

УДК 551.71:551.72:550.93(470.55/.57)

Ал.В. Тевелев<sup>1</sup>, В.М. Мосейчук<sup>2</sup>, Арк.В. Тевелев<sup>3</sup>, Б.Б. Шкурский<sup>4</sup>

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ВОЗРАСТА ЦИРКОНОВ В МЕТАМОРФИТАХ ТАРАТАШСКОГО БЛОКА ЮЖНОГО УРАЛА (ИСХОДНЫЙ ПРОВЕНАНС-СИГНАЛ)

Обоснована и реализована идея разработки исходного провенанс-сигнала Тараташского блока Южного Урала по изотопным датировкам цирконов из магматических и метаморфических пород архея и раннего протерозоя. Учтены 132 датировки, для которых дискордантность не превышала 10%. Получена диаграмма плотности вероятности возраста цирконов, которая использована, во-первых, для сравнения с плотностью вероятности возраста детритных цирконов из песчаников нижнерифейской айской свиты, а во-вторых, — с плотностью вероятности возраста цирконов метаморфических пород Александровского блока, расположенного восточнее. Сходство распределений проверено с помощью теста Колмогорова–Смирнова.

*Ключевые слова:* Южный Урал, Тараташский блок, провенанс-сигнал, изотопный возраст, детритные цирконы.

The article establishes and realizes an idea of definition of the initial provenance signal for the Southern Urals Taratash block using isotope dating of the zircons in the Archean and Early Proterozoic magmatic and metamorphic rocks. The work takes into account 132 data for which the discordance did not exceed 10%. We obtained a probability density diagram for zircon ages, which we used firstly for comparison with detrital zircons ages from the sandstones of lower riphean Ay suite, and secondly, with density of the zircon ages in the metamorphic rocks of the Aleksandrovsy block located to the east. The similarity of distributions was verified by means of the Kolmogorov-Smirnov test.

*Key words:* Southern Urals, Taratash block, provenance signal, isotope age, detrital zircons.

**Введение.** В последние 10–15 лет резко возрос интерес к изучению возраста детритных цирконов из терригенных комплексов в различных регионах, в том числе на Южном Урале [Орлов и др., 2011; Кузнецов и др., 2012, 2013; Романюк и др., 2017]. Задача таких исследований состоит не только и даже не столько в получении информации о возрасте и генезисе материнских пород, сколько в обосновании палеотектонических реконструкций, основанных на определении областей сноса, существовавших при формировании этих комплексов. При этом предполагается, что для различных регионов существуют эталонные наборы значений возраста цирконов, которые связаны с наиболее типичными и широко распространенными магматическими и метаморфическими комплексами этих регионов, и отвечают разным этапам их развития (*исходные провенанс-сигналы*). Чем шире распространены в регионе-источнике комплексы пород, тем больше цирконов из них накапливается в терригенных породах области накопления. Задача идентификации усложняется тем, что в области на-

копления могут быть смешаны цирконы из разных областей размыта.

Количество датированных детритных цирконов в пробе терригенных пород обычно исчисляется сотнями, а для значений их возраста строится гистограмма (диаграмма плотности вероятности), которую нужно сравнить с гистограммой, отражающей исходный провенанс-сигнал. Однако, как правило, для эталонных регионов существует только общий набор значений возраста магматических и метаморфических комплексов, которые должны были поставлять цирконы в изучаемые терригенные комплексы, а исходные диаграммы плотности вероятности отсутствуют. Поэтому пики на гистограммах возраста детритных цирконов проверяются на соответствие уровням возраста эталонных комплексов. Такая ситуация обеспечивает только качественную интерпретацию результатов исследования, но не позволяет обработать их математически.

Чтобы сравнивать диаграммы плотности вероятности для различных терригенных ком-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* atevelev@rambler.ru

<sup>2</sup> ООО НТПП ГЕОПОИСК, ген. директор; *e-mail:* geopoisk2004@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* arctevelev@rambler.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* shkurskybb@ya.ru



Рис. 1. Схема расположения Тараташского блока

плексов принято применять критерий Колмогорова—Смирнова, основанный на оценке разницы между максимальными значениями двух функций распределения. Однако этот критерий, строго говоря, применим только для сравнения непрерывных последовательностей случайно распределенных величин, к которым распределение возраста детритных цирконов в пробах не относится в принципе, поскольку возраст родительских пород чаще всего сильно различается. Этим объясняются часто встречаемые на гистограммах лакуны с нулевыми значениями.

