

УДК 550 (552.3)

С.Г. Ковалев<sup>1</sup>, В.И. Сначев<sup>2</sup>, М.А. Романовская<sup>3</sup>**ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ<sup>4</sup>**

Приведены материалы о геологии и геохимической специализации рифейских терригенных пород Башкирского мегантиклинория, в том числе углеродистых сланцев и конгломератов. В последних установлено высокое содержание золота и элементов группы платины, приуроченное преимущественно к интенсивно дислоцированным зонам. Сделан вывод о том, что потенциально рудоносные зоны в терригенных отложениях Башкирского мегантиклинория сформировались в результате многоэтапных полигенных процессов, обусловленных геодинамическим развитием региона в рифее–венде.

*Ключевые слова:* Башкирский мегантиклинорий, углеродсодержащие отложения, конгломераты, геохимическая специализация, элементы платиновой группы, самородное золото.

The paper presents materials on geology and geochemical specialization Riphean clastic rocks of Bashkirian meganticlinorium, including carbonaceous shales and conglomerates. In the last set high content of gold and platinum group elements, confined mainly to heavily dislocated zones. The conclusion is that the potentially ore-bearing zones in clastic sediments of the Bashkir meganticlinorium is a result of polygenic multistep processes, caused geodynamic development of the region in the Riphean-Vendian time.

*Key words:* Bashkir meganticlinorium, carbonaceous deposits, conglomerates, geochemical specialization, platinum group elements, native gold.

**Введение.** В последние десятилетия в разных регионах мира были открыты месторождения благородных металлов неизвестных ранее типов в углеродсодержащих осадочно-метаморфических комплексах. Эти месторождения в настоящее время относятся к одному из самых перспективных типов месторождений золота и платиноидов. Они имеют широкое географическое распространение и приурочены к различным возрастным уровням — от протерозоя до раннего мезозоя [Дистлер и др., 1996; Додин и др., 2000]. Выявленные месторождения отличаются по масштабности оруденения, морфологии рудных тел, интенсивности гидротермально-метасоматической проработки вмещающих пород и как следствие по концентрации полезных компонентов. Кроме того, значительный интерес во всем мире по-прежнему вызывают грубообломочные породы (конгломераты) в связи с более чем 100-летней эксплуатацией комплексного платино-золото-уранового месторождения Витватерсранд, которое обеспечивает от 25 до 50% добываемого в мире золота.

В пределах Башкирского мегантиклинория углеродсодержащие отложения широко распространены. В виде горизонтов переменной мощности они установлены в бурзянской (Rf<sub>1</sub>) и

юрматинской (Rf<sub>2</sub>) сериях — в составе большеинзерской, суранской и юшинской свит нижнего рифея и практически во всех свитах среднего рифея. Но особый интерес как с практической, так и с точки зрения изучения рудообразующих процессов представляют углеродсодержащие породы, приуроченные к тектоническим зонам и пронизанные магматическими телами основного состава. Грубообломочные породы также присутствуют на нескольких стратиграфических уровнях (Rf<sub>1</sub>, Rf<sub>2</sub>, V), но наиболее перспективны, по нашему мнению, конгломераты, входящие в состав машакской свиты (Rf<sub>2</sub>) и обнажающиеся на хр. Большой Шатак. Ниже приводятся результаты изучения этих пород на комплексное благороднометалльное оруденение (таблица).

**Методика исследований.** Содержание Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, REE, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U, а также благородных металлов (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Au) определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) (аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудрявцев; пределы обнаружения благородных металлов — 0,002 г/т). Кроме того, определение Pt, Pd и Au

<sup>1</sup> ФГБУН Институт геологии Уфимского научного центра РАН, зам. директора, доктор геол.-минерал. н.; e-mail: kovalev@ufaras.ru

<sup>2</sup> ФГБУН Институт геологии Уфимского научного центра РАН, зав. лабораторией, доктор геол.-минерал. н., профессор; e-mail: Savant@inbox.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, канд. геол.-минерал. н., доцент; e-mail: maria-roman@mail.ru

<sup>4</sup> Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 16-17-10192).

