

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БУРЕЙНСКОГО МАССИВА И ИХ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

А.И. Ханчук, В.Г. Невструев*, Н.В. Бердников*, В.П. Нечаев

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
690022, Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159, Россия

* Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия

На примере кимканской и сутырской толщ Буреинского массива (юг Дальнего Востока России) рассматриваются некоторые геологические, петрохимические и геохимические характеристики углеродистых сланцев как нового нетрадиционного природного источника золота и платиноидов. Показано, что сланцы изученных толщ соответствуют породам терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формаций. В качестве основной питающей провинции для их образования предполагается активная континентальная окраина, а условия накопления соответствуют глубоководным желобам.

Углеродистые терригенно-осадочные толщи и формирующиеся в них благороднометалльные руды имеют определенные петрохимические характеристики, различные для комплексов с преимущественно платиноидной и золоторудной минерализацией. Согласно этим характеристикам, перспективными для поисков объектов с высокими концентрациями платиноидов являются углеродистые комплексы с повышенной железистостью, пониженным значением суммы щелочных металлов при высоком отношении калия к натрию. Для золоторудных объектов типичны черносланцевые толщи с высокой общей щелочностью и относительно низким K/Na отношением. С этой точки зрения сланцы и железистые руды кимканской толщи отчетливо идентифицируются с рудными объектами повышенной платиноносности, а породы сутырской толщи тяготеют к золоторудным месторождениям в черных сланцах.

Предполагается, что платинOMETалльная минерализация генетически связана с процессами формирования и преобразования углеродистых пород. В то же время основное количество золота в углеродистых сланцах присутствует в самородном виде, его связь с углеродом не просматривается, уступая место ассоциациям с наложенными процессами сульфидизации и окварцевания.

Углеродистые сланцы, геодинамические условия образования, благороднометалльная специализация.

PETROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF CARBONACEOUS SHALES IN THE EASTERN BUREYA MASSIF AND THEIR PRECIOUS-METAL MINERALIZATION

A.I. Khanchuk, V.G. Nevstruev, N.V. Berdnikov, and V.P. Nechaev

Some geological, petrochemical, and geochemical characteristics of carbonaceous shales as a new unconventional natural source of gold and PGE are considered by the example of the Kimkan and Sutyry units of the Bureya massif (southern Far East, Russia). It is shown that shales of the units belong to the terrigenous-carbonaceous and siliceous-carbonaceous formations. They accumulated in deep-water trenches, and the active continental margin was probably their main provenance. The carbonaceous terrigenous units and precious-metal ores in them show specific petrochemical characteristics different for complexes with predominantly PGE and gold mineralization. According to these characteristics, carbonaceous complexes with high Fe contents, low total contents of alkalis, and high K/Na ratios are promising for PGE-rich ores. Gold ores are usually localized in black-shale strata with high total contents of alkalis and low K/Na. In this respect, the shales and Fe-ores of the Kimkan unit obviously contain high-PGE mineralization, while the rocks of the Sutyry unit can bear gold deposits. We assume that the PGE mineralization is genetically related to the formation and transformation of carbonaceous rocks. At the same time, most of gold in the carbonaceous shales is native and is not related to carbon; it is present in mineral assemblages resulted from superimposed sulfidization and silicification.

Carbonaceous shales, geodynamic setting, noble-metal specialization

ВВЕДЕНИЕ

Проблема благороднометалльного (золото, платиноиды) потенциала углеродистых терригенно-осадочных толщ (черных сланцев) последние десятилетия интенсивно обсуждается геологами. Судя по всему, эти породы являются наиболее вероятными нетрадиционными природными источниками золота и платиноидов в будущем. Вместе с тем данные по содержаниям благородных металлов в них противо-

речивы, формы их нахождения в породе и природа минерализации изучены недостаточно, что существенно сдерживает оценку рудного потенциала углеродистых сланцев и создание технологии их переработки.

В данном исследовании под углеродистыми сланцами понимаются терригенно-осадочные породы, формировавшиеся в различных обстановках седиментогенеза (мелководных морей платформ, пассивных континентальных окраин, глубоководных желобов и морей активных континентальных окраин, границ скольжения континентальных и океанических плит и т.д.) и характеризующиеся повышенным содержанием твердого углеродистого вещества, что придает им темный цвет. Как правило, они претерпели региональный метаморфизм зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой вплоть до низов амфиболитовой фаций, что обусловило присутствие в них разных форм углерода — от бесструктурных тонкодисперсных образований до графита.

Углеродистые терригенно-осадочные комплексы с повышенными концентрациями металлов платиновой группы, золота и серебра известны в различных частях мира. Ревизионные работы на ряде локализованных в них месторождений выявили присутствие сопутствующих благородных металлов в концентрациях, достаточных для промышленного извлечения. К ним относятся урановые месторождения Северной Австралии, никель-молибденовые месторождения Южного Китая, медные месторождения Польши, золоторудные месторождения России, Казахстана, Узбекистана, Бразилии, железорудные месторождения России и Бразилии и ряд других [Буряк и др., 1988; Винокуров, Омеляненко, 1990; Мирзеханов, Мирзеханова, 1991; Чернышев, 1999; Sener et al., 2002; Парада, 2004; Pieczonka et al., 2008; Развозжаева и др., 2008; Manikyamba et al., 2008; Оболенский и др., 2011; Шарапов и др., 2012]. Вместе с тем природа благороднометалльного оруденения в углеродистых толщах до конца не выяснена. Хотя месторождения и проявления благородных металлов часто связаны с ними, далеко не любые углеродистые толщи содержат промышленные или даже повышенные их концентрации. В настоящее время большинство известных случаев оруденения в черных сланцах связано с формированием кварц-сульфидных жил. Так, для крупного месторождения Наталка (Северо-Восток России) установлено, что платина и палладий находятся в сульфидах [Плюснина и др., 2003]. К такому же золото-сульфидному типу относятся месторождения Сухой Лог, Олимпиада в России, Мурунтау в Узбекистане, Кумтор в Киргизии, локализованные в рассланцованных алевролитах и аргиллитах с повышенным содержанием углерода. Однако высокие содержания благородных металлов нередко обнаруживаются и в углеродистых сланцах без признаков кварц-сульфидной минерализации [Гурская, 2000]. Это позволило исследователям предположить возможность формирования в них благороднометалльной минерализации особого типа [Ханчук и др., 2009а].