**Постановка задачи и фактический материал.** В качестве одного из возможных материнских районов для рифейских и более молодых терригенных комплексов Южного Урала обычно указывается Тараташский выступ (блок) восточного края фундамента Восточно-Европейской платформы (рис. 1), который применительно к задачам палеотектонических реконструкций иногда называют Тараташским орогеном [Романюк и др., 2017]. Интерес к Тараташскому блоку во многом вызван не только тем, что он представляет собой самый восточный известный выход фундамента Восточно-Европейской платформы, но и тем, что в последние годы накоплен большой фактический материал о изотопном возрасте слагающих его архейско-раннепротерозойских метаморфических пород, в том числе U—Pb изотопном возрасте цирконов [Краснобаев, Чередниченко, 2005; Краснобаев и др., 2011; Ронкин и др., 2012; Пыстин, Пыстина, 2015; Тевелев и др., 2015].

Тараташский комплекс сложен двупироксеновыми кристаллическими сланцами, амфиболитами по этим сланцам, гиперстеновыми плагиогнейсами (эндербитами) с телами метаультрамафитов, а также мигматитами, биотитовыми гнейсами с

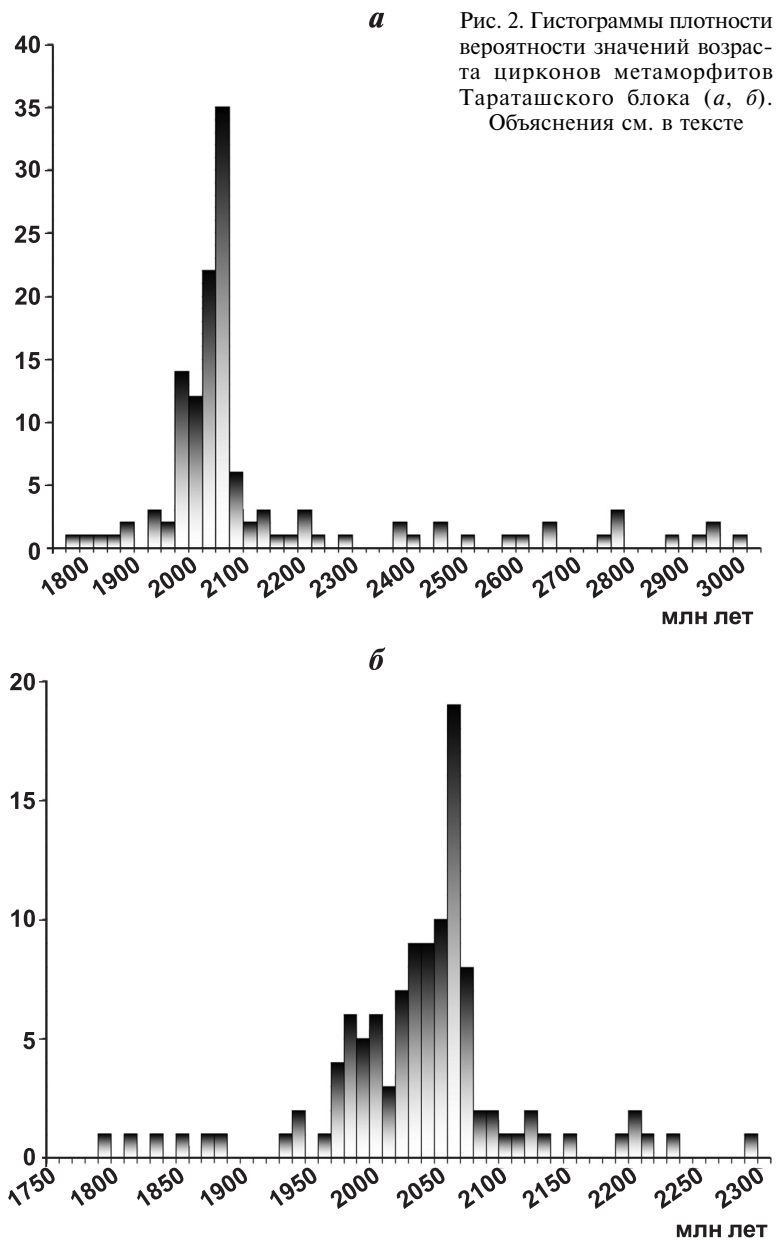


Рис. 2. Гистограммы плотности вероятности значений возраста цирконов метаморфитов Тараташского блока (а, б). Объяснения см. в тексте

гранатом, силлиманитом, кордиеритом и графитом, с прослоями кварцитов, графитистых и магнетитовых кварцитов. Со стратифицированными образованиями тараташского комплекса ассоциированы разнообразные метаплутонические породы от метагабброидов до металейкогранитов. Все породы метаморфизованы в гранулитовой фации и испытали по крайней мере две стадии диафтореза [Ленных, Петров, 1974].

Задача исследования состояла в том, чтобы разработать *исходный провенанс-сигнал* Тараташского блока, учитывая все известные на сегодняшний день изотопные датировки цирконов, а кроме того, определить структуру этого провенанс-сигнала в отношении разнообразных комплексов, участвующих в его формировании. Все U—Pb изотопные датировки тараташских цирконов можно разделить на четыре группы, различающиеся по возрасту и принадлежности цирконов к исходным породам: 1) цирконы из стратифицированных образова-