## Репрезентативное содержание благородных металлов в терригенных породах Башкирского мегантиклинория (ppb)

Номер п/п	Название породы	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	Pt/Pd	Au/(Pt+Pd)	Номер п/п	Название породы	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	Pt/Pd	Au/(Pt+Pd)
1	жильный кварц	<2	<2	48	2,6	6,9	<2	0,14		30	метасоматит	<2	<2	22	2,6	8,4	9,9	0,38	0,32
2	сланец	<2	2,3	<2	<2	<2	<2		0,19	31	сланец	<2	<2	7,6	<2	2,8	5,2	0,36	0,5
3	- "-	<2	<2	11	<2	<2	2,1			32	гравелит	<2	<2	5,9	<2	2,9	3,5	0,49	0,39
4	- "-	<2	<2	2,2	<2	<2	<2		0,11	33	конгломерат	<2	<2	11	<2	<2	2,1		
5	- "-	<2	3,1	23	2,4	4,2	3,2	0,18		34	песчаник	<2	<2	17	<2	6,5	8	0,38	0,34
6	- "-	<2	2,4	<2	<2	2,1	4			35	- "-	<2	<2	6,3	<2	4	2,9	0,63	0,28
7	- "-	<2	<2	<2	<2	<2	4,6			36	- "-	<2	<2	5,6	<2	2,2	<2	0,39	
8	жильный кварц	<2	<2	16	<2	6,7	4,8	0,42	0,21	37	гравелит	<2	<2	<2	<2	3,3	2,4		
9	черный сланец	<2	<2	7,7	<2	5,1	6,8	0,66	0,53	38	песчаник	<2	<2	<2	<2	3,6	4,5		
10	- "-	<2	<2	6,4	<2	5,9	8,2	0,92	0,67	39	алевролит	<2	<2	16	<2	13	9,3	0,81	0,32
11	- "-	<2	<2	13	<2	2,8	<2	0,21		40	песчаник	<2	<2	2,5	<2	3	<2	1,2	
12	- "-	<2	<2	12	<2	3,8	21	0,31	1,32	41	- "-	<2	<2	2,7	<2	2,8	2,2	1,03	0,4
13	- "-	<2	<2	22	<2	20	6,3	0,91	0,15	42	- "-	<2	<2	10	<2	6,8	9	0,68	0,53
14	- "-	<2	<2	7,1	<2	4,3	5,6	0,60	0,49	43	конгломерат	<2	<2	3,6	<2	4,2	<2	1,16	
15	- "-	<2	<2	3,2	<2	2,7	2	0,84	0,33	44	- "-	<2	<2	3,4	<2	2,8	<2	0,82	
16	- "-	<2	<2	17	<2	2,5	3,1	0,14	0,15	45	песчаник	<2	4,8	<2	2,8	7,1	3,2		
17	- "-	<2	<2	9,4	<2	4,2	3	0,44	0,22	46	- "-	<2	5,7	3,4	<2	14	4,6	4,11	0,26
18	сланец	<2	<2	9,7	<2	3,1	<2	0,31		47	- "-	<2	6,9	37	<2	20	20	0,54	0,35
19	- "-	<2	<2	8,1	<2	2,9	3	0,35	0,27	48	- "-	2,9	9,2	36	4,2	12	7,9	0,33	0,16
20	черный сланец	<2	<2	19	<2	3,7	15	0,19	0,66	49	- "-	<2	7,6	<2	<2	5,9	<2		
21	сланец	<2	<2	18	<2	4	<2	0,22		50	- "-	<2	7,6	76	3	41	21	0,54	0,18
22	- "-	<2	<2	9	<2	<2	<2			51	сланец	<2	6,6	3,2	<2	4,4	<2	1,37	
23	- "-	<2	<2	5,2	<2	3,5	3	0,67	0,34	52	конгломерат	<2	7,1	<2	<2	<2	2,9		
24	- "-	<2	<2	25	<2	11	6,8	0,44	0,19	53	- "-	<2	7,6	3,2	<2	<2	9,4		
25	- "-	<2	8,8	22	<2	9,8	16	0,44	0,50	54	- "-	<2	3,6	<2	<2	3,7	<2		
26	алевросланец	<2	2	48	2,2	23	6,1	0,47	0,08	55	- "-	<2	4,1	3,1	<2	<2	<2		
27	- "-	<2	<2	<2	<2	3,9	4,8			56	- "-	<2	<2	3,5	2,1	4	<2	1,14	
28	- "-	<2	<2	<2	<2	2,9	8,7			57	- "-	<2	7,5	10	<2	9,2	5,1	0,92	0,26
29	- "-	<2	<2	<2	<2	4,3	3,8												

Примечания. № 1–7 — Интуратовский разрез; № 8–31 — Улуелгинско-Кудашмановская зона; № 32–57 — Шатакский комплекс. Содержание элементов платиновой группы (ЭПГ) и Au определены методом ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ (аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудрявцев); пределы обнаружения ЭПГ и Au — 2 ppb.

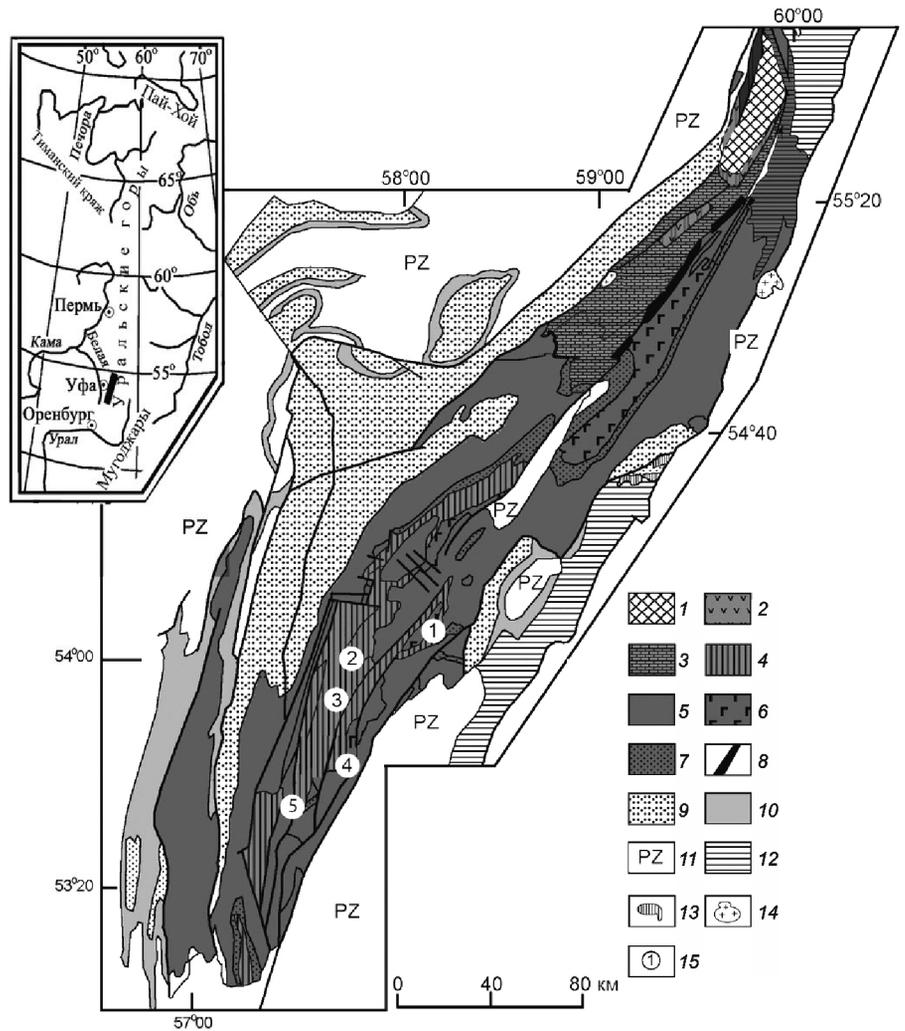
выполнено атомно-абсорбционным методом в ОАО «Иригиредмет» по методике МА ИАЦ-65-2004. Составы минералов анализировались на растровом электронном микроскопе РЭММ-202М в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс, аналитик В.А. Котляров).