Повышенные концентрации благородных металлов в терригенно-осадочных толщах возникают как интегральный результат геологических событий: седиментационных и постседиментационных диагенетических процессов, метаморфических и метасоматических преобразований пород с образованием рудных тел. Все эти геологические события отражаются на минералого-геохимических и петрохимических свойствах пород и формирующихся в них рудоносных объектов [Митрофанов и др., 2005]. В результате одинаково металлогенетически специализированные толщи, месторождения и проявления должны иметь сходные характеристики. Поиск последних, свидетельствующих о возможном благороднометалльном потенциале углеродистых комплексов, представляется весьма перспективным. Их учет позволит повысить эффективность обнаружения благороднометалльной минерализации при геологическом картировании и поисковых работах.

Нами предпринята попытка выявления таких характеристик на материале ряда месторождений мира и углеродистых пород сутырской и кимканской толщ на востоке Буреинского массива, в которых обнаружены повышенные концентрации золота и платиноидов [Ханчук и др., 2009б]. Рассчитаны петрохимические модули, проведена фациальная типизация изученных толщ, установлена общая возрастная характеристика вмещающей их земной коры, оценены геодинамические условия формирования слагающих их отложений, выявлены различия источников их образования и геохимическая специализация в отношении благородных металлов.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Согласно современным представлениям о тектоническом строении южной части Дальневосточного региона России, Буреинский массив (террейн) наряду с Цзямусинским является частью раннепалеозойского орогенного пояса [Ханчук, 2000; Парфенов и др., 2003; Геодинамика..., 2006] (рис. 1). Массив преимущественно сложен метаморфическими породами от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций метаморфизма. В слабоизмененных породах известна раннекембрийская фауна. Высокометаморфизованные породы Буреинского массива долгое время считались архейскими и нижнепротерозойскими [Ре-

ми, песчаниками, алевролитами. В разрезе кимканской толщи распространены рассланцованные песчаники, алевролиты, углеродистые глинистые сланцы, местами превращенные в графитистые филлиты. Слюдяно-кварцевые сланцы, мраморы и кварциты включают пачки высокоуглеродистых ($C_{орг.}$ до 25.7 %) сланцев мощностью до 100 м и протяженностью до 2500 м. Вблизи ордовикских интрузий гранитов рассланцованные породы контактово метаморфизованы с образованием роговиков амфибол- и мусковит-роговиковой фаций.

С породами кимканской толщи связаны железные и железомарганцевые руды, проявления графита, бериллия, редких земель, урана, магнезиального сырья, известно россыпное золото. Имеются данные [Гурская, 2000] о локальном обогащении углеродистых пластов толщи платиной (до 10 г/т) и палладием (до 0.6 г/т).

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

По содержанию углерода изученные сланцы условно разделены на группы (табл. 1): в сутырской толще высокоуглеродистые и филлитовидные, а в кимканской — высокоуглеродистые и углеродистые.

Химические составы типичных углеродистых сланцев сутырской и кимканской толщ представлены в табл. 2, 3.

Таблица 1. Среднее содержание $C_{орг.}$ в сланцах сутырской и кимканской толщ

Толща	Сланцы	Количество проб	$C_{орг.}$ %
Сутырская	Высокоуглеродистые	13	4.42
	Филлитовидные	3	1.27
Кимканская	Высокоуглеродистые	3	1.71
	Углеродистые	9	0.54

Примечание. Анализы выполнены в ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток), аналитики М.Г. Блохин и М.Н. Безроднова.

Таблица 2. Химический состав углеродистых сланцев сутырской и кимканской толщ (мас. %)

Толща	Сланцы	Номер образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ.	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
Сутырская	Высокоуглеродистые	552	83.83	0.52	10.18	1.66	0.02	0.55	0.05	0.39	2.21	0.00	99.41
		562-t	83.52	0.43	10.56	1.46	0.02	0.52	0.04	0.40	2.54	0.00	99.49
		608	76.92	0.60	14.84	3.45	0.02	0.13	0.23	1.61	1.61	0.12	99.53
		613	76.94	0.63	18.35	1.20	0.03	1.06	0.58	1.44	4.02	0.06	104.31
	Филлитовидные	572	60.85	0.90	20.75	6.51	0.08	1.46	0.10	0.24	4.78	0.10	95.77
		574	66.13	0.87	15.15	8.24	0.15	2.18	0.35	0.28	2.87	0.13	96.35
		610	63.53	0.89	22.00	6.71	0.09	1.45	0.11	0.49	5.03	0.07	100.37
Кимканская	Высокоуглеродистые	631	71.52	0.92	18.90	0.68	0.02	1.48	0.05	0.36	5.65	0.00	99.58
		632	72.53	0.84	16.86	2.66	0.02	1.20	0.06	0.38	5.00	0.00	99.55
		633	73.51	0.73	15.58	3.69	0.01	1.14	0.05	0.34	4.47	0.00	99.52
		635	72.10	0.81	17.40	2.41	0.02	1.36	0.05	0.33	5.02	0.00	99.50
		636	78.20	0.63	13.36	2.20	0.01	0.98	0.04	0.32	3.82	0.00	99.56
		637	75.58	1.03	14.39	2.95	0.01	1.05	0.05	0.37	4.09	0.00	99.52
	Углеродистые	КИ-9	67.15	0.86	12.64	8.60	0.09	3.09	0.06	0.27	3.15	0.10	96.01
		511	65.67	0.69	19.93	7.72	0.07	0.35	0.59	0.01	2.66	0.06	97.75
		513	70.64	0.68	16.11	6.44	0.06	0.39	0.13	0.11	2.38	0.05	96.99
		514	59.24	0.94	21.22	6.55	0.08	0.61	0.89	0.10	3.50	0.13	93.26
		515	75.15	0.59	17.77	1.80	0.01	0.45	0.14	0.12	1.42	0.14	97.59

Примечание. Значения суммы приведены с вычетом п.п.п. и микроэлементов. Анализы выполнены методом РФА: 552, 562-t, 608, 610, 613, 631-637, КИ-9 — ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск, аналитик Л.М. Ильин; 572, 574 — СВК-НИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик В.И. Мануилова; 511-515 — НИГИ, г. Хайдерабад, Индия, аналитик В. Баларам (рук.).

