Erokhin Yu.V. (2009) The western part of the West Siberian petroleum megabasin: geologic history and structure of the basement. *Russian Geology and Geophysics*, 50(4), 365–379. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.03.010>

Ivanov K.S., Kostrov N.P., Vakhrusheva N.V., Erokhin Yu.V., Berzin S.V., Pogromskaya O.E., Stepanov A.E. (2018) Geological structure of the basement of the central part of the West Siberian platform (Yugan-Koltogorsky region). Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 325 p. (in Russian)

Ivanov K.S., Lats S.A., Koroteev V.A., Kostrov N.P., Pogromskaya O.E. (2018) The main factors affecting the distribution of oil fields in the west Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 481(1), 873–876. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18070218>

Ivanov K.S., Smirnov V.N., Shiryaev P.B. (2023) Studies of chromite potential in ultramafic rocks. Dedication to N.V. Vakhrusheva (1959–2023). *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta (News of the Ural State Mining University)*, 3(71), 172–176. (in Russian)

Kontorovich A.E., Varlamov A.I., Efimov A.S., Kontorovich V.A., Korovnikov I.V., Krinin V.A., Sarayev S.V., Sennikov N.V., Filippov Y.F. (2021) Stratigraphic scheme of Cambrian deposits, south of the Cis-Yenisei area of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 62(3), 357–376. <https://doi.org/10.2113/RGG20204317>

Korovina T.A., Kropotova E.P. (2011) Geochronology and geodynamics of the intermediate complex formation

based on isotopic studies. *Materialy XIV nauchno-prakticheskoy konferentsii "Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsyala KHMAO – Yugry"* (Proceedings of the XIV Scientific and Practical Conference "Ways of Improvement of Petroleum and Ore Potential of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra"), vol. 1. Khanty-Mansiysk, 246–250. (in Russian)

Meschede M. (1986) A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56, 207–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)

Mullen E.D. (1983) MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 53–62. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90070-5)

Pearce J.A., Harris N., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>

Pupyshev A.A. (2025) Printed and electronic publications on inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). A bibliographic index. *Analitika i kontrol (Analytics and Control)*, 29(1), 96–116. (in Russian)

Rollinson H.R. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman, UK, 352 p.

Sennikov N.V., Obut O.T., Izokh N.G., Timokhin A.V., Filippov Yu.F., Khabibulina R.A., Kipriyanova T.P., Peregoedov L.G., Kulkov N.P., Ratanov L.S., Makarenko S.N., Rodygin S.A., Savina N.I., Tatyannin G.M., Koveshnikov A.E., Isaev G.D., Bochkarev V.S., Timchuk A.S., Ivanov K.S., Yakupov R.R., Modzalevskaya T.L.,

Nekhorosheva L.V. (2024) Regional stratigraphic scheme of the Silurian deposits of Western Siberia. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri (Geology and Mineral Resources of Siberia)*, 2(58), 3–41. (in Russian)

Sermyagin B.A., Pupyshev A.A. (2008) Some issues in assessing the errors of mass spectrometric measurements of the isotopic composition of elements. *Mass-spektrometriya (Mass Spectrometry)*, 5(3), 163–184. (in Russian)

Shadrina S.V., Chirkov V.L., Kritsky I.L. (2012) Geodynamic settings of ancient continental margins, possibility of their identification and reconstructions and petroleum potential (Western Siberia). *Vserossiyskaya konferentsiya po glubinnomu genezisu nefti (All-Russian Conference on Deep Oil Genesis)*. Moscow, TsGE. (in Russian)

Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Letnikova E.F., Mironov A.G., Barash I.G., Bulanov V.A., Sizykh A.I. (2001) Interpretation of geochemical data. Moscow, Internet Engineering, 288 p. (in Russian)

Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society Special Publication*, 42, 313–345.

Surkov V.S., Trofimuk A.A., Zherov O.G., Kontorovich A.E., Smirnov L.V. (1982) Triassic rift system in the West Siberian Plate and its influence on structure and petroleum potential of the platform Mesozoic-Cenozoic cover. *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 8, 3–15. (in Russian)

Taylor S.R., McLennan S.M. (1988) Continental crust: its composition and evolution. Moscow, Mir, 381 p. (in Russian)

Информация об авторе

Иванов Кирилл Святославич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; ivanovks55@ya.ru

Information about the author

Kirill S. Ivanov – Doct. Sci. (Geol.-Mineral.), Key Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; ivanovks55@ya.ru