**Геологическое строение и минералогия перспективных зон.** Улуелгинско-Кудашмановская зона приурочена к Юрюзано-Зюраткульскому разлому (рис. 1) и сложена породами среднерифейского возраста. Терригенные отложения представлены серицит-кварцевыми алевролитами и углеродсодержащими сланцами. Магматические породы образуют вулcano-плутоническую ассоциацию, включающую пластовые тела интрузивных габбродолеритов и эффузивов основного состава с небольшим количеством пирокластического материала. Ранее здесь была выявлена Au-Ag-U-Th-REE минерализация, приуроченная к сложнодислоцированным черносланцевым горизонтам [Ковалев, 2004a]. В результате детального изуче-

ния обнаружены многочисленные новообразованные минералы: сульфиды (пирит, пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит); самородные элементы (Au, Sn, Pb, Ag); соединения, близкие к фурутобеиту ((Cu, Ag)<sub>6</sub>PbS<sub>4</sub>); промежуточные нестехиометричные соединения ряда халькопирит (CuFeS<sub>2</sub>)–енаит (AgFeS<sub>2</sub>); соединения ряда (Ag, Fe)<sub>n</sub>(S, Se)<sub>m</sub>–(Ag, Fe)<sub>n</sub>(S, Te)<sub>m</sub>, а также уранинит, коффинит, ураноцирцит, торит урановый, монацит и неидентифицированные редкоземельные фазы. Самородное Au установлено в пробе-протолочке из будинированной кварцевой жилы. Золото высокопробное, микронзондовым методом в нем обнаружены Cu (0,21–0,41 масс.%) и Ag (4,58–6,50 масс.%).

Суран-Ишлинская площадь расположена на левобережье р. Бол. Инзер в зоне Караташского и Зюраткульского региональных разломов (рис. 1), где распространены углеродсодержащие сланцы, алевролиты и карбонатные породы суранской свиты (Rf<sub>1</sub>). Прожилково-вкрапленное карбонат-

Рис. 1. Геологическая схема Башкирского мегантиклинория и местоположения изученных разрезов терригенных пород: 1 — тараташский метаморфический комплекс; 2 — айская свита ( $Rf_1$ ); 3 — саткинская и бакальская свиты нерасчлененные ( $Rf_1$ ); 4 — большеинзерская, суранская и юшинская свиты нерасчлененные ( $Rf_1$ ); 5 — терригенные отложения нерасчлененные ( $Rf_2$ ); 6 — вулканогенно-осадочные отложения нерасчлененные ( $Rf_2$ ); 7 — зигальгинская свита ( $Rf_2$ ); 8 — Кусинско-Копанский комплекс ( $Rf_2$ ); 9 — верхнерифейские отложения нерасчлененные; 10 — вендские отложения; 11 — палеозойские отложения; 12 — метаморфические комплексы; 13 — ультраосновные породы; 14 — гранитоиды; 15 — изученные разрезы и комплексы (1 — Улуелгинско-Кудашмановский, 2 — Интуратовский, 3 — Суран-Ишлинский, 4 — Узянско-Кагармановский, 5 — Шатакский)



кварц-сульфидное оруденение развито в зонах дробления и морфологически представлено линейной минерализованной зоной, вытянутой в северо-восточном направлении. Пробуренные скважины вскрыли глинистую кору выветривания по углеродистым кварц-серицит-хлоритовым сланцам, долеритам и карбонатным породам, мощность которой варьирует от 53,6 до 325,0 м. По результатам химико-спектрального анализа содержание Au в породах изменяется от 0,5 до >2,0 г/т, а в единичных пробах (методом ICP MS) составляет 3,05; 5,31 и 27,29 г/т. В коре выветривания обнаружены самородное Au и аурикуприд ( $Cu_3Au$ ).

*Интуратовская зона* расположена в 3,5 км южнее пос. Ишля в полосе развития отложений суранской свиты ( $Rf_1$ ), которые представлены переслаиванием темно-серых и черных углеродсодержащих сланцев с серыми доломитами и доломитизированными алевропесчаниками (рис. 1). Здесь же присутствуют кварцевые жилы мощностью до 1–21,5 м, в которых содержится 2,2–2,4 г/т Au и 2,7–3,0 г/т Ag, а в пробах-протолочках выявлено 20 знаков мелкого (от 0,225×0,075 до 0,125×0,075 мм) золота неправильно-комковатой и уплощенно-изометричной формы с неровной ноздреватой поверхностью.

*Узянско-Кагармановская зона* находится в восточной части Башкирского мегантиклинория, в полосе развития пород авзянской ( $Rf_2$ ) и зигазинокомаровской ( $Rf_2$ ) свит, вблизи контакта докембрийского разреза Башкирского мегантиклинория с палеозойским обрамлением (рис. 1). Породы здесь представлены переслаиванием глинистых сланцев, мелкозернистых кварцитопесчаников и углеродсодержащих сланцев. В химическом составе последних установлено 1,0–3,2 г/т золота и 0,4–0,8 г/т серебра при повышенном количестве платиноидов (Pt 20–270, Pd 10–140, Ru 5–70, Rh 1–5 мг/т) [Рыкус и др., 2000].

*Машакский комплекс (свита)* представляет собой естественную ассоциацию стратифицированных вулканогенно-осадочных образований, пород жерловой, субвулканической и дайковой фаций. Стратифицированные образования комплекса слагают моноклираль на юго-восточном крыле Ямантауского антиклинория, осложненную дизъюнктивными нарушениями и мелкой складчатостью. Южнее возрастным аналогом машакских отложений считаются вулканогенно-осадочные образования шатакского комплекса (свиты), которые с угловым несогласием перекрывают юшинскую свиту нижнего рифея и постепенно сменяются