Таблица 3. Микроэлементный состав углеродистых сланцев сутырской и кимканской толщ (г/т)

Компонент	Сутырская										Кимканская							
	Высокоуглеродистые сланцы					Филлитовидные сланцы					Углеродистые сланцы							
	552	562-т	608	613	Среднее	563	574	610	Среднее	631	632	633	635	Среднее	511	513	515	Среднее
Sc	14.71	8.52	10.49	12.63	11.59	16.26	13.28	16.49	15.34	15.29	17.75	12.58	17.09	15.68	14.45	15.45	10.31	13.40
Cr	119.03	82.75	166.17	224.25	148.05	64.13	70.07	176.98	103.73	191.45	200.36	158.87	163.92	178.65	91.76	103.00	76.05	90.27
Ni	31.33	3.53	27.04	11.35	18.31	25.16	23.95	41.53	30.21	6.10	11.48	13.38	5.28	9.06	54.51	42.03	92.04	62.86
Zr	155.73	58.98	93.37	131.97	110.01	77.54	67.35	132.02	92.30	163.20	174.62	129.21	158.66	156.42	201.04	199.08	110.08	170.07
La	11.52	20.16	42.12	16.37	22.54	71.69	19.49	51.99	47.72	11.62	12.56	12.36	7.66	11.05	31.76	9.89	71.46	37.70
Ce	21.26	36.43	69.83	38.64	41.54	87.3	38.04	90.44	71.93	27.07	29.38	30.16	17.67	26.07	58.23	18.70	93.69	56.87
Th	19.61	5.37	11.5	6.17	10.66	14.11	13.04	15.8	14.32	9.19	8.49	6.65	18.23	10.64	10.48	9.08	9.13	9.56

Примечание. Анализы выполнены методом ICP-MS в группе геохимических исследований (рук. В. Баларам, НИГИ, г. Хайдерабад, Индия). Пробоподготовка — сплавление с NiS.

ФАЦИАЛЬНАЯ ТИПИЗАЦИЯ

На диаграмме ASC [Горбачев, Созинов, 1985] (рис. 2) сланцы сутырской толщ попадают в поля терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формаций, а сланцы кимканской толщ тяготеют к полю терригенно-углеродистой формации. При этом в обеих толщах составы высокоуглеродистых сланцев смещены в сторону полей кремнистых, а углеродистых — в сторону карбонатных формаций. Значимых корреляционных зависимостей между параметрами A, S, C при уровне значимости 0.95 для рассматриваемых толщ не установлено, что, вероятнее всего, подтверждает некластогенную (биогенную) природу основной массы кремнезема сланцев. Анализ взаимосвязей оксидов петрогенных элементов показал отрицательную или незначимую их корреляцию с SiO₂.

Значимая положительная корреляция установлена между Al₂O₃ и K₂O. Высокоуглеродистые сланцы сутырской толщ в основном характеризуются содержаниями K₂O менее 3 мас. % при содержании Al₂O₃ меньше 15 мас. %, а филлитовидные — более калиевые и глиноземистые (рис. 3). Содержания K₂O в высокоуглеродистых сланцах кимканской толщ, как правило, выше 4 мас. % при глиноземистости более 13 %, а в углеродистых — K₂O ниже 4 мас. % при той же глиноземистости.

По данным [Condie, 1993], верхним горизонтам континентальной коры свойственно закономерное уменьшение концентрации хрома и никеля от древних к более молодым породам. На диаграмме (рис. 4) фигуративные точки состава пород изученных толщ тяготеют к пересечению областей неархейского и постархейского возрастов, что соответствует геологическим данным. При этом углеродистые сланцы обеих толщ располагаются в непосредственной близости от точки состава протерозойских сланцев, по [Condie, 1993], в то время как более насыщенные углеродом разности характеризуются большим содержанием хрома и меньшим — никеля, существенно смещаясь в сторону от тренда средних составов.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

Анализ соотношений Th, La, Sc и Zr [Bhatia, Crook, 1986] показал, что исходными породами для формирования обеих толщ являлись вулканические дуги (рис. 5). Поля их фигуративных точек тяготеют к островодужным комплексам, проявляющимся на континентальном субстрате.

В соответствии с дискриминационной диаграммой lg(K₂O/Na₂O)—SiO₂ Розера и Корша [Roser, Korsch, 1986] отложения сутырской и кимканской толщ сформировались под влиянием активной континентальной окраины (рис. 6).

Если учесть, что степень достоверности геохимических диаграмм данного типа вообще не очень высока (не более 62 % попаданий при проверке на миоцен-четвертичных объектах с известным геодинамическим окружением [Armstrong-Altrin, Verma, 2005]), то питающими провинциями отложений сутырской и кимканской толщ с наибольшей вероятностью следует считать зоны надсубдукционного вулканизма, действующего на континентальном основании. Под эту категорию попадают и континентальные дуги, и активные континентальные окраины, предлагаемые в качестве

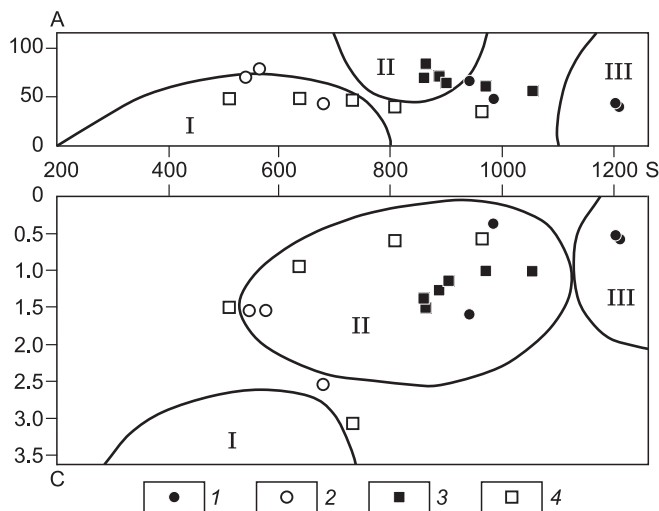


Рис. 2. Петрохимическая диаграмма ASC [Горбачев, Созинов, 1985].

Поля составов осадочных формаций: I — карбонатно-углеродистой, II — терригенно-углеродистой, III — кремнисто-углеродистой (вулканогенно-кремнисто-углеродистой). Здесь и далее: 1 — высокоуглеродистые, 2 — филлитовидные сланцы сутырской толщи; 3 — высокоуглеродистые, 4 — углеродистые сланцы кимканской толщи. А — глиноземистость, S — кремнеземистость, С — карбонатность.

