

ГЕОХИМИЯ И СТРАТИГРАФИЯ ПОРОД МЕТАТЕРРИГЕННОГО РАЗРЕЗА СТРЕЛИЦКОЙ ТОЛЩИ ЛОСЕВСКОЙ СЕРИИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА. СТАТЬЯ II: ГЕОХИМИЯ

Р. А. Терентьев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 18 января 2013 г.

Аннотация. По геохимическим критериям метатерригенные породы лосевской серии Воронежского кристаллического массива образовались за счет архейских источников сноса контрастного состава: основного-ультраосновного (океаническая кора) и кислого, соответственно. Донская ассоциация и воронцовская серия образованы за счет источников континентального детрита. Палеобассейн стрелицкого времени формировался при минимальном выветривании терригенного источника, лавинообразном характере седиментации в узкой, динамично развивающейся глубоководной котловине (современный аналог – окраинные моря).

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, ранний протерозой, метатерригенные породы, лосевская серия, геохимия.

Abstract. By geochemical criteria the metaterrigenous rocks of Losevo series (Strelitca thickness) of the Voronezh Crystal Massif were formed at the expense of Archaean sources of a pulling down of contrast structure: the mafic-ultramafic (an oceanic crust) and acid, correspondingly. The Don association and Vorontcovka series are formed at the expense of sources continental detritus. Strelitca time Paleobasin was formed at the minimum weathering of terrigenous source. In the Paleobasin occurred avalanche sedimentation. The Paleobasin was a narrow and dynamically developing deep-water hollow (modern analog are back arc basin).

Key words: the Voronezh Crystal Massif, an early Proterozoic, metaterrigenous rocks, Losevo series, geochemistry

Введение

В настоящей статье приведены петрогеохимические данные по метатерригенным породам стрелицкой толщи лосевской серии. Не решенной проблемой остается вещественный состав фундамента и источников сноса для лосевской серии, которые в первом приближении можно установить как по компонентному составу так и по петрогеохимическим особенностям метатерригенных пород [1-7]. Автором предпринята попытка решения указанных выше проблем, а также оценка палеогеографических условий накопления терригенных пород стрелицкой толщи. Начало аналогичным исследованиям раннедокембрийских метатерригенных пород ВКМ положено в работах [8, 9]. В связи с чем, у нас есть возможность сравнить геохимию пород стрелицкой толщи с геохимическими особенностями, выявленными для сопряженных стратонов: донской ассоциации обоянской серии

(примыкающей с запада) и воронцовской серии (примыкающей с востока).

Методы исследования

Петрохимический. Определения концентраций петрогенных оксидов осуществлены комплексом методов в Отделе научно-производственных аналитических работ ИМГРЭ, г. Москва:

- Концентрации (в вес. %) SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 определялись методом ICP-OES (пламенно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой) на приборе Optima 3300 (аналитики Б.И. Волков, Ю.И. Гроссе, И.А. Пичугин). Погрешности их определения не превышают 5 отн. %.

- Концентрации (в вес. %) FeO , CO_2 определялись титриметрическим бихроматным, H_2O^- , H_2O^+ – гравиметрическим стандартными методами (аналитики Б.И. Волков, Ю.И. Гроссе). Погрешности их определения не превышают 5 отн. %.

- Концентрации (в вес. %) F, Cl, S определялись рентгено-флуоресцентным методом на приборе Axios Advansed (аналитики Н.М. Казакевич,

М.С. Стороженко). Погрешности их определения не превышают 5 отн. %.

Геохимический. Концентрации элементов (в г/т) определялись методом ICP-MS в Отделе научно-производственных аналитических работ ИМГРЭ, г. Москва на приборе Elan 6100 DRC в стандартном режиме (аналитики Т.Н. Павлова, Н.В. Васильев). Вскрытие образцов осуществлялось по методике кислотного разложения в микроволновой печи из навесок проб массой 50–100 мг. Методика обеспечивает полное разложение большинства магматических, метаморфических и осадочных пород, включая содержащиеся в них трудно разлагающиеся минералы (циркон, монацит и др.). В качестве стандартного образца использовался внутрилабораторный аттестованный образец горной породы, разложенный по той же методике, что и реальные образцы. Пределы обнаружения элементов составляли от 1–5 мг/т для тяжелых и средних по массе элементов (U, Th, REE и др.) с возрастанием до 20–50 мг/т для легких элементов (Ba, Rb и др.). Точность анализа составляла 3–10 отн. %.

Фактический материал исследования

Количество образцов, подвергнутых геохимическим исследованиям – 17 штук. Для сравнительной характеристики использованы петрографические и геохимические материалы по метаосадочным породам воронцовской серии, вскрытым Воронежской параметрической скважиной – 34 штуки (из них метапсаммиты-метаалевролиты – 16, сланцы – 18), а также по образованиям донской ассоциации обоянской серии по данным [8].

Результаты исследования

Петрохимия

По химическому составу (табл. 1) метатерригенные породы стрелицкой толщи классифицируются как низкокальциевые (безамфиболовые) и высококальциевые (известковистые) умереннонасыщенные K_2O метапелиты, одновременно обогащенные железом (окисное железо в 1.5–3 раза выше закисного), умеренноглиноземистые ($Al_2O_3 = 14.2–17.8$ мас.%). Только один образец 0150/609.1 м относится к группе метабазитов. Все породы имеют повышенную натровость, отношение K_2O/Na_2O очень низкое – 0.1–1.0. Метапелиты по сравнению со средними составами архейских и протерозойских граувакк [13] характеризуются варьирующими содержаниями натрия, часто повышенными магния и кальция, пониженной концентрацией K_2O , рав-

ными содержаниями Al_2O_3 ; SiO_2 существенно варьирует от 53 до 66 мас.% в разных зонах. Известковистые метапелиты стрелицкой толщи отличаются от метапелитов более низкими содержаниями кремнезема, глинозема, высокими – кальция и магния.

Для уточнения генезиса пород использованы диаграммы соотношений петрогенных оксидов (рис. 1а), согласно которых проанализированные образцы относятся к железистым глинам и грауваккам.

Низкие значения индексов CIA, CIW и в интервалах 28–55 и 41–67, соответственно, свидетельствуют об образовании метатерригенных пород стрелицкой толщи за счет слабовыветрелых продуктов в обстановке холодного климата. Этот вывод подтверждается данными по индексу ICSV (1–2), свидетельствующими о поступлении в область седиментации и размыва незрелого материала, соответствующего составам разрушаемых пород (рис. 1в).

Геохимия

Содержания РЗЭ и редких элементов, а также ряда их индикаторных отношений (La/Sc , Th/Sc , La/Th , Co/Th , Th/U), которые информативны при реконструкции состава и условий формирования протолита, приведены в табл. 2 и 3. Спектры распределения РЗЭ для изученных образцов стрелицкой толщи (рис. 5) характеризуются значительной дифференцированностью, особенно для известковистых метапелитов, отсутствием европиевой аномалии ($Eu/Eu^* = 0.8–1.1$), что отличает их от PAAS и раннепротерозойских граувакк и сближает с архейскими граувакками [18]. Отрицательный наклон спектров свидетельствует о пониженных в сравнении с PAAS и раннепротерозойскими граувакками отношениях $(La/Yb)_N = 3.7–11.3$ и $(LREE/HREE)_N = 1.4–3.5$ с низким содержанием $\Sigma REE = 51–125$ г/т (см. табл. 3), что отражает вовлечение в область эрозии существенных объемов продуктов основного вулканизма. Следует отметить, что в целом эти спектры не сопоставимы с распределением РЗЭ, характерным для метатолитов и метаплагиориолит-дацитов стрелицкой толщи (см. рис 5). Т.е. метатерригенные породы стрелицкой толщи не связаны с вулканизмом этого времени.