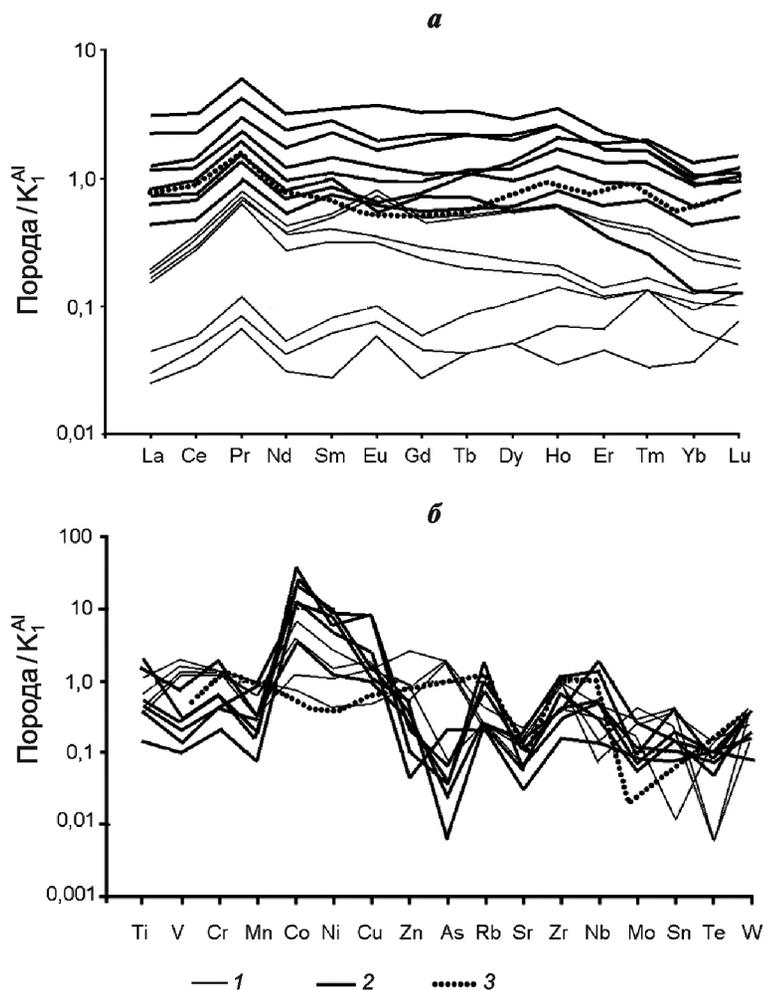


Рис. 2. Нормализованные содержания РЗЭ (а) и спайдер-диаграмма (б) для черносланцевых отложений: 1 — черные сланцы, 2 — сульфидизированные черные сланцы, 3 — терригенные породы зигазино-комаровской свиты, по [Маслов и др., 2008]. Нормализовано по средним составам терригенных и вулканогенных разновидностей черных сланцев, по [Юдович, Кетрис, 1988]

зигальгинскими кварцитами. Среди слагающих шатакский комплекс пород выделяются стратифицированная вулканогенно-осадочная ассоциация, а также образования субвулканической и дайковой фаций [Ковалев, Высоцкий, 2004]. Осадочные породы слагают около 25–45% объема комплекса и представлены преимущественно грубозернистыми разностями — конгломератами и песчаниками, реже алевролитами, сланцами и известняками. Конгломераты развиты на нескольких стратиграфических уровнях. Они присутствуют в основании разреза (кузьелгинская подсвита) и в его центральной части (каранская подсвита).

В монофракциях гематита, отобранных из цемента конгломератов нижней толщи кузьелгинской подсвиты, атомно-абсорбционным методом установлено до 10,77 г/т золота и 1,12 г/т серебра, а в валовых пробах содержание Au достигает 1,8 г/т; Ag — 1,4; Pt — 1,25; Pd — 0,35 г/т, при массовой доле железа 8,22% [Ковалев, Высоцкий, 2008]. В верхней толще выделяется до трех горизонтов валунно-галечных конгломератов суммарной

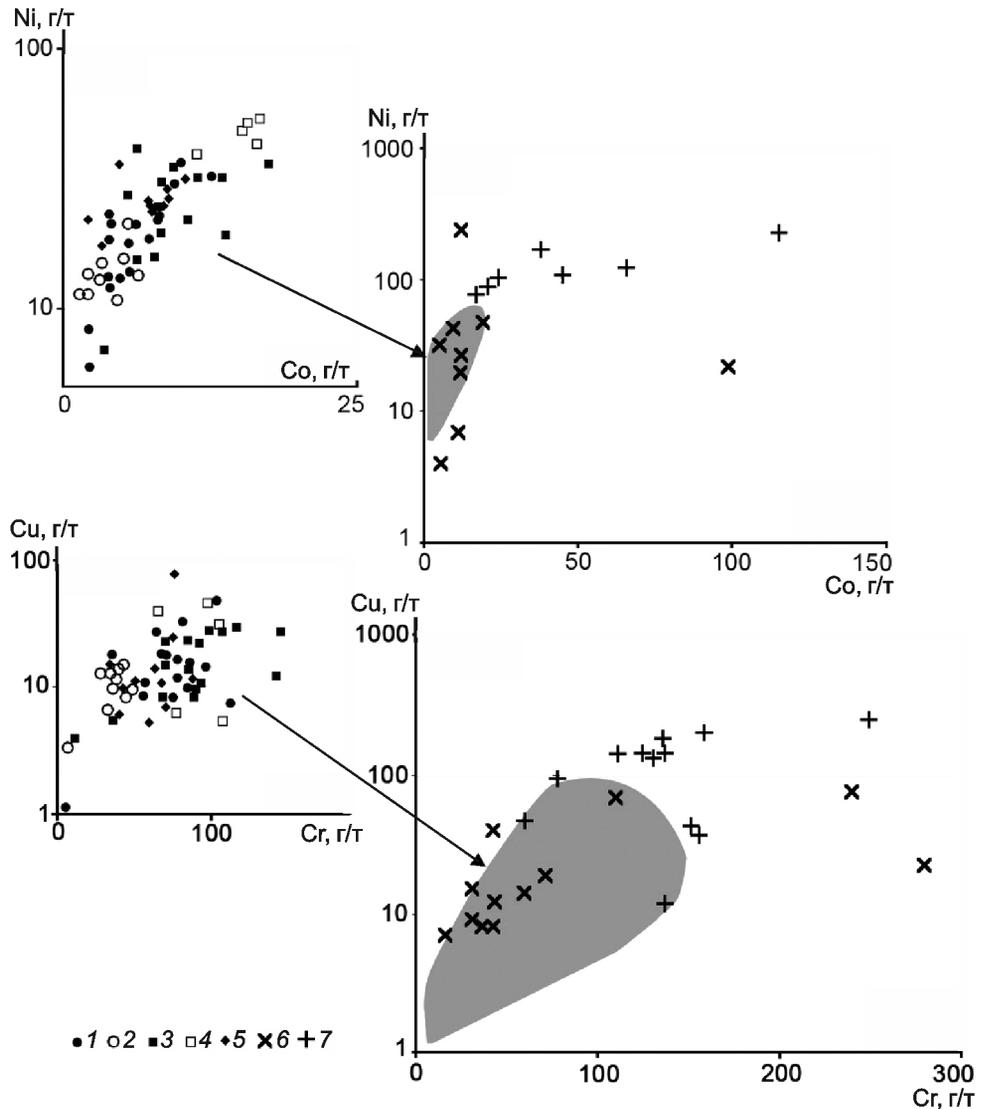
мощностью около 50 м в переслаивании с потоками базальтов и пластовыми телами долеритов, перекрытых в верхней части разреза риолитами. Рудная минерализация, приуроченная как к цементу, так и к галькам, представлена идиоморфными кристаллами магнетита размером 0,5–2 мм, в монофракции которого содержание золота составляет 4,9, а серебра 0,2 г/т. В валовых пробах концентрация благородных металлов составляет (г/т): Pt до 1,75; Pd до 0,30; Au до 2,15; Ag до 5,25 г/т, массовая доля железа 6,54% [Ковалев, Высоцкий, 2008]. Кроме железозоксидной минерализации в конгломератах выявлены самородные золото и серебро, нигглиит ( $\text{PtSn}_3$ ), гессит ( $\text{TeAg}_2$ ), пирит ( $\text{FeS}_2$ ), халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ), борнит ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), сфалерит ( $\text{Zn,FeS}$ ), халькозин ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), бетехтинит ( $\text{Cu}_{21}\text{Pb}_2\text{S}_{15}$ ), пентландит ( $\text{Fe,Ni}_9\text{S}_8$ ), а также соединения селена с мышьяком и теллура с железом.