кайнозойских осадков глубоководной скв. 1149, пробуренной на океаническом склоне Идзу-Бонинского желоба [Plank et al., 2007]. Толщи III и IV в ней представлены валанжин-альбскими кремнями, кремнистыми глинами и мелом; II — красными пелагическими глинами верхов мела, а I — вулканическими пеплами и кремнисто-глинистыми осадками кайнозоя. Составы этих отложений могут использоваться как реперные, показывающие изменение геохимии осадков в точке,двигающейся вместе с подстилающей плитой от центральной части океана к вулканической дуге. Рассматриваемые сутырская и кимканская толщи близки вулканогенно-осадочным отложениям верхней части колонки Идзу-Бонинского желоба, указывая на седиментацию вблизи границы между континентальной окраиной или дугой и океаном. На графике также видно, что гидротермально-осадочное обогащение металлами, как в зонах срединно-океанического спрединга, вряд ли имело место при накоплении изученных древних толщ.

Вместе с тем тренд вариаций составов рассматриваемых пород показывает сильное изменение соотношения Al/Fe при слабоизменчивом La/Ce, что не очень согласуется с моделью эволюции осадко-накопления от пелагического к окраинно-континентальному. Обеднение железом и обогащение глиноземом здесь могут быть объяснены пост-седиментационными (рудными?) процессами.

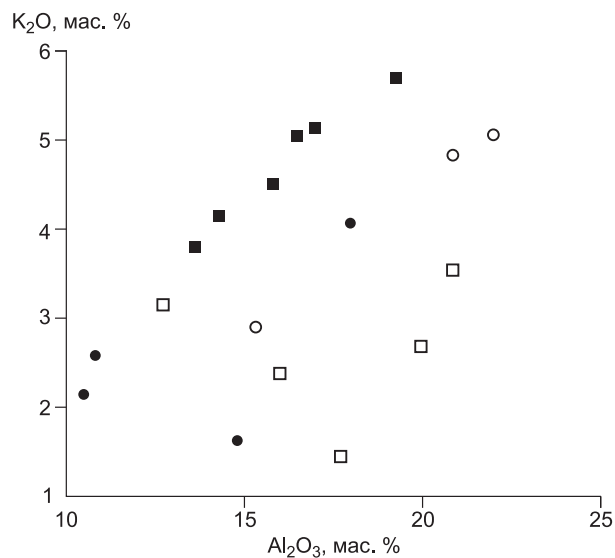


Рис. 3. Соотношение Al_2O_3 и K_2O в углеродистых породах сутырской и кимканской толщ.

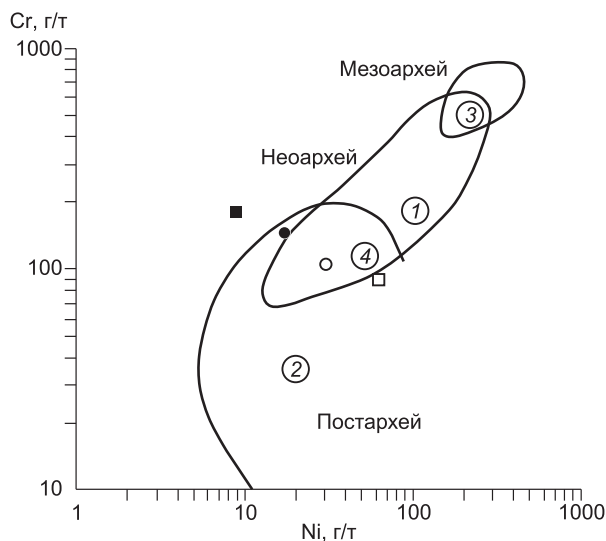


Рис. 4. Средние значения содержаний Cr и Ni в сланцах сутырской и кимканской толщ на диаграмме Конди [Condie, 1993].

1, 2 — верхние горизонты архейской (1) и постархейской (2) континентальной коры, по [Taylor, McLennan., 1985; Rudnick, Gao, 2004]; 3, 4 — средние составы архейских (3) и протерозойских (4) сланцев, по [Condie, 1993].