В группе литофильных элементов для большинства метапелитов наблюдаются пониженные концентрации Rb, Ba в сравнении с PAAS и раннепротерозойскими граувакками, что сближает их со средними составами архейских граувакк. В группе высокозарядных элементов Y и Hf присутствуют в 1.5–2.5 раза меньших количествах относительно

Таблица 1

Химические составы (%) метатерригенных пород стрелицкой толщи лосевской серии ВКМ (скважина 0150)

Глубина, м	262.2	747.0	835.3	856.4	960.6	1105.1	238.7	255.6	349.0	436.6	596.6	621.4	645.6	669.5	764.0	939.6	609.1
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	66.30	58.20	64.60	62.20	55.10	55.00	63.30	55.20	59.50	55.90	63.50	53.80	55.90	60.00	55.80	53.30	46.10
TiO ₂	0.338	0.833	0.772	0.941	0.892	0.867	0.449	0.669	0.819	0.727	0.514	0.785	0.734	0.493	0.764	0.812	0.779
Al ₂ O ₃	15.2	16.9	15.3	14.7	17.8	16.4	15.4	15.5	15.9	15.6	15.2	15.6	16	14.2	15.5	14.2	11.7
Fe ₂ O ₃	0.94	2.53	1.38	2.77	4.19	3.41	1.20	2.66	1.87	2.75	1.98	3.31	2.88	1.69	1.64	2.49	5.64
FeO	3.12	5.2	5.95	6.29	5.04	5.08	4.79	7.05	7.06	6.48	4.47	7.19	5.1	5.81	6.77	6.34	4.82
MnO	0.053	0.131	0.106	0.125	0.122	0.131	0.084	0.127	0.135	0.132	0.091	0.153	0.123	0.102	0.114	0.179	0.193
MgO	0.821	2.08	1.21	1.5	2.78	4.13	2.98	5.16	2.52	3.83	2.6	4.28	3.87	4.44	2.04	6.91	11.6
CaO	2.58	6.78	4.01	4.11	5.81	5.53	5.12	6.95	5.15	8.23	5.14	6.84	7.85	6.08	5.8	7.06	16
Na ₂ O	4.79	1.7	3.35	4.31	4.77	4.09	2.99	2.51	4.06	3.27	3.89	3.92	3.83	4.27	3.73	3.75	0.76
K ₂ O	3.13	1.7	1.15	0.916	0.457	0.532	0.853	1.31	0.365	0.609	0.307	0.936	0.227	0.467	0.593	0.551	0.24
P ₂ O ₅	0.11	0.128	0.131	0.176	0.119	0.134	0.115	0.123	0.113	0.16	0.115	0.304	0.071	0.085	0.118	0.142	0.901
CO ₂	0.85	0.57	0.06	0.06	0.05	0.94	0.12	0.15	0.08	0.17	0.06	0.32	0.97	0.44	5.06	1.2	0.15
H ₂ O ⁺	0.22	0.2	0.13	0.2	0.18	0.2	0.15	0.1	0.2	0.01	0.21	0.15	0.2	0.01	0.14	0.16	0.02
H ₂ O ⁻	1.31	2.49	1.24	1.08	2.12	3.13	1.97	1.82	1.55	1.51	1.52	1.65	1.63	1.08	1.16	2.25	0.56
F	0.019	0.045	0.043	0.045	0.078	0.068	0.037	0.04	0.062	0.053	0.032	0.066	0.056	0.04	0.086	0.075	0.109
Cl	0.01	0.003	0.01	0.011	0.005	0.003	0.006	0.005	0.002	0.001	0.006	0.004	0.003	0.004	0.003	0.004	0.003
S	0.05	0.021	0.024	0.03	0.057	0.034	0.013	0.009	0.353	0.077	0.012	0.058	0.057	0.02	0.04	0.009	0.055
Сумма	99.84	99.51	99.46	99.46	99.57	99.68	99.57	99.39	99.74	99.51	99.65	99.37	99.50	99.23	99.35	99.44	99.63
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.36	3.44	4.22	4.23	3.10	3.35	4.11	3.56	3.74	3.58	4.18	3.45	3.49	4.23	3.60	3.75	3.94
K ₂ O/Na ₂ O	0.65	1.00	0.34	0.21	0.10	0.13	0.29	0.52	0.09	0.19	0.08	0.24	0.06	0.11	0.16	0.15	0.32
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.206	0.101	0.075	0.062	0.026	0.032	0.055	0.085	0.023	0.039	0.020	0.060	0.014	0.033	0.038	0.039	0.021
CIW	67.35	66.59	67.52	63.58	62.72	63.03	65.50	62.10	63.32	57.56	62.73	59.18	57.80	57.84	61.93	56.78	41.11
CIA	54.74	52.78	54.45	50.24	49.16	49.43	51.99	48.05	49.78	43.41	49.13	45.24	43.75	44.00	48.17	42.77	27.83
ICV	1.03	1.23	1.16	1.42	1.34	1.44	1.19	1.70	1.37	1.66	1.24	1.75	1.53	1.64	1.38	1.97	3.41

Примечания: CIW = $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \cdot 100$ – химический индекс выветривания [10], CIA = молекулярные количества $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O)] \cdot 100$ – химический индекс изменения [11], ICV = $(CaO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3(общ) + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$ – индекс зрелости осадков [12]

РААС и раннепротерозойских граувакк; содержания Zr, Nb и Ta ниже таковых в РААС, но близки к средним составам архейских и раннепротерозойских граувакк. Концентрации транзитных (Sc, Co, Ni) элементов меньше или равны РААС и средним составам раннепротерозойских граувакк. Унаследованность первичного состава магматического субстрата подтверждается высокой положительной линейной корреляцией между содержаниями высокозарядных некогерентных элементов = Zr, Hf, Y, Ta, Nb (см. табл. 2), а контрастный состав всех остальных элементов указывает на смешанный состав субстрата областей сноса и эрозии при преобладании пород основного состава. Это может быть следствием как более глубоководных условий седиментации, о чем свидетельствуют пониженные значения отношений $(LREE/HREE)_N = 1.4-3.5$ [19] и $Ce/Ce^* \leq 1$ [20], так и увеличением примеси базитового вещества в осадках. На размыв пород

основного состава при образовании известковистых метапелитов стрелицкой толщи также указывают низкие значения отношений $La/Sc = 0.2-1.0$, $Th/Sc = 0.06-0.09$, $Th/U = 3.4-6.4$ и высокие значения $La/Th = 4.5-9.9$ и $Co/Th = 9-20$ в сравнении со средним составом РААС. На генетических диаграммах Sc-Th-La и Sc-Th-Zr фигуративные точки составов пород локализованы преимущественно в полях океанических островных дуг (рис. 6), что свидетельствует о возможных океанических условиях формирования базитов области размыва. *Особо отметим, что используем геохимические диаграммы для диагностики геотектонических обстановок только как вспомогательный инструмент, который в нашем случае может лишь ориентировочно указать на состав разрушаемой коры (океаническая или континентальная), – установление по ним геотектонических обстановок затруднительно. Неадекватность использования*