**Геохимическая специализация терригенных комплексов.** Геохимическая специализация рассматриваемых терригенных пород Башкирского мегантиклинория во многом определяется их геологическим положением, а именно приуроченностью к зонам тектонических нарушений и пространственной ассоциацией с магматическими породами. Так, в частности, содержание и распределение РЗЭ, а также элементов, важных для понимания процессов рудогенеза, показано на примере черносланцевых отложений Улуелгинско-Кудашмановской зоны (рис. 2). Изучение проводилось для двух типов пород: неизмененных черных сланцев и их сульфидизированных разновидностей.

Количество сульфидов в последних составляло около 50–60% от общего объема пробы. Из анализа построенных диаграмм видно, что нормализованное содержание редкоземельных элементов (рис. 2, а) в породах различается на 1–2 порядка. Повышенное количество РЗЭ в сульфидизированных сланцах свидетельствует о том, что эти элементы были подвижны при рудообразовании, накапливаясь в породах с сульфидной минерализацией, где входили в состав монацита и неидентифицированных редкоземельных фаз. Кроме того, сульфидизированные сланцы обогащены Co, Ni и Cu — элементами, типоморфными для магматических пород основного состава (рис. 2, б), что может свидетельствовать о генетической связи минерализации черносланцевых толщ с ассоциирующимися магматическими породами.

Особенно отчетливо это видно из сопоставления углеродсодержащих сланцев Улуелгинско-Кудашмановской зоны с терригенными отложениями зигазино-комаровской свиты ( $\text{Rf}_2$ ), в составе

Рис. 3. Диаграммы Ni–Co и Cu–Cr для терригенных пород нижнего и среднего рифея из стратотипических разрезов Башкирского мегантиклинория [Маслов и др., 2008] и одновозрастных им образований из тектонических зон: 1–5 — терригенные породы из стратотипических разрезов (1 — большеинзерская свита (Rf<sub>1</sub>), 2 — суранская свита (Rf<sub>1</sub>), 3 — юшинская свита (Rf<sub>1</sub>), 4 — машакская свита (Rf<sub>2</sub>), 5 — зигазино-комаровская свита (Rf<sub>2</sub>)); 6 — углеродистые глинистые и карбонатно-глинистые сланцы, суранская свита, Интуратовская зона; 7 — углеродсодержащие сланцы, машакская свита, Улуелгинско-Кудашмановская зона



которой черносланцевые отложения присутствуют в значительном количестве (до 70% от общего объема свиты) [Маслов, 1988], но какая-либо их связь с магматическими породами отсутствует. Отметим, что в отдельных пробах черных сланцев с сульфидной минерализацией установлено ураганное содержание свинца (65,4 кг/т), серебра (1,7 кг/т) и вольфрама (103–190 г/т), что не учитывалось при геохимическом анализе, но в то же время аномальное количество Pb и Ag было подтверждено находками собственных минеральных фаз этих элементов.

Обогащенность рудогенными элементами (Co, Ni, Cr и Cu) по сравнению с породами из стратотипических разрезов характерна практически для всех изученных разрезов и площадей. Из распределения фигуративных точек на диаграммах Co–Ni и Cr–Cu (рис. 3) видно, что осадочные породы стратотипа нижнего и среднего рифея и аналогичные им по возрасту образования из тектонических зон существенно различаются. Если первые образуют относительно компактные поля со слабо выраженными вариациями содержания Co, Ni, Cr и Cu без четкой привязки максимальных и минималь-

ных значений их концентрации к определенным стратиграфическим уровням, то для измененных пород из зон тектонических нарушений разброс минимальных и максимальных значений достигает двух порядков, что свидетельствует о привносе Co, Ni, Cr, Cu извне и/или перераспределении их в процессе метаморфизма.

Для характеристики благороднометалльной геохимической специализации терригенных отложений Башкирского мегантиклинория изучена распространенность платиноидов и золота в породах нижнего и среднего рифея из стратотипических разрезов для определения «фоновых» значений содержания благородных металлов в толщах, не подвергшихся воздействию флюидно-магматических систем и процессов метаморфизма [Ковалев и др., 2014]. Полученные результаты сводятся к следующему:

— для «неизмененных» ниже- и среднерифейских терригенных пород характерна четко выраженная палладиевая геохимическая специализация (рис. 4). По отношению к содержанию Pd в континентальной коре, по [Wedepohl, 1995], его количество в сланцах различных уровней нижнего