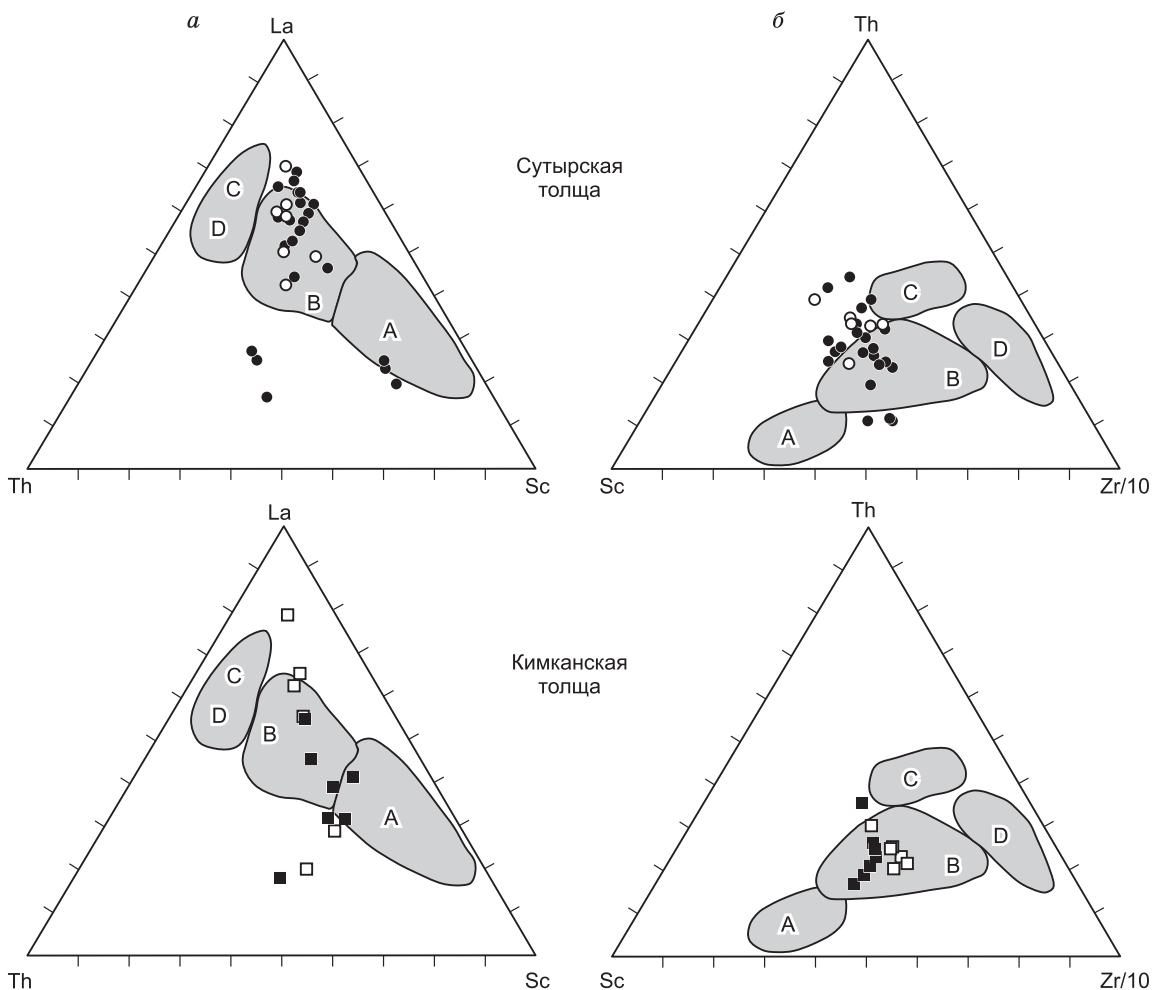


Рис. 5. Дискриминационные диаграммы для граувакков La—Th—Sc (а) и Th—Sc—Zr/10 (б), по [Bhatia, Crook, 1986].

А — океанические, В — континентальные островные дуги; С — активные, D — пассивные континентальные окраины.

ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА

Природа источников материала для формирования пород изученных толщ оценена с помощью дискриминационных диаграмм Розера и Корша [Roser, Korsch, 1988]. Как следует из рис. 8, петрохимический состав материнских пород сутырской толщи определялся кислыми изверженными и существенно-кварцевыми осадочными породами. Нельзя, по-видимому, исключить и серьезный вклад биогенного кремнезема, на который указывает кремнисто-углеродистый характер некоторых отложений. Кимканская толща формировалась за счет пород основного и среднего составов, в меньшей мере в результате переотложения осадочных образований.

Рис. 6. Дискриминационная диаграмма $\lg(K_2O/Na_2O)$ — SiO_2 для песчаников-аргиллитов, по [Roser, Korsch, 1986].

PCM — пассивные, ACM — активные континентальные окраины, IA — островные дуги.

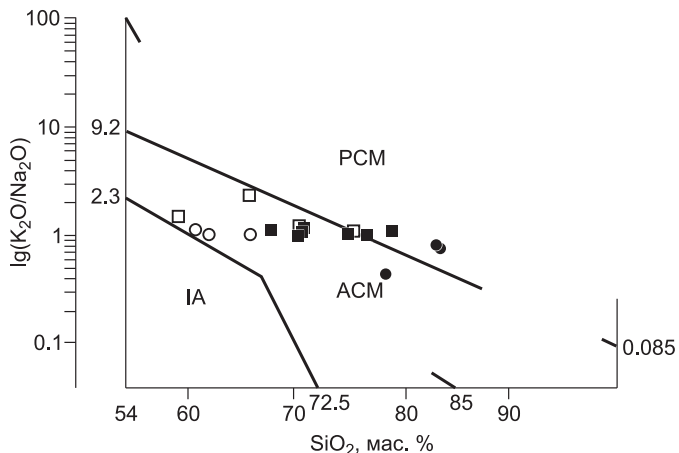


Таблица 4. Изотопные характеристики углерода сланцев сутырской и кимканской толщ

Толща	Сланцы	Номер образца	C _{орг} , %	δ ¹³ C _{V-PDB} , ‰
Сутырская	Высокоуглеродистые	565	4.77	-23.1
		653	5.07	-20.9
		6411	2.64	-23.1
		561	3.6	-22.7
		570	7.2	-21.0
		567	7.9	-23.7
	Филлитовидные	563	0.5	-20.7
Кимканская	Высокоуглеродистые	514	2.0	-23.3
		681	2.01	-18.9
		КИ-9	4.28	-16.9
	Углеродистые	695	0.4	-17.6
		543	0.3	-19.1

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток, отв. исп. Т.А. Веливецкая.

Судя по изотопным характеристикам углерода (табл. 4), сланцы обеих толщ обогащены биогенной органикой.

БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ

Петрохимические модули, по [Юдович и др., 1998], рассчитанные по данным о химическом составе пород из ряда месторождений и проявлений золота и металлов платиновой группы Австралии, Китая, Бразилии, Узбекистана, Индии и России, локализующихся в углеродистых толщах, показаны в табл. 5. Также приведены значения модулей для пород кимканской и сутырской толщ.

Наиболее ярко благороднометалльная специализация указанных объектов проявляется в модулях ОЩМ и ЩМ (рис. 9). Рудноносные объекты с повышенной концентрацией платиноидов имеют высокие (3.6—40) отношения оксидов калия и натрия при их низкой (0.1—3.1 мас. %) сумме. Преимущественно золоторудные объекты, наоборот, характеризуются низким отношением оксидов калия и натрия (0.5—6.3) при высокой суммарной щелочности (4.3—7.8 мас. %). Сланцы и железистые руды кимканской толщи по сумме и соотношению щелочей отчетливо идентифицируются с платиноносными объектами. Щелочные свойства пород сутырской толщи тяготеют к таковым для золоторудных месторождений в черных сланцах.