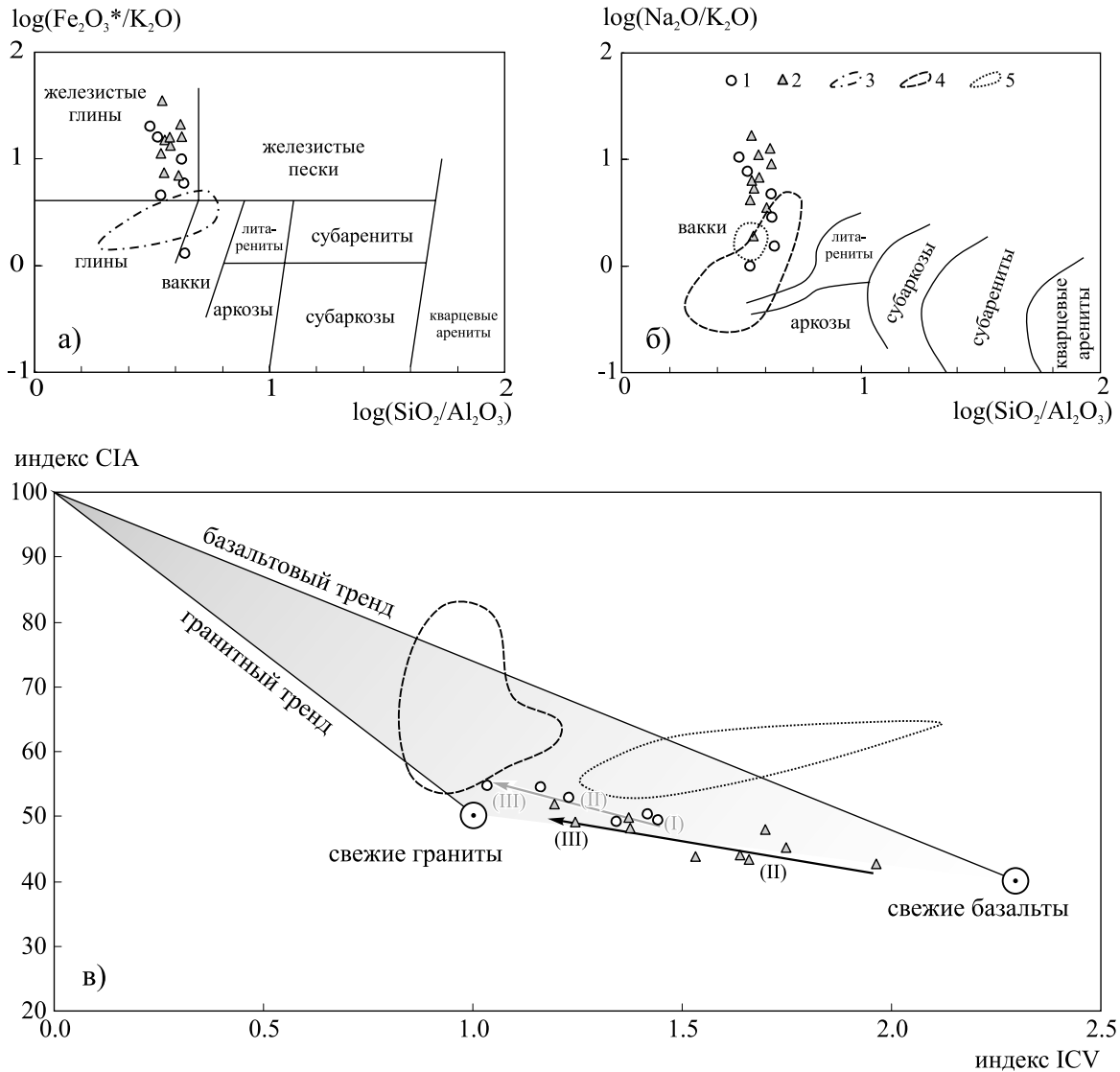


Рис. 1. Диаграммы для классификации метаосадочных пород стрелицкой толщи: а) по [14], б) по [15] и в) два индикатора выветривания: тренды базальтов и гранитов по данным [16], стрелками показаны направления созревания метатерригенных пород стрелицкой толщи от древних к более молодым (в скобках римскими цифрами – номера пачек). Условные обозначения: 1–2 – точки составов пород стрелицкой толщи: метапелитов (1) и известковистых метапелитов (2); 3–5 – поля составов донской ассоциации и воронцовской серии нерасчлененные (3), воронцовской серии (4) и донской ассоциации (5)

некоторых из них для диагностики наглядно показана в работе [22], где осадки известных неогеновых активных континентальных окраин попали в поля, предложенные М.К. Бхатия [23], для разнообразных геодинамических обстановок от пассивных окраин до океанических островных дуг и т.п.

Обе петрохимические группы метапелитовы различаются эволюцией спектров распределения РЗЭ (см. рис. 2) в зависимости от увеличения содержания кремнезема (в этом же направлении увеличивается доля зрелых осадков), отношениями Zr/Sc, Th/Sc, Eu/Eu* и др. (см. рис. 3), свидетельствующих о том, что для метапелитов источником

служили гранитоиды (возможно, тоналит-трондземитовой серии), для известковистых метапелитов – основные-ультраосновные породы. Концентрации литофильных (Rb, Ba, Sr) элементов в метапелитах стрелицкой толщи несколько выше, чем в известковистых разновидностях (см. табл. 2), в отличие от высоких содержаний Sc, Cr, при близких значениях Ni, Co, V.

Обсуждение результатов

Факторный анализ петрохимических данных (91 анализ) по породам стрелицкой толщи показывает, что составы апоэффузивных и апосубвулкани-

Таблица 2

Содержания (г/т) редких и редкоземельных элементов в метатерригенных породах стрелицкой толщи лосевской серии ВКМ (скважина 0150)