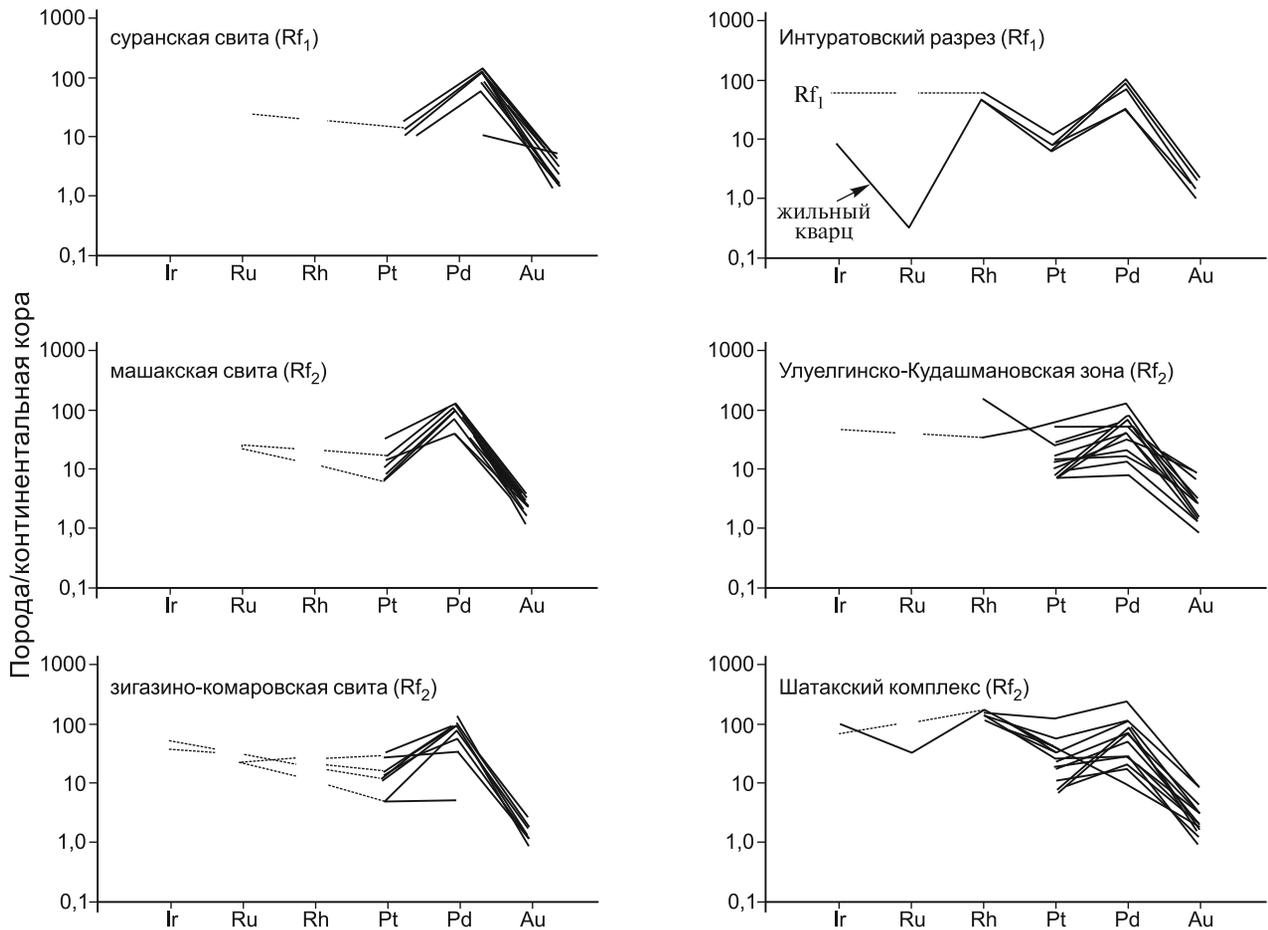


Рис. 4. Нормализованное содержание благородных металлов в терригенных отложениях Башкирского мегантиклинория, континентальная кора, по [Wedepohl, 1995]

и среднего рифея весьма стабильно и составляет в среднем 40–100 (для Pt этот параметр составляет 2–13, для Ru 2–25, для Ir 6–25);

– нормализованное содержание Au в этих «неизменных» терригенных породах, напротив, близко к коровому и варьирует в пределах 0,63–2,46;

– отличительная черта «фоновых» значений содержания ЭПГ в породах нижнего и среднего рифея — отсутствие Rh, значимое количество которого не установлено ни в одном из 116 проанализированных образцов.

Данные о содержании ЭПГ и Au в рифейских отложениях из стратотипических разрезов сопоставлены с концентрацией этих элементов в породах Интуратовской, Улуелгинско-Кудашмановской зон и Шатакского комплекса. В результате выявлены значительные различия в распределении ЭПГ и Au между «неизменными» образованиями и их метаморфизованными аналогами. Так, для низкоуглеродистых глинистых и карбонатно-глинистых сланцев Интуратовской зоны характерна Pd–Rh специализация, а параметр Pt/Pd на порядок выше, чем в «неизменных» породах этого же стратиграфического уровня. Нормированное же содержание Ir в разных породах этой зоны значительно различается. На перераспределение ЭПГ в процессе

метаморфизма отчетливо указывает и повышенное содержание Pt, Pd и Ir в кварцевых жилах, секущих сланцы Интуратовской зоны (рис. 4). Для пород Улуелгинско-Кудашмановской зоны характерна Pt–Rh–Pd-специализация (рис. 4), при этом отношение Pt/Pd изменяется от 0,14 до 0,91, а Au/(Pt+Pd) — от 0,11 до 1,32, что свидетельствует о значительной подвижности платины, палладия и золота в процессе минералообразования.

Определенное своеобразие в распределении нормированного на континентальную кору содержания Au и ЭПГ установлено и для терригенных пород Шатакского комплекса. Для них характерна Pd–Pt–Rh- и Pt–Pd–Rh-специализация при величине Pt/Pd от 0,33 до 4,11. Смена типа благороднометалльной специализации терригенных пород с Pt–Pd на Pd–Pt хорошо коррелирует с материалами, полученными при изучении рудоносности докембрийских конгломератов Шатакского комплекса, в которых выявлена Os–Pd–Pt-специализация пород при значении Pt/Pd, равном приблизительно 4 [Ковалев, Высоцкий, 2004].