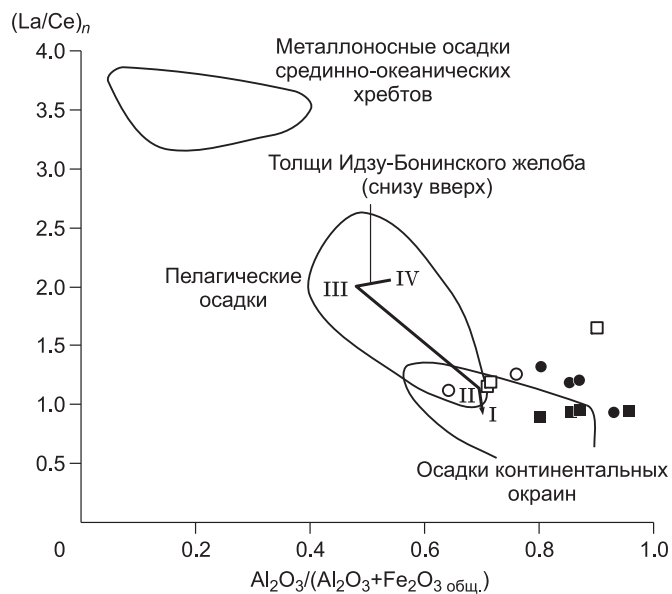


Рис. 7. Дискриминационная диаграмма $(La/Ce)_n - Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_{3общ.})$ для кремнистых отложений, по [Murray, 1994] с добавлением тренда эволюции осадков глубоководной скв. 1149, пробуренной на океаническом склоне Идзу-Бонинского желоба [Plank et al., 2007].

Римские цифры обозначают номера толщ. Содержания La и Ce нормированы к стандарту сланцев NASC [Gromet et al., 1984].

Таблица 5. Петрохимические модули, рассчитанные по данным о химическом составе руд и вмещающих пород крупных месторождений золота и металлов платиновой группы

№ п/п	Наименование рудоносных объектов	Источник	ГМ	ЖМ	ОЦМ	ЩМ
Платиноносные						
1	Джабилука, руда	[Винокуров, Омеляненко, 1990]	0.48	0.31	1.2	40.0
2	Джабилука, измененные углеродистые сланцы	»	0.29	0.22	2.4	35.1
3	Набарлек, руда	»	1.18	0.84	2.0	19.3
4	Нанчан, руда	[Гурская, 2000]	0.21	1.03	2.5	17.9
5	Серра Пелада, руда	[Sener et al., 2002]	0.82	0.52	0.9	14.1
6	Голд Ридж, руда	»	0.32	0.52	0.1	10.5
7	Джабилука, рудный метасоматит	[Винокуров, Омеляненко, 1990]	0.57	0.32	0.5	8.8
8	Дучан, руда	[Гурская, 2000]	0.10	0.10	3.1	7.8
9	Купфершифер, осадочные породы	[Pieczonka et al., 2008]	0.07	0.42	1.3	6.7
10	Тим-Ястребовская, измененные карбонатные породы	[Чернышев, 1999]	0.3	4.00	0.9	6.0
11	Тим-Ястребовская, измененные углеродистые сланцы	»	0.45	1.05	2.7	4.4
12	Орангское, руда	[Гурская, 2000]	0.56	1.65	3.1	3.6
Золотоносные						
13	Майское, руда	[Парада, 2004]	0.44	0.36	4.9	6.3
14	Даугыз, рудовмещающие углеродистые сланцы	»	0.45	0.38	6.0	4.3
15	Маломыр, руда	[Буряк и др., 1988]	0.25	0.63	4.8	3.8
16	Сухой Лог, рудовмещающие углеродистые филлиты	[Парада, 2004]	0.43	0.43	5.2	3.2
17	Маломыр, вмещающие углеродистые сланцы	»	0.45	0.35	7.8	3.0
18	Маломыр, вмещающие углеродистые породы	[Буряк и др., 1988]	0.36	0.44	4.9	2.5
19	Олимпиаденское, руда	[Парада, 2004]	0.47	0.48	5.1	2.3
20	Сухой Лог, золотоносные углеродистые кварц-хлорит-серицитовые сланцы	[Развозжаева и др., 2008]	0.4	0.33	4.8	1.8
21	Нежданинское, рудовмещающие алевролиты	[Парада, 2004]	0.33	0.30	6.1	1.5
22	Лотское, рудовмещающие углеродистые алевропелиты, песчаники	[Мирзеханов, Мирзеханова, 1991]	0.29	0.36	5.8	1.2
23	Токур, рудовмещающие филлитовидные сланцы	[Парада, 2004]	0.33	0.30	7.1	1.2
24	Мурунтау, золотоносные породы и руды	»	0.23	0.29	6.2	1.1
25	Юкинское, рудовмещающие углеродистые алевропелиты, песчаники	[Мирзеханов, Мирзеханова, 1991]	0.30	0.50	6.1	1.1
26	Огонекское, рудовмещающие углеродистые алевропелиты, песчаники	»	0.29	0.33	6.0	1.0
27	Рокосуевское, углеродистые рудовмещающие филлиты, песчаники	[Парада, 2004]	0.34	0.35	5.8	0.9
28	Баддини, рудоносная жильная зона	[Manikyamba et al., 2008]	0.38	0.92	4.3	0.5
29	Дуэт, рудовмещающие алевролиты, песчаники	[Парада, 2004]	0.27	0.30	6.2	0.5
Породы кимканской и сутырской толщ						
30	Кимканская, углеродистые сланцы	—	0.36	0.34	2.74	21.5
31	Кимканская, высокоуглеродистые сланцы	—	0.26	0.14	5.03	13.4
32	Сутырская, филлитовидные сланцы	—	0.43	0.36	4.56	12.6
33	Сутырская, окварцованные сланцы	—	0.28	0.54	4.26	4.5
34	Кимканская, гранат-амфиболовые сланцы	—	0.43	7.54	1.9	4.4
35	Кимканская, углеродистые сланцы метасоматически измененные	—	0.37	1.50	0.7	2.7
36	Кимканская, железистые кварциты	—	0.82	44.74	0.6	2.7
37	Сутырская, высокоуглеродистые сланцы	—	0.20	0.14	3.56	2.7

Примечание. Значения модулей по [Юдович и др., 1998]: ГМ = $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$, ЖМ = $(Fe_2O_3 + FeO + MnO)/(Al_2O_3 + TiO_2)$, ЩМ = K_2O/Na_2O , ОЦМ = $K_2O + Na_2O$.