Значения U-Pb изотопного возраста цирконов метаморфитов Тараташского блока

Номер п/п	Возраст, млн лет	$\pm 1\sigma$	<i>D</i>	Номер п/п	Возраст, млн лет	$\pm 1\sigma$	<i>D</i>	Номер п/п	Возраст, млн лет	$\pm 1\sigma$	<i>D</i>	Номер п/п	Возраст, млн лет	$\pm 1\sigma$	<i>D</i>	Номер п/п	Возраст, млн лет	$\pm 1\sigma$	<i>D</i>
1	1991	11	3	28	2062	18	0	55	1995	28	1	82	2971	15	3	109	2037	29	0
2	2034	13	1	29	2042	17	1	56	1998	29	1	83	1878	15	7	110	2106	19	-3
3	1966	11	4	30	2038	24	0	57	2007	25	2	84	2061	15	-1	111	2080	20	-2
4	1982	13	3	31	1944	23	-4	58	2022	25	1	85	2062	26	0	112	2077	19	-1
5	1988	10	3	32	2014	26	1	59	2022	25	1	86	2061	23	0	113	2151	21	-6
6	2006	14	2	33	2022	24	0	60	2038	26	-1	87	2064	13	0	114	2131	22	-3
7	1985	13	4	34	2027	27	1	61	2043	25	0	88	2059	30	0	115	2090	33	-4
8	2051	13	0	35	2030	25	2	62	2043	26	0	89	2064	11	0	116	2037	28	2
9	1988	11	3	36	2038	25	0	63	2051	25	-2	90	2053	19	0	117	2113	23	-6
10	1979	13	3	37	2043	27	1	64	2053	27	0	91	2090	29	-1	118	2094	15	-2
11	1974	16	4	38	2063	26	0	65	2014	11	1	92	2052	24	1	119	2128	23	-4
12	1990	11	3	39	2068	27	-1	66	2034	8	0	93	2064	23	0	120	2220	28	-7
13	2011	13	2	40	2069	24	-5	67	2050	10	0	94	2126	43	-2	121	2384	18	-2
14	2009	11	1	41	2069	25	-1	68	2063	9	-1	95	2193	12	0	122	2463	15	-2
15	2061	17	-1	42	2070	28	-2	69	2069	11	-1	96	2292	19	-1	123	2502	21	3
16	1978	11	4	43	1798	22	8	70	2074	11	-1	97	2420	14	0	124	2589	23	3
17	2074	15	-2	44	1814	22	7	71	2047	8	0	98	2661	14	2	125	2657	20	5
18	2034	12	1	45	1835	25	6	72	2070	8	0	99	2796	20	0	126	2794	27	7
19	1980	13	4	46	1942	23	4	73	2051	10	1	100	2789	21	0	127	1853	7	9
20	2008	15	3	47	1996	24	2	74	2062	9	0	101	2603	24		128	1883	1	8
21	2072	14	0	48	2004	24	1	75	2056	9	1	102	2207	21		129	1933	1	5
22	2063	12	0	49	2036	25	1	76	2461	10	8	103	2396	24		130	1993	1	2
23	2046	14	0	50	2049	26	0	77	2948	13	0	104	2201	22		131	2235	1	5
24	2030	20	0	51	2050	25	0	78	2955	13	0	105	2099	21		132	1859	22	1
25	2073	14	-1	52	2056	26	0	79	2892	18	3	106	1989	19	1				
26	2071	16	0	53	2065	24	0	80	2774	14	8	107	2004	14	0				
27	2048	15	1	54	2069	25	-1	81	3019	23	0	108	2030	16	0				