Специфика благороднометалльной специализации терригенных пород из тектонических зон и стратотипических разрезов выявляется при сравнительном анализе значений отношений Pt/Pd и Au/(Pt+Pd), изображенных на рис. 5. Как видно

из анализа этих диаграмм, породы стратотипа и тектонических зон образуют два относительно четко выраженных локальных поля, а изменение специализации в ряду породы стратотипа → породы тектонических зон направлено в сторону увеличения количества золота и платины.

Определенный интерес представляет сравнительный анализ величин Pt/Pd и Au/(Pt+Pd) в терригенных и магматических породах Башкирского мегантиклинория (рис. 5). Как видно на диаграмме, поле магматических пород в целом аналогично полю терригенных, причем наблюдается слабо проявленная тенденция к увеличению количества золота и платины от древних пород к более молодым.

**Обсуждение результатов.** Приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что процессы формирования геохимической специализации терригенных пород Башкирского мегантиклинория обусловлены многими причинами, зависящими от геодинамического развития территории. В обобщенном виде в истории Южного Урала можно выделить несколько этапов, каждый из которых характеризовался специфическим режимом развития и как следствие влиял на перераспределение благородных металлов.

*Первый этап (рифтогенный).* Начало формирования благороднометалльной специализации терригенных пород было синхронно образованию в раннем рифее интракратонного прогиба с компенсированным осадконакоплением терригенных отложений [Маслов, 1988] и связано с внедрением мелких рассредоточенных базитовых и базит-гипербазитовых интрузий в зоны конседиментационных разломов. Проявление магматизма на обширной территории преимущественно в интрузивной форме, а также повышенная основность пород (пикриты, пикродолеритовые комплексы, дайки меланократовых габбро-долеритов) свидетельствуют о его плюмовой природе [Пучков, Ковалев, 2013], эволюционным развитием которого, на наш взгляд, и определялось во многом геодинамическое развитие региона.

Собственно рифтогенный этап знаменовался переходом от рассредоточенного типа растяжения литосферы к линейно сконцентрированному, что в пределах западного склона Южного Урала выразилось в формировании серии грабенообразных структур с максимальным развитием интрузивного магматизма и вулканизма при большом разнообразии продуктов его деятельности — интрузий, эффузивных и пирокластических фаций [Ковалев, 2004б]. Процессы дифференциации в промежуточных очагах и, возможно, контаминация в их верхних частях привели к образованию магм, различающихся как по основности (пикриты, базальты, риолиты), так и по геохимическим характеристикам (обогащенность рудогенными элементами — Ti, V, Ni, Co, Cu, Cr, а также Au,

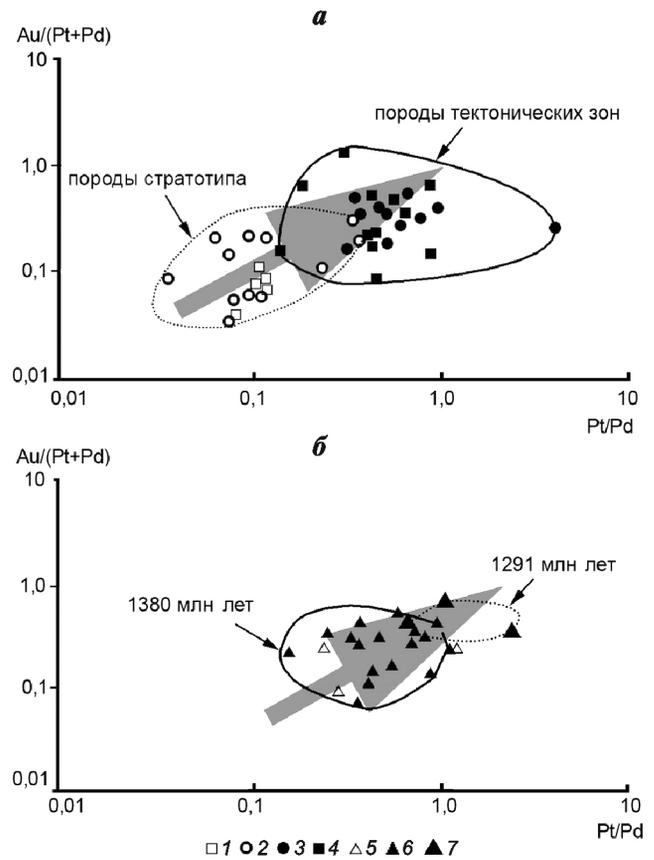


Рис. 5. Диаграмма Pt/Pd–Au/(Pt+Pd) для терригенных (а) и магматических (б) пород Башкирского мегантиклинория: 1–2 — отложения стратотипических разрезов (1 — суранская свита (Rf<sub>1</sub>); 2 — машакская свита (Rf<sub>2</sub>)); 3 — шатакский комплекс; 4 — Улуелгинско-Кудашмановская зона; 5 — шуйдинский комплекс (Rf<sub>1</sub>); 6 — шатакский комплекс (Rf<sub>2</sub>); 7 — ишлинский комплекс (Rf<sub>2</sub>). Возраст магматических пород шатакского комплекса — по [Пучков и др., 2007], ишлинских пикритов — по [Сазонова и др., 2011]

Pt и Pd по сравнению с мантийным субстратом). При этом формировавшиеся осадки и осадочные породы верхних горизонтов коры были пронизаны потоками глубинных флюидов углеводородно-водородного состава, существование которых на крыльях срединно-океанических хребтов и, что важно для нашего случая, на активизированных континентальных склонах доказано прямыми измерениями флюидопроявлений [Авилов, Авилова, 2003]. В исследованных породах воздействие глубинных флюидов реконструируется по благороднометалльной специализации терригенных отложений, чередующихся с магматическими образованиями, которые имели аналогичную специализацию. Таким образом, флюидная проработка осадочного субстрата при рифтогенезе, а также сорбирующая способность черносланцевых отложений привели к формированию геохимических аномалий рудогенных элементов, включая Au и платиноиды.