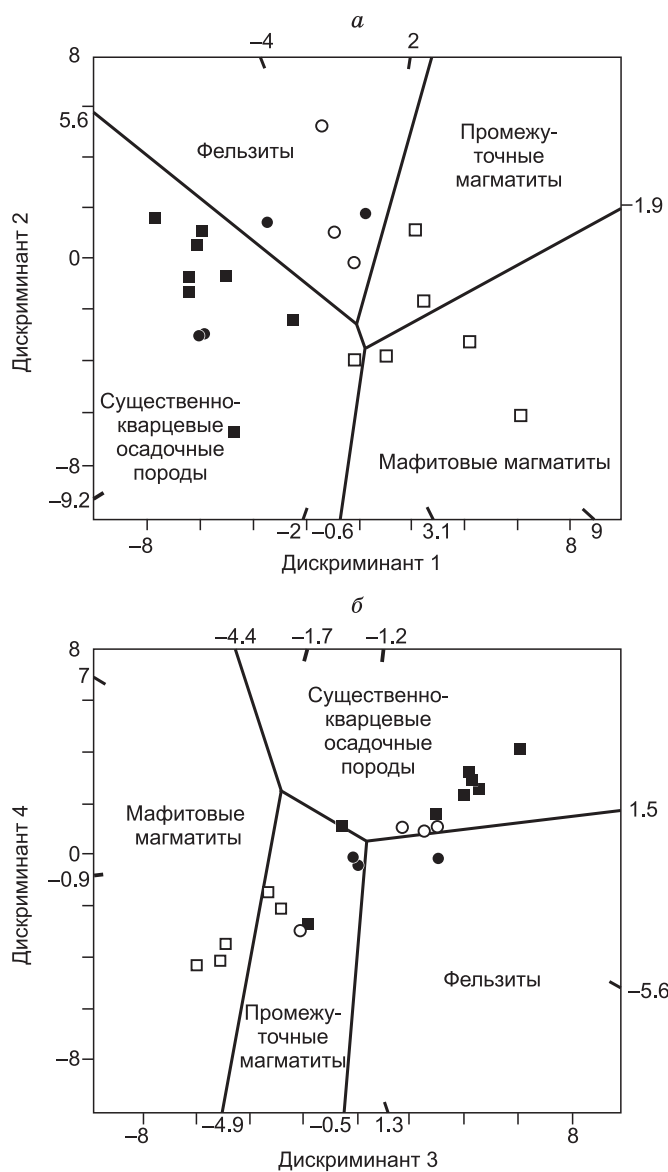


Рис. 8. Дискриминационные диаграммы для источников формирования толщ песчаников-аргиллитов, по [Roser, Korsch, 1988]:

a — с использованием значений концентраций основных петрогенных элементов, *b* — их отношений.

На рис. 9 можно выделить поля, в которых группируются объекты с близкими показателями щелочности. Как правило, в них входят объекты с одинаковой рудной специализацией и геологическими характеристиками оруденения. Средние значения петрохимических модулей для этих групп объектов приведены в табл. 6.

Для объектов с высокими (потенциально промышленными) содержаниями платиноидов (поле I) среднее значение ЩМ превышает таковое в объектах из других полей (групп) более чем в 6 раз при минимальных значениях более 4. Сумма оксидов калия и натрия в них не превышает 3 мас. % при среднем менее 2 мас. %. Среднее значение железистого модуля в объектах с высокими содержаниями МПГ превышает таковое в прочих объектах почти в два раза. Гидролизатный модуль имеет наиболее широкие вариации внутри каждой группы. В среднем он более высокий в объектах повышенной платиноносности, однако расхождения находятся в пределах статистической погрешности и его индикаторная роль для измененных пород с благороднометаллической минерализацией требует уточнения.

Различия между сутырской и кимканской углеродистыми толщами, имеющими разную благороднометаллическую специализацию, проявились и в частоте встречаемости микровключений, обогащенных платиной и золотом.

В сланцах кимканской толщи 32.8 % микровключений обогащены платиной, а в породах сутырской толщи только 12.8 %, в то время как в отношении золотоносных включений наблюдается обратная тенденция — 8.6 и 10.3 % соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Углеродистые сланцы кимканской и сутырской толщ относятся к образованиям терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формаций. В качестве основной питающей провинции для их формирования предполагается активная континентальная окраина, а условия накопления соответствуют глу-

Таблица 6. Средние значения петрохимических модулей для групп рудоносных объектов

Номер поля (см. рис. 9)	Рудная специализация объектов в группе	Количество объектов в группе	ГМ	ЖМ	ОЩМ	ЩМ
I	С высокими содержаниями МПГ в месторождениях разных типов	11	0.46	0.91	1.84	12.37
II	С повышенными содержаниями МПГ в золоторудных месторождениях	7	0.37	0.49	4.77	2.55
III	Эпитермальные золоторудные месторождения	8	0.32	0.35	6.06	1.39
IV	Эпитермальные золоторудные месторождения	2	0.39	0.33	7.46	2.11