Глубина, м	262.2	747.0	835.3	856.4	960.6	1105.1	238.7	255.6	349.0	436.6
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Be	0.635	0.698	0.973	0.962	0.984	0.72	0.542	0.753	1.02	0.578
Sc	10.2	8.72	23.2	22.4	11.2	21.4	19.1	34.1	22.5	32.4
Ti	2120	4217	4785	5336	4615	5290	2857	4272	5107	4722
V	89.1	155	98.2	155	165	172	105	186	154	208
Cr	53.8	45	38.9	46.8	38.3	61.3	159	307	30.1	114
Mn	369	848	750	865	804	956	600	926	928	984
Co	6.54	29.1	12.9	16.1	24	28.6	19.1	31	24.8	29.4
Ni	0	13.9	0	2.36	23.2	57.6	51.3	77.8	17.4	59.6
Cu	60.1	40	23.8	20.2	42.6	41.1	62.1	42.2	8.2	462
Zn	40.5	48.5	77.7	77.7	58.8	50.4	55.7	74.9	106	74.4
Ga	13.6	17.4	19.1	18	18.8	16.5	16.4	16.5	17.9	18.9
Rb	78.1	71.2	34.8	24.5	21.4	11.6	28	42.3	8.54	17
Sr	205	203	151	213	293	269	248	261	193	325
Y	6.35	16.9	20.8	21.5	16.7	16.3	7.13	12.91	16.5	11.6
Zr	128	154	223	195	164	143	128	105	122	102
Nb	4.1	5.65	8.76	8.4	6.32	5.92	3.75	7.03	9.4	4.01
Mo	4.83	3.59	5.92	4.33	37.8	2.59	3.04	3.85	4.55	3.79
Sn	0.719	0.901	1.44	1.4	0.971	0.732	0.776	0.962	1.32	0.806
Cs	0.563	1.27	1.51	0.557	0.863	0.407	1.07	0.608	0.437	0.303
Ba	649	147	282	216	111	229	158	284	145	138
Hf	3.46	4.2	6.24	5.44	4.45	3.83	3.41	3.07	3.83	2.98
Ta	0.409	0.668	0.856	0.799	0.616	0.606	0.341	0.565	0.789	0.332
Th	2.24	1.99	2.75	2.47	1.97	1.67	1.72	1.91	2.03	1.51
U	1.022	0.484	0.674	0.527	0.447	0.286	0.369	0.477	0.469	0.375
La	10.6	11.5	14.8	14.7	11.4	9.83	8.67	12.4	12.3	6.77
Ce	21.7	25.6	34	33.1	25.3	22.4	17.7	27.4	28.9	14.9
Pr	2.5	3.17	4.15	4.12	3.19	2.82	2.12	3.44	3.75	2.02
Nd	9.32	13	16.7	17	13	11.9	8.18	13.7	15.9	8.76
Sm	1.78	3.01	3.68	3.86	2.97	2.9	1.72	2.79	3.86	2.19
Eu	0.451	0.883	1.246	1.23	0.94	0.917	0.594	0.93	1.11	0.811
Gd	1.53	3.29	3.59	4.04	3.13	3.2	1.64	2.62	3.62	2.33
Tb	0.221	0.53	0.604	0.658	0.509	0.517	0.247	0.416	0.544	0.376
Dy	1.23	3.17	3.95	4.19	3.2	3.19	1.46	2.51	3.28	2.33
Ho	0.242	0.662	0.854	0.881	0.662	0.667	0.273	0.521	0.673	0.482
Er	0.654	1.9	2.45	2.5	1.84	1.83	0.764	1.47	1.86	1.36
Tm	0.101	0.277	0.377	0.364	0.264	0.28	0.111	0.227	0.274	0.205
Yb	0.63	1.81	2.48	2.36	1.76	1.8	0.679	1.429	1.78	1.3
Lu	0.096	0.289	0.385	0.36	0.258	0.276	0.104	0.223	0.275	0.195

Глубина, м	596.6	621.4	645.6	669.5	764.0	939.6	609.1
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17
Be	0.667	1.16	0.609	0.522	0.704	0.469	1.398
Sc	22.2	33.5	16.9	31.7	22.8	48.1	48.4
Ti	3263	5027	3788	3182	5062	6101	5919
V	131	218	150	162	203	214	347
Cr	122	66.1	97.8	304	51.1	351	536
Mn	634	1113	803	757	893	1585	1841
Co	17.6	29.5	27.2	25	24.2	38.8	59.3
Ni	37.8	5.02	86.3	124	16.3	122	334
Cu	41.8	82.6	27.8	30.5	48.2	52.3	66.7
Zn	62	79.7	45.4	54.1	45.7	125	116
Ga	16.9	17.3	16	15.9	18.5	23.3	24.2
Rb	9.51	26.5	7.67	11.9	19.2	20.8	3.9
Sr	287	300	205	277	235	220	1237
Y	8.93	22.7	13.9	9.78	16.4	26.4	41.5
Zr	147	144	114	123	149	194	246
Nb	5.37	7.13	4.48	4.37	5.55	13.4	12.3
Mo	3.91	4.7	2.87	5.38	4.12	3.42	4.69
Sn	0.885	1.12	0.599	0.898	0.842	1.98	1.47
Cs	0.308	0.442	0.468	0.301	0.377	0.48	0.207
Ba	133	490	129	126	174	91	146
Hf	3.97	4.26	3.14	3.42	4.11	5.41	5.62
Ta	0.485	0.593	0.443	0.417	0.572	4.387	0.733
Th	1.9	2.49	1.69	1.86	1.67	4.3	14.9
U	0.37	0.737	0.264	0.336	0.36	0.945	3.58
La	9.77	15.1	16.7	8.66	10.6	21.7	131
Ce	21.8	33	29.5	18	23.6	46.3	250.6
Pr	2.55	4.27	2.3	2.19	2.92	6.05	39.1
Nd	9.98	17.9	9.71	8.7	12.5	25.9	160
Sm	2.2	4.11	2.33	1.93	2.89	5.56	27.8
Eu	0.75	1.16	0.789	0.648	0.904	1.67	6.75
Gd	2	4.09	2.43	1.94	3.11	5.34	17.1
Tb	0.304	0.663	0.411	0.32	0.498	0.844	1.874
Dy	1.82	4.19	2.56	1.93	3.14	4.84	8.77
Ho	0.369	0.921	0.543	0.391	0.659	0.977	1.44
Er	0.994	2.68	1.62	1.1	1.82	2.63	3.55
Tm	0.142	0.418	0.238	0.162	0.284	0.393	0.476
Yb	0.924	2.79	1.53	1.07	1.81	2.4	2.81
Lu	0.138	0.429	0.228	0.167	0.26	0.375	0.423

ческих пород образуют компактные поля (рис. 4). Метаморфизованные вулканотерригенные и вулканокласто-осадочные образования расширяют эллипсоиды рассеивания составов метавулканитов, что обусловлено примесью осадочного материала. Генетическая связь вулканотерригенных и вулканогенно-осадочных пород с эффузивными и субвулканическими обуславливает близость их вещественного состава, проиллюстрированного на рис. 4. Наблюдается значительное отклонение фигуративных точек химических составов кислых вулкано-

генно-осадочных пород в сторону поля метабазальтоидов, что связано со смешиванием материала кислых пород с материалом одновременно извергавшихся основных лав и пирокластов (см. фигуративные точки правее поля кислых эффузивов на рис. 4). Химические составы метатерригенных пород (разрез второго типа: скважины 0150, К-31, 570с) группируются в самостоятельное поле. Причем, эволюция осадочной (второй тип разреза) и вулканогенно-осадочной (первый тип разреза) дифференциации сначала перпен-

Таблица 3

Отношения редких и редкоземельных элементов в метатерригенных породах стрелицкой толщи лосевской серии ВКМ (скважина 0150)