Примечания:  $\pm 1\sigma$  — ошибка определения; *D* — дискордантность.

ний (пара- и ортометаморфитов); 2) цирконы из плутонических образований (ортометаморфитов); 3) цирконы из мигматитов (преимущественно из лейкосомы); 4) цирконы из бластомилонитов, претерпевших эпидот-амфиболитовый и зелено-сланцевый диафорез.

Для расчета исходного провенанс-сигнала использованы как собственные данные, так и материалы, приведенные в работах [Краснобаев, Чердниченко, 2005; Краснобаев и др., 2011а; Ронкин и др., 2012]. Эти данные сведены в таблицу.

Поскольку математически обоснованного числа классов при построении диаграммы плотности вероятности не существует (правило Стерджеса и правило квадратного корня годятся только для нормально распределенных величин), мы выбрали два варианта построения гистограмм. В первом

варианте объем классов выбран равным 25 млн лет (общая гистограмма для всех значений), а во втором — 10 млн лет (локальная гистограмма для наиболее характерной области значений). Мы исключили из расчетов значения, для которых дискордантность была выше [10].

На общей гистограмме (рис. 2,а) выделяются две области. Первая область включает раннепротерозойские значения от 1750 до 2300 млн лет и характеризуется практически непрерывным распределением, близким к нормальному, что хорошо видно на локальной гистограмме (рис. 2,б). Однако это распределение имеет очень высокий для нормального распределения положительный эксцесс (+2,98) и отрицательную асимметрию (-0,18). Среднее арифметическое для этого диапазона составляет 2040 млн лет, а мода — 2069 млн

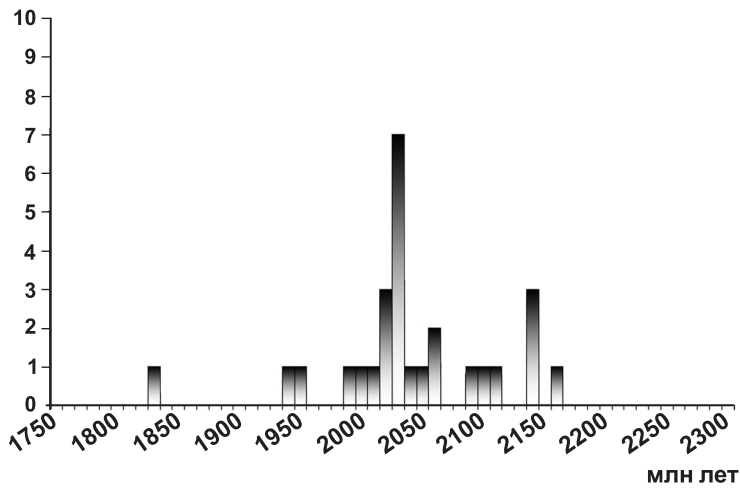


Рис. 3. Гистограмма плотности вероятности значений возраста детритных цирконов из айской свиты

лет. Единичные значения, расположенные на рис. 2 в левой части гистограммы (интервал от 1790 до 1890 млн лет), отвечают определениям с дискордантностью  $>5$ , характеризуют измененные цирконы и, строго говоря, их можно не принимать в расчет. Основной же пик на гистограмме, занимающий интервал почти в 200 млн лет (от 1960 до 2140 млн лет), отвечает гранитоидам тараташского комплекса и мигматитам. Цирконы в мигматитах, как правило, имеют древние (архейские) ядра и молодые (2040–2070 млн лет) каймы обрастания. В цирконах лейкосомы древние ядра обычно отсутствуют.