*Второй этап (коллизийный) метаморфогенно-гидротермальный.* В соответствии с современными представлениями о геодинамическом развитии

региона в поздневендское время территория Южного Урала развивалась в режиме сжатия [Пучков, 2000]. На этом этапе физико-химические условия формирования геохимической специализации пород определялись функционированием флюидно-гидротермальной системы, которая образовалась при смене рифтогенного магматизма процессами водного корового палингенеза и регионального метаморфизма. В частности, для конгломератов шатакского комплекса процессы перераспределения вещества в обобщенном виде можно охарактеризовать следующей моделью. В растворах, отделившихся от магматических очагов и характеризующихся повышенной щелочностью и низкими значениями окислительно-восстановительного потенциала, железо присутствовало, вероятнее всего, в виде карбонильных или цианидных комплексов. При достижении зоны, в которой в силу снижения давления и температуры, повышения Eh и кислотности нарушились условия равновесия, произошло разложение комплексов железа, что выразилось в активном осаждении из постмагматических растворов магнетита и гематита с параллельным обогащением рудной зоны углекислотой и углеводородами.

По данным А.Ф. Коробейникова и Н.Н. Перцева [1998], магнетит и гематит — минералы-концентраторы благородных металлов в скарновом гидротермальном процессе, поэтому разложение карбонильных и/или цианидных комплексов приводит к формированию ассоциации оксидов железа и благородных металлов. А.А. Маракушевым и М.И. Безменом [1971] было показано, что возрастание положительной свободной энергии реакций типа  $MeO_2 + S_2 = MeS_2 + O_2$  с повышением температуры свидетельствует о все большем смещении равновесия реакций влево, в сторону образования оксидов, что соответствует эмпирически выявленной закономерности, согласно которой смена окисного оруденения сульфидным на рудных месторождениях происходит с понижением температуры. Смена силикатных парагенезисов сульфидными также соответствует общей тенденции к снижению температуры. Расчеты равновесных соотношений между магнетитом и сульфидами железа в системах с участием ионов  $HS^-$  и  $OH^-$  позволили установить, что при темпе-

ратуре выше 400 °С магнетит более устойчив, чем сульфиды железа. Снижение температуры системы ниже 400 °С уже предопределяет появление в системе парагенезиса пирита с пирротинном вместо магнетита.

Следовательно, при повышенной температуре возрастание активности кислорода, выражающееся в увеличении сродства металлов к кислороду, предопределяет устойчивость минералов — оксидов и силикатов железа. Золото и платина в этих условиях проявляют свои сидерофильные свойства, что и обуславливает совместную миграцию благородных металлов и железа, концентрация которых в высокотемпературных щелочных восстановленных растворах может быть достаточна велика. Палладий, в отличие от платины, — типичный халькофильный элемент, поэтому он не характерен для рассматриваемой ассоциации, о чем свидетельствуют высокие значения Pt/Pd отношения, в среднем равного 4 в магнетит-гематитовых конгломератах. На основе приведенных выше материалов можно предположить, что формирование золото-платино-железооксидной ассоциации в конгломератах шатакского комплекса происходило из щелочных восстановленных растворов при температуре не ниже 400 °С, а последующее сульфидообразование усложнило картину распределения золота и платиноидов.

Аналогичные, но не тождественные процессы реализовывались и в черносланцевых отложениях, подвергшихся тектонической и флюидно-магматической проработке. Сформировавшиеся флюидно-гидротермальные системы, физико-химические параметры функционирования которых в значительной степени определялись локальными характеристиками зон их проявления, воздействовали на субстрат, что приводило к перераспределению вещества. формированию своеобразной геохимической специализации пород и образованию комплексных типов минерализации.

**Заключение.** Таким образом, масштабность процессов рудообразования и распространенность зон, охарактеризованных выше, позволяет предполагать наличие в пределах Башкирского мегантиклинория не типичного для региона оруденения с промышленно значимыми значениями концентрации полезных компонентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авилов В.И., Авилова С.Д. Потоки газов в придонной зоне глубоководной части океана // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 4. С. 519–523.

Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Форма нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38, № 6. С. 46–484.

Додин Д.А., Чернышев Н.М., Яцкевич Б.А. Платинометальные месторождения России. СПб.: Наука, 2000. 755 с.

Ковалев С.Г. Слождислоцированные углеродсодержащие породы западного склона Южного Урала // Докл. РАН. 2004а. Т. 396, № 4. С. 511–514.

Ковалев С.Г. Динамика формирования средне-рифтовой рифтогенной структуры (западный склон Южного Урала) // Докл. РАН. 2004б. Т. 396, № 2. С. 219–222.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новый тип оруденения в докембрийских конгломератах западного склона Южного Урала // Докл. РАН. 2004. Т. 395, № 4. С. 503–506.

*Ковалев С.Г., Высоцкий И.В.* Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 3. С. 280–289.

*Ковалев, С.Г., Гареев Э.З., Маслов А.В.* Первые данные о благороднометалльной специализации терригенных пород нижнего и среднего рифея Южного Урала // Изв. вузов. Геология и разведка. 2014. № 4. С. 33–37.

*Коробейников А.Ф., Перцев Н.Н.* Золото, платина и палладий в диабазах Шитового комплекса Костариканской рифтовой зоны в Тихом океане // Докл. РАН. 1998. Т. 359, № 5. С. 663–667.

*Маракушев А.А., Безмен Н.И.* Термодинамика сульфидов и окислов в связи с проблемами рудообразования. М.: Наука, 1971. 229 с.

*Маслов А.В.* Рифейские углеродистые отложения Башкирского мегантиклинория // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 3. С. 101–109.

*Маслов А.В., Ножкин А.Д., Подковыров В.Н.* и др. Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 274 с.

*Пучков В.Н.* Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.

*Пучков В.Н., Ковалев С.Г.* Плюмовые события на Урале и их связь с субглобальными эпохами рифтогенеза // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2013. С. 34–38.

*Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлов В.И.* и др. Предварительные данные о возрастных рубежах нео- и мезопротерозоя в свете новых U-Pb датировок // Геол. сборник Иг УНЦ РАН. № 6. Уфа: ДизайнПоиграфСервис, 2007. С. 3–14.

*Рыкус М.В., Сначев В.И., Сначев А.В.* Золото в дислоцированных углеродистых толщах палеоконтинентального сектора Южного Урала // Геологическая служба и горное дело Башкортостана на рубеже веков. Уфа: Тау, 2000. С. 179–191.

*Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О.* и др. Мезопротерозойские пикриты восточной окраины Восточно-Европейской платформы и Башкирского мегантиклинория: петрогенезис и особенности составов оливина и клинопироксена // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.

*Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 271 с.

*Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 495. P. 1217–1239.

Поступила в редакцию  
01.03.2017