Глубина, м	262.2	747.0	835.3	856.4	960.6	1105.1	238.7	255.6	349.0	436.6	596.6	621.4	645.6	669.5	764.0	939.6	609.1
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Zr/Sc	12.55	17.66	9.61	8.71	14.64	6.68	6.70	3.08	5.42	3.15	6.62	4.30	6.75	3.88	6.54	4.03	5.08
Th/Sc	0.22	0.23	0.12	0.11	0.18	0.08	0.09	0.06	0.09	0.05	0.09	0.07	0.10	0.06	0.07	0.09	0.31
Th/U	2.19	4.11	4.08	4.69	4.41	5.84	4.66	4.00	4.33	4.03	5.14	3.38	6.40	5.54	4.64	4.55	4.16
La/Th	4.73	5.78	5.38	5.95	5.79	5.89	5.04	6.49	6.06	4.48	5.14	6.06	9.88	4.66	6.35	5.05	8.79
La/Sc	1.04	1.32	0.64	0.66	1.02	0.46	0.45	0.36	0.55	0.21	0.44	0.45	0.99	0.27	0.46	0.45	2.71
Co/Th	2.92	14.62	4.69	6.52	12.18	17.13	11.10	16.23	12.22	19.47	9.26	11.85	16.09	13.44	14.49	9.02	3.98
Ce/Ce*	0.98	1.00	1.03	1.01	1.00	1.01	0.97	0.99	1.02	0.96	1.07	0.86	1.01	1.01	0.92	0.92	0.88
Eu/Eu*	0.82	0.85	1.04	0.95	0.94	0.92	1.07	1.04	0.89	1.09	1.03	0.98	1.00	0.97	1.00	0.96	0.83