Вторая область на общей гистограмме включает значения от 3100 до 2300 млн лет (поздний архей–начало раннего протерозоя) и состоит из отдельных пиков, содержащих одно-два значения (до трех) и разделенных пробелами в 25–75 млн лет. Соответствующие этим пикам цирконы обычно считают цирконами протолита. Они встречаются по большей части в тараташских параметаморфитах.

**Применение исходного провенанс-сигнала для решения задач корреляции.** Набор данных, приведенных в таблице, и рассчитанные по ним диаграммы плотности вероятности можно считать

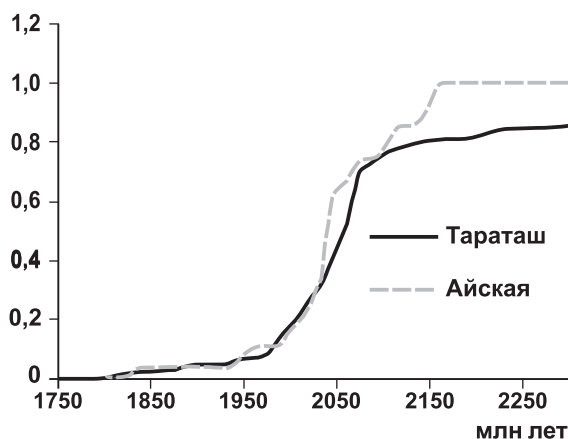


Рис. 4. Кумулятивные диаграммы возраста цирконов из Тараташского комплекса и айской свиты

исходным провенанс-сигналом для Тараташского выступа фундамента Восточно-Европейской платформы. Используя эти данные, можно количественно оценить степень сходства в распределении детритных цирконов и материнских цирконов в области размыва. Важная особенность исходного провенанс-сигнала состоит в том, что при появлении новых данных о материнских цирконах его можно легко дополнить.

В качестве примера мы рассчитали степень сходства исходного провенанс-сигнала и распределения значений возраста детритных цирконов в пробе, взятой из песчаников айской свиты нижнего рифея [Тевелев и др., 2015]. Датировки детритных цирконов (27 определений)

попадают в интервал 1830–2170 млн лет (рис. 3). Степень сходства проверяли с помощью теста Колмогорова–Смирнова. На графике кумулятивных кривых (рис. 4) видно, что обе кривые практически совпадают до уровня 2030 млн лет, а далее кривая детритных цирконов становится более крутой и раньше выходит на уровень единицы. Тем не менее величина  $p=0,523$  означает, что сравниваемые распределения относятся к одной популяции с вероятностью  $>95\%$ , т.е. песчаники айской свиты, вероятнее всего, накапливались преимущественно за счет размыва Тараташского блока.

Дополнительной областью применения исходного провенанс-сигнала может быть сравнение распределений значений возраста цирконов в двух областях сноса, т.е. сравнение двух исходных провенанс-сигналов. Такая дополнительная задача состояла в следующем. Южнее Тараташского блока расположена линейная Александровская зона, сложенная интенсивно тектонизированными пара- и ортоморфитами разного генезиса. Возраст этих пород спорный. В настоящее время большинство исследователей склонны считать их аналогами тараташских. Для расчета исходного провенанс-сигнала Александровской зоны мы использовали и собственные материалы, и данные, приведенные в работах [Пыстин, Пыстина, 2015; Краснобаев и др., 2011б; Ронкин и др., 2012; Sindern et al., 2005]. К сожалению, большая часть известных к настоящему времени значений возраста цирконов имеет дискордантность больше  $|10|$ , поэтому остается только 20 приемлемых определений. Вместе с тем кумулятивные кривые возраста цирконов (рис. 5) для этих районов различаются только в интервале 1800–1950 млн лет, а вычисленная величина  $p=0,715$  означает, что сравниваемые распределения относятся к одной популяции с вероятностью  $>95\%$ , т.е., скорее всего, породы Тараташского блока и Александровской зоны имеют одинаковый или очень близкий возраст.