La _N /Sm _N	3.75	2.40	2.53	2.40	2.41	2.13	3.17	2.80	2.00	1.94	2.79	2.31	4.51	2.82	2.31	2.46	2.96
La _N /Yb _N	11.34	4.28	4.02	4.20	4.37	3.68	8.61	5.85	4.66	3.51	7.13	3.65	7.36	5.46	3.95	6.10	31.43
ΣREE	51.06	69.09	89.27	89.36	68.42	62.53	44.26	70.08	78.13	44.03	53.74	91.72	70.89	47.21	65.00	124.98	651.69
LREE _N /HREE _N	3.48	1.72	1.80	1.72	1.74	1.54	2.56	2.26	1.89	1.44	2.43	1.68	2.29	2.00	1.64	2.12	5.51
Cr/V	0.60	0.29	0.40	0.30	0.23	0.36	1.51	1.65	0.20	0.55	0.93	0.30	0.65	1.88	0.25	1.64	1.54
Yb/Sm	0.35	0.60	0.67	0.61	0.59	0.62	0.39	0.51	0.46	0.59	0.42	0.68	0.66	0.55	0.63	0.43	0.10
La/Sm	5.96	3.82	4.02	3.81	3.84	3.39	5.04	4.44	3.19	3.09	4.44	3.67	7.17	4.49	3.67	3.90	4.71

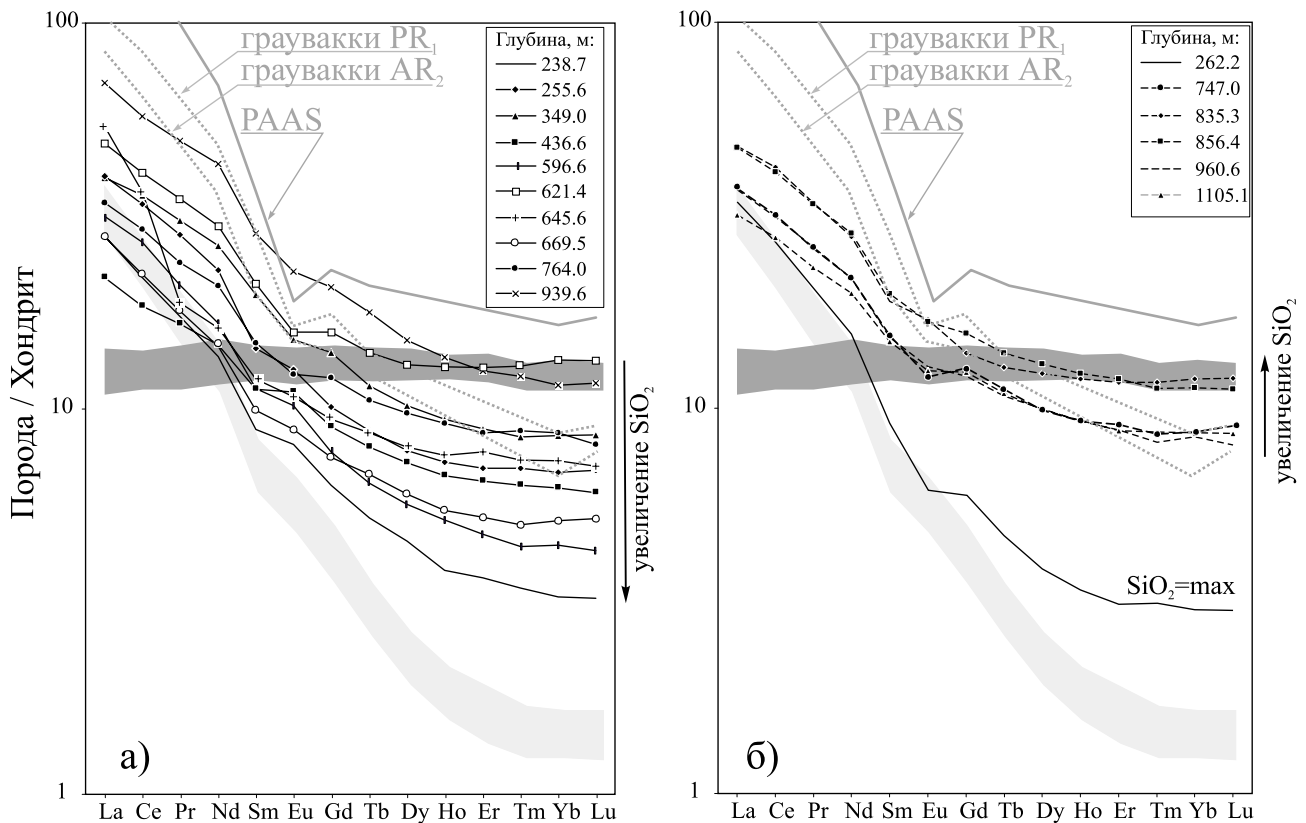
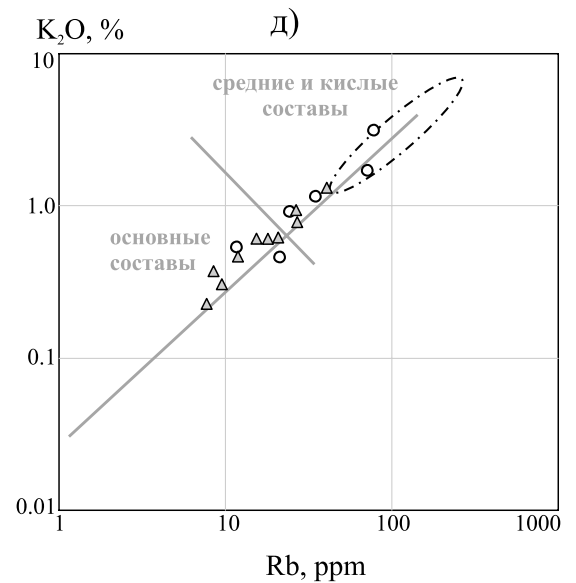
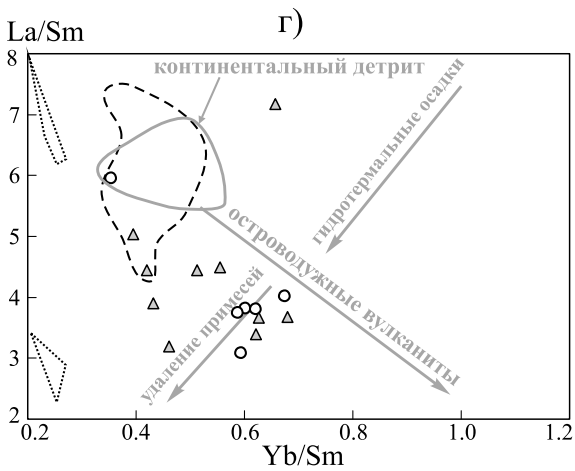
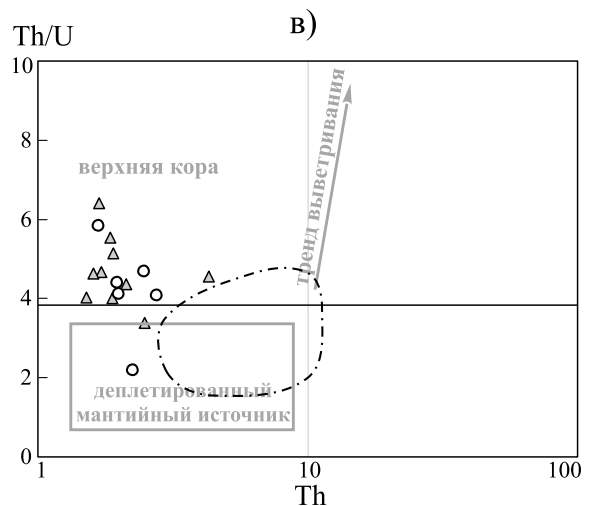
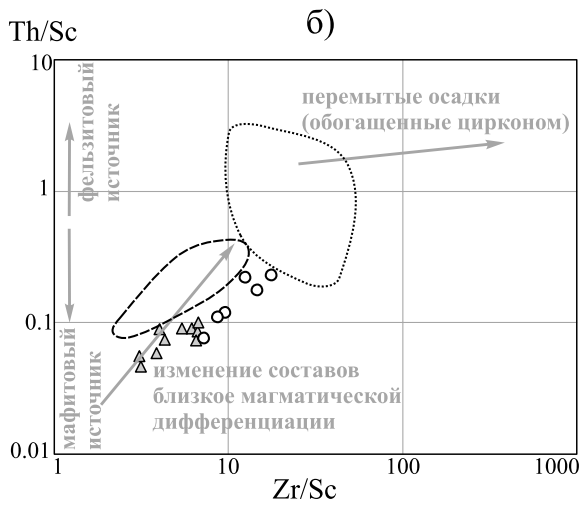
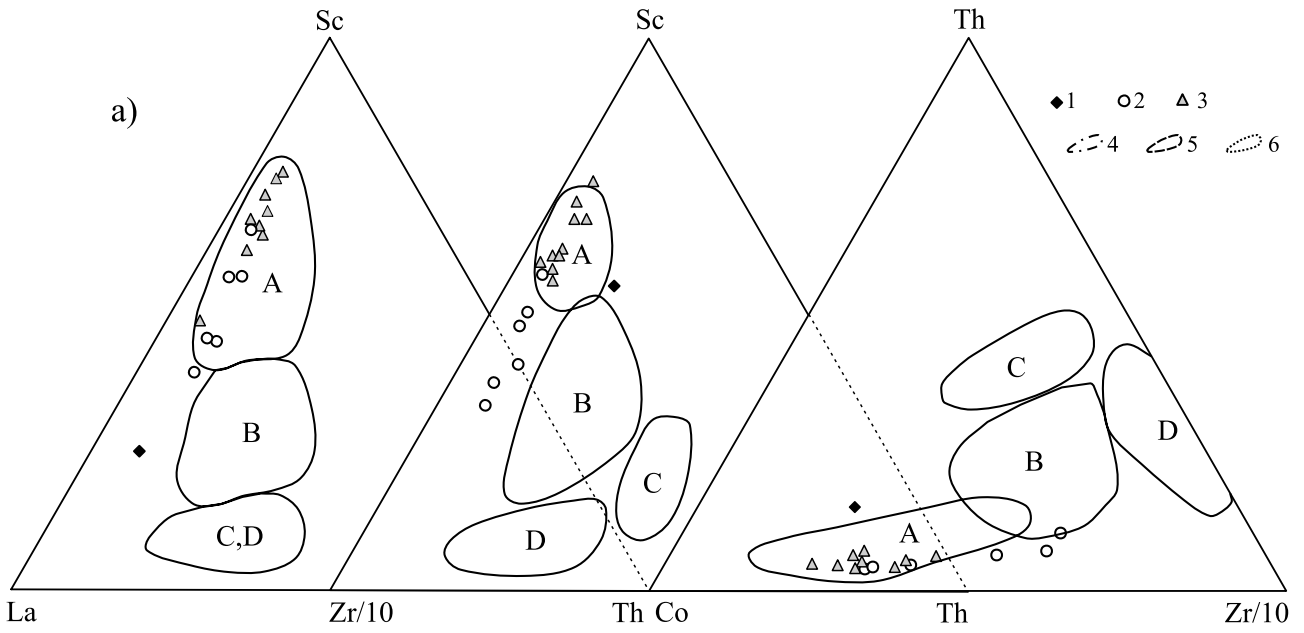