**Выводы.** 1. Применение исходного провенанс-сигнала позволяет относительно корректно оценивать выводы о палеогеографической связи источников терригенного материала и областей его накопления. Кроме того, расчет исходных провенанс-сигналов позволяет математически оценивать степень сходства или различия в строении разобнесенных ныне регионов.

2. Поскольку применение критерия Колмогорова–Смирнова для оценки сходства полимодальных и не непрерывных распределений не совсем корректно, в дальнейшем следует искать методы оценки, более строгие с математической точки зрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Краснобаев А.А., Чередниченко Н.В. Цирконовый архей Урала // Докл. РАН. 2005. Т. 400, № 4. С. 510–514.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н. и др. Цирконология железистых кварцитов тараташского комплекса на Южном Урале // Докл. РАН. 2011а. Т. 437, № 6. С. 80–807.

Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Бушарина С.В. и др. Цирконология израндитов (Южный Урал) // Докл. РАН. 2011б. Т. 439, № 3. С. 394–398.

Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Шаццло А.В. и др. Первые результаты массового U/Pb-изотопного датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из ашинской серии Южного Урала: палеогеографический и палеотектонический аспекты // Докл. РАН. 2012. Т. 447, № 1. С. 73–79.

Ленных В.И., Петров В.И. Гранулитовый метаморфизм и этапы диафореза пород тараташского комплекса // Тез. докл. 3-го Уральского петрографического совещ. Т. 1. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 1974. С. 18–22.

Орлов С.Ю., Кузнецов Н.Б., Миллер Е.Л. и др. Возрастные ограничения протоуральско-тиманской орогении по детритным цирконам // Докл. РАН. 2012. Т. 440, № 1. С. 87–92.

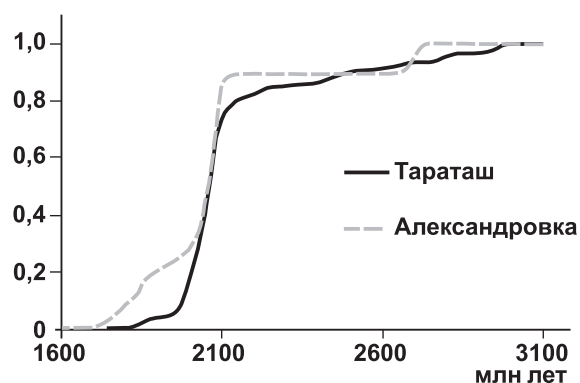


Рис. 5. Кумулятивные диаграммы возраста цирконов из метаморфитов Тараташского и Александровского блоков

Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Архейско-палеопротерозойская история метаморфизма пород Уральского сегмента земной коры // Тр. КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 3–18.

Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А. и др. Стратотип рифея (Башкирское поднятие, Южный Урал): сопоставление U/Pb-возрастов детритных цирконов из песчаников бурзянской, юматинской и каратауской серий // Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Т. 2: Мат-лы XLIX Тектон. совещ., посвященного 100-летию академика Ю.М. Пушаровского. М.: ГЕОС, 2017. С. 158–162.

Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Лепихина О.П. Изотопная геология древнейших образований Южного Урала // Литосфера. 2012. № 5. С. 50–76.

Тевелев Ал.В., Кошелева И.А., Тевелев Арк.В. и др. Новые данные об изотопном возрасте тараташского и александровского метаморфических комплексов (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 1. С. 27–42.

Sindern S., Hetzel R., Schulte B.A. et al. Proterozoic magmatic and tectonometamorphic evolution of the Taratash complex, Central Urals, Russia // Intern. J. Earth Sci. 2005. Vol. 94. P. 319–335.

Поступила в редакцию  
20.03.2017