Рис. 2. Хондрит-нормализованное распределение редкоземельных элементов в метатерригенных породах стрелицкой толщи (скважина 0150): а) известковистые метапелиты и б) метапелиты. Поля составов: метатолеитов (серое) и метаплагиориолит-дацитов (светло-серое) стрелицкой толщи. Хондрит С1 по [17]



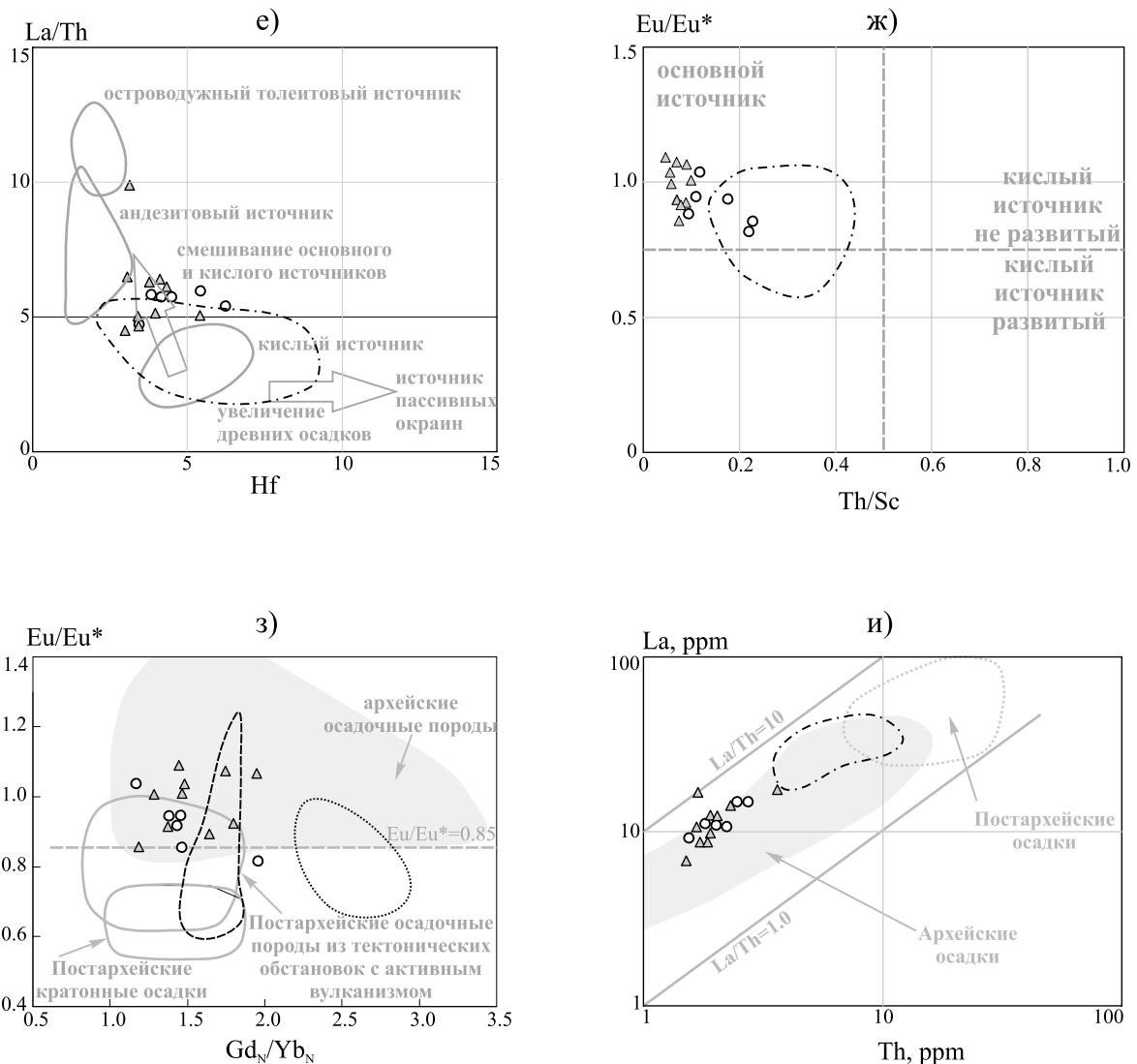


Рис. 3. Положение фигуративных точек составов метатерригенных пород стрелицкой толщи на дискриминационных диаграммах: а) [3], где А – океанические островные дуги, В – континентальные островные дуги, С – активные континентальные окраины, D – пассивные окраины; б, в) [5]; г) [6]; д) [2]; е) [4]; ж) [7]; з) [21]; и) [13]. Условные обозначения: 1–3 – точки составов метатерригенных пород стрелицкой толщи: метабазит (1), метапелиты (2) и известковистые метапелиты (3); 4–6 – поля составов донской ассоциации и воронцовской серии нерасчлененные (4), воронцовской серии (5) и донской ассоциации (6)

дикулярны, а затем разнонаправлены. Это исключает возможность формирования метатерригенных пород стрелицкой толщи за счет пирокластов и эффузивных образований контрастной метабазальт-плагиориолитовой формации. С другой стороны, в объеме стрелицкой толщи нет магматических образований, соответствующих по химическому составу средним породам, которые могли бы служить источником сноса для метатерригенных образований, прежде всего, метаграувакк. Это значит, что источник сноса следует искать на более низком стратиграфическом уровне, например, в обоянской или михайловской сериях, а совокуп-

ность метаморфизованных терригенных пород стрелицкой толщи выделять в самостоятельную метатерригенную формацию.

Выявленные геохимические закономерности (см. рис. 3) подчеркивают преобладание продуктов разрушения кислых пород (скорее всего, гранитоидов тоналит-грондьемитовой ассоциации архея) в областях эрозии на ранних стадиях развития осадочной системы (пачка № 1, метапелиты), что согласуется с величиной $Eu/Eu^* \geq 0.85$, характерной для архейских пород [21], так и минимум их выветривания [5, 16]. На размыв пород кислого состава указывают также повышенные значения

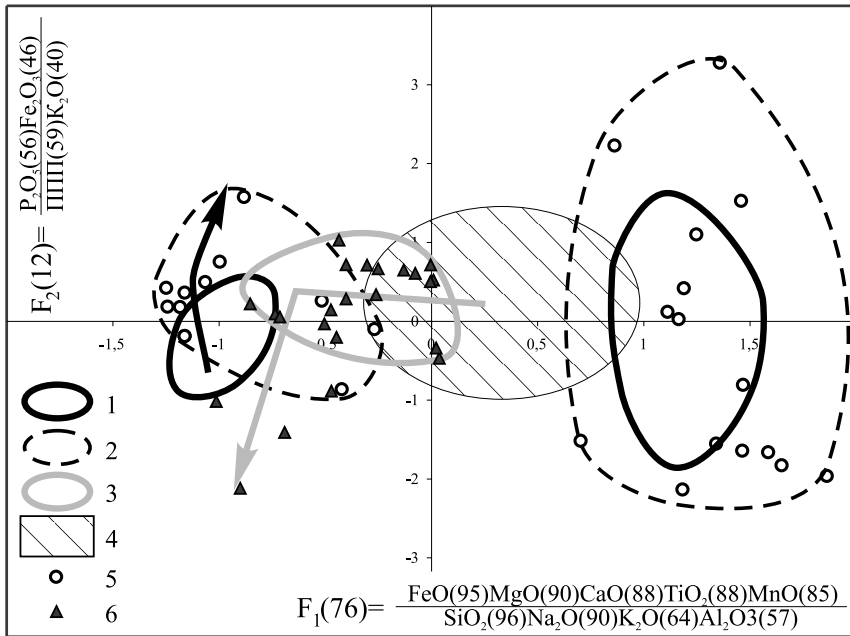


Рис. 4. Факторная диаграмма химических составов пород стрелицкой толщи: 1–4 – поля составов пород: 1 – субвулканических и эффузивных (слева – кислые, справа – основные метавулканисты); 2 – вулканотерригенных и вулканогенно-осадочных; 3 – терригенных (кроме плагиоклаз-биотит-кварцевых сланцев и метаалевролитов); 4 – предполагаемого источника сноса для терригенных пород; 5–6 – фигуративные точки составов осадочных пород субсинхронных (5) и асинхронных (6) вулканизму стрелицкого времени. Стрелками показаны направления осадочной (серая стрелка) и вулканогенно-осадочной (черная стрелка) дифференциации

Th/Sc до 0.22 и соотношения калия и рубидия (см. рис. 3д). На диаграммах $Eu/Eu^*-(Gd/Yb)_N$ и La-Th (см. рис. 3з,и) все фигуративные точки составов метапелитов локализованы в поле архейских отложений. Известковистые метапелиты, преобладающие в пачке № 2 и, в меньшей степени, в пачке № 3 на дискриминационных диаграммах попадают в области, близкие к мафитовым источникам сноса (см. рис. 6 б,д,ж). А наличие терригенных пород, соответствующих по химическому составу метабазитам, свидетельствует о локальном присутствии ультраосновного источника сноса. Магматические образования архей-раннепротерозойского возраста с подобными геохимическими характеристиками на территории ВКМ не выявлены. Контрастный (кислый и основной-ультраосновной) состав источников сноса подтверждается различием дифференциации РЗЭ (см. рис. 2) в известковистых и низкокальциевых метатерригенных породах толщи. В известковистых породах с увеличением кремнезема сумма РЗЭ падает, в низкокальциевых, наоборот, увеличивается.

Установленные геохимические характеристики отвечают седиментации исходных осадков в морских глубоководных обстановках в условиях холодного климата. Об этом же, как было отмечено выше, свидетельствуют петрохимические особенности пород и данные гранулометрического анализа [24].

Сравнение метатерригенных пород стрелицкой толщи лосевской серии с воронцовской серией, примыкающей с востока, и донской ассоциацией обоянской серии, примыкающей с запада, показало

их контрастное различие (см. рис. 2, 3), для последних выразившееся большей степенью зрелости, более молодым возрастом источников сноса, существенно кисло-среднем составом источников сноса и отношением их к континентальной коре. Это значит, что лосевская серия может иметь с близкосодейственной донской ассоциацией только тектонический контакт, что нашло свое отражение в материалах М.В. Минца и др. [25].

Заключение

Основные выводы, которые позволяют сформулировать результаты исследований метатерригенных пород стрелицкой толщи (второй тип разреза) сводятся к следующему:

- Различие вещественного (реликтового) компонента и петрогеохимического состава позволяет выделить две группы: метатерригенные породы грауваккового (известковистые метапелиты) и Na-Ca-аркозового типа (метапелиты).
- Для метатерригенных образований (второй тип разреза стрелицкой толщи) источником сноса служили архейские породы, а генетическая связь с вулканогенными породами толщи отсутствует, в связи с чем их следует объединять в самостоятельную метатерригенную формацию, которая древнее вулканических метабазальт-плагиоориолитовой формации. Следствие – перевод стрелицкой толщи в ранг серии и расчленение ее на нижнюю метатерригенную и верхнюю метавулканогенную толщи.
- В терригенном разрезе толщи выделены три пачки: нижняя, образованная за счет разрушения гранитоидов тоналит-трондьемитовой серии; сред-

няя, образованная за счет разрушения основных±ультраосновных пород; и верхняя, образованная за счет рециклинга нижних пачек.

• Источники сноса для терригенных пород соответствуют коре океанического типа, их предполагаемый возраст – архей. В противовес этому, донская ассоциация и воронцовская серия образованы за счет источников континентального детрита. Аналогов источникам сноса метатерригенных пород стрелицкой толщи в современной легенде ВКМ не установлено.

• Палеобассейн стрелицкого времени формировался в условиях холодного климата при минимальном выветривании терригенного источника. Осадконакопление носило лавинный характер в условиях узкой динамично развивающейся глубоководной котловины.

• Градационная слоистость, увеличение униформности и правильности ритмов, тонкозернистость обломочного материала, генеральный «трансгрессивный» тип разреза, пространственная связь с метавулканитами контрастной metabазальт-плагиориолитовой формации позволяют сопоставлять Стрелицкий палеобассейн с современными окраинными морями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лиханов И. И. Геохимические свидетельства природы протолита железисто-глиноземистых метапелитов Кузнецкого Алатау и Енисейского кряжа / И. И. Лиханов, В. В. Ревердатто, А. Е. Вершинин // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 119–131.
2. Asiedu D. K. Geochemistry of Lower Cretaceous sediments, Inner Zone of Southwest Japan: Constraints on provenance and tectonic environment / D.K. Asiedu [et al.] // Geochemical Journal. – 2000. – V. 34. – P. 155–173.
3. Bhatia M. R. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins / M. R. Bhatia, K. A. W. Crook // Contrib. Mineral. Petrol. – 1986. – V. 92. – P. 181–193.
4. Floyd P. A. Tectonic environment of the Devonian mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones / P. A. Floyd and B. E. Leveridge // J. Geol. Soc. London. – 1987. – V. 144. – P. 531–542.
5. McLennan S. M. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments / S. M. McLennan [et al.] // Geology Society of America Special Paper. – 1993. – № 284. – P. 21–40.
6. Plank T. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle / T. Plank, C. H. Langmuir // Chem. Geol. – 1998. – V. 145. – P. 325–394.
7. Slack J. F. Paleozoic sedimentary rocks in the Red Dog Zn-Pb-Ag district and vicinity, western Brooks Range Alaska: provenance, deposition, and metallogenic significance / J. F. Slack [et al.] // Econ. Geol. – 2004. – V. 99. – P. 1385–1414.
8. Щипанский А. А. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое / А. А. Щипанский [и др.] // Геотектоника. – 2007. – № 1. – С. 43–70.
9. Савко К. А. Метатерригенные породы воронцовской серии Воронежского кристаллического массива: геохимия, особенности формирования и источники сноса / К. А. Савко, А. В. Самсонов, Н. С. Базиков // Вестник Воронеж. ун-та. Серия: Геология. – 2011. – № 1. – С. 98–115.
10. Harnois L. The CIW index; a new chemical index of weathering / L. Harnois // Sediment Geol. – 1988. – V. 55. – P. 319–322.
11. Nesbitt H. W. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations / H. W. Nesbitt, G. M. Young // J. Geol. – 1982. – V. 48. – P. 1523–1534.
12. Cox R. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States / R. Cox, D. R. Lowe, R. L. Cullers // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1995. – V. 59. – P. 2919–2940.
13. Тейлор С. П. Континентальная кора: ее состав и эволюция / С. П. Тейлор, С. М. Мак-Леннан. – М.: Мир, 1988. – 379 с.
14. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data / M. M. Herron // Journal of Sedimentary Petrology. – 1988. – V. 58. – P. 820–829.
15. Pettijohn F. J. Sand and Sandstone / F. J. Pettijohn, P. E. Potter, R. Siever. – Springer-Verlag; New York, 1987. – 553 p.
16. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea / Y. I. Lee // Sedimentary Geology. – 2002. – V. 149. – P. 219–235.
17. Sun S.-S. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes / S.-S. Sun and W.F. McDonough // J. Geol. Soc. London, Special Publications. – 1989. – V. 42. – P. 313–345.
18. Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales / K. C. Condie // Chem. Geol. – 1993. – V. 104. – P. 1–37.
19. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов / Ю. А. Балашов. – М.: Наука, 1976. – 268 с.
20. Murray R. W. Rare earths elements as indicator of different marine depositional environments in chert and shale / R. W. Murray [et al.] // Geology. – 1990. – V. 18. – P. 268–272.
21. Taylor S. R. The geochemical evolution of the continental crust / S. R. Taylor, S. M. McLennan // Rev. Geophys. – 1995. – V. 33. – P. 241–265.

22. *Armstrong-Altrin J. S.* Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings / *J. S. Armstrong-Altrin, S. P. Verma* // *Sediment. Geol.* – 2005. – V. 177. – P. 115–129.

23. *Bhatia M. K.* Plate Tectonics and Geochemical Compositions of Sandstones / *M. K. Bhatia* // *J. Geol.* – 1983. – V. 91, № 6. – P. 611–627.

24. *Терентьев Р. А.* Геохимия и стратиграфия пород метатерригенного разреза стрелицкой толщи лосевской серии Воронежского кристаллического массива. Статья

И: Вещественный состав и стратиграфия / *Р. А. Терентьев* // *Вест. Воронеж. ун-та. Серия: Геология.* – 2012. – № 2. – С. 119–127.

25. *Миц М. В.* Объемная модель глубинного строения Рязанско-Саратовского и Восточно-Воронежского коллизионных орогенов (восточная часть Воронежского кристаллического массива, Восточно-Европейская платформа): профиль 1-ЕВ, 2450–3500 км / *М. В. Миц [и др.]* // *Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования.* – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – С. 120–125.

Воронежский государственный университет

Р. А. Терентьев, директор учебно-научно-производственного центра «Поисковая геохимия», кандидат геолого-минералогических наук

Тел. 8 (473) 222-73-63

terentiev@geol.vsu.ru

Voronezh State University

R. A. Terentiev, The Director of the Educational-and-Research-and-Production Center “Search Geochemistry”, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

Tel. 8 (473) 222-73-63

terentiev@geol.vsu.ru