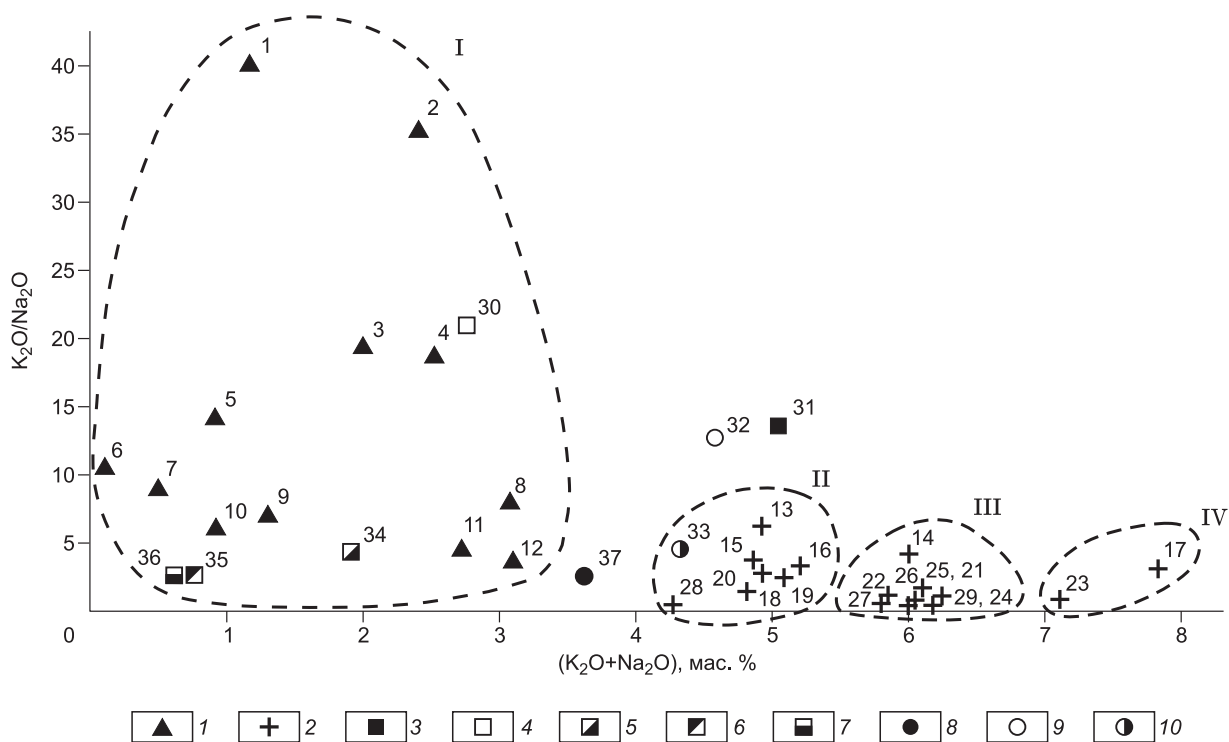


Рис. 9. Соотношение общей щелочности и суммы щелочей в сравнении с этими показателями для руд и вмещающих пород ряда крупных месторождений золота и металлов платиновой группы.

Цифры у символов — порядковые номера рудоносных объектов в табл. 5. Объекты: 1 — платиноносные; 2 — золотоносные; 3—7 — кимканская толща: 3 — высокоуглеродистые сланцы, 4 — углеродистые сланцы, 5 — гранат-амфиболовые сланцы, 6 — метасоматически измененные углеродистые сланцы, 7 — железистые кварциты; 8—10 — сутырская толща: 8 — высокоуглеродистые сланцы, 9 — филлитовидные сланцы, 10 — окварцованные сланцы. Обозначения полей I—IV см. в табл. 6.

боководным обстановкам вблизи источника вулканотерригенной кластики, например, в желобе над зоной субдукции. Следует подчеркнуть, что ширина современных зон глубоководных желобов 400 км и более, т.е. это крупные осадочные бассейны. Конседиментационным смешением в зоне субдукции можно объяснить ассоциацию разнородных осадочных пород, таких как кремнисто-глинистые сланцы, яшмы, известняки и доломиты пелагического и гемипелагического характера, с одной стороны, и типично терригенные алевриты и песчаники, с другой.

Обилие органического углерода в породах обеих толщ, особенно содержащих биогенные (?) кремнезем и карбонаты, наилучшим образом может быть объяснено интенсивной жизнедеятельностью микроорганизмов (в основном фитопланктона) в зонах подъема богатых питательными веществами глубинных вод вблизи континентальных или островодужных склонов на окраинах океанов, как, например, в современном Перуано-Чилийском желобе. Благоприятные условия для развития микроорганизмов и придонных водорослей могли существовать и на хорошо вентилируемых и прогреваемых шельфах окраинных морей, откуда их остатки вместе с терригенным материалом должны были смываться в соседние глубоководные котловины.

Показано, что углеродистые терригенно-осадочные толщи и формирующиеся в них благороднометалльные руды имеют совершенно определенные петрохимические характеристики, различные для комплексов с преимущественно платиноидной и золоторудной минерализацией. Эти свойства в равной степени проявлены на различных континентах, не зависят от возраста пород, а также от специфики рудо локализирующих структур. Согласно этим характеристикам, изученные сланцы и железистые руды кимканской толщи отчетливо идентифицируются с рудными объектами повышенной платиноносности, а породы сутырской толщи тяготеют к золоторудным месторождениям в черных сланцах.

Природа благороднометалльного оруденения в углеродистых терригенно-осадочных комплексах в настоящее время не выяснена, однако опыт, накопленный при изучении таких комплексов на юге Дальневосточного региона России [Ханчук и др., 2007, 2009а,б, 2010а; Бердников и др., 2010], позволяет предположить, что платинOMETалльная минерализация генетически связана с процессами формирования

и преобразования углеродистых пород. Платина в повышенных фоновых концентрациях присутствует в сланцах в рассеянном на атомно-молекулярном уровне виде [Ханчук и др., 2010б], образует в них широкий ряд микровключений — от аморфных с весьма малым (первые ат. %) содержанием платины до богатых платиной (десятки ат. %) микрокристаллов, пластинок и проволочек [Бердников, 2010], часто обнаруживается ее несомненная парагенетическая связь с графитом или другими формами углеродистого вещества. В то же время основное количество золота в углеродистых сланцах присутствует в самородном виде, его связь с углеродом не просматривается, уступая место отчетливым ассоциациям с наложенными процессами сульфидизации и окварцевания. По-видимому, специфика процессов, в результате которых в углеродистых терригенно-осадочных породах формируется преимущественно платиноидная или золотая минерализация, и отражается в выявленных нами петрохимических характеристиках. С этой точки зрения перспективными для поисков объектов с повышенными концентрациями платиноидов в терригенных углеродистых толщах являются породы с повышенной железистостью, пониженным значением суммы щелочных металлов при высоком отношении калия к натрию. Для золоторудных объектов типичны черносланцевые толщи с высокой общей щелочностью и относительно низким K/Na отношением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-05-98004-р_сибирь_a, ДВО РАН 11-III-Д-08-047).

ЛИТЕРАТУРА

Бердников Н.В. Тонкодисперсные золото и платиноиды в графитовых сланцах Буреинского массива — новый тип благороднометалльного оруденения на Дальнем Востоке России // Вестн. ОНЗ РАН, 2010, т. 2, NZ10004, ISSN 1819-6586, doi:10.2205/2010NZ000051.

Бердников Н.В., Александрова Т.Н., Черепанов А.А., Коновалова Н.С. Формы выделения благородных металлов в углеродистых сланцах на Дальнем Востоке России // Тезисы доклада на XIX Международной Черняевской конференции по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. Новосибирск, 4—8 октября 2010 г. Новосибирск, ИНХ СО РАН, с. 181.

Буряк В.А., Неменман И.С., Парада С.Г. Метаморфизм и оруденение углеродистых толщ Приамурья. Владивосток, ДВО АН СССР, 1988, 116 с.

Винокуров С.Ф., Омеляненко Б.И. О формационной принадлежности околорудных метасоматитов урановых месторождений «типа несогласия» Северной Австралии // Геология рудных месторождений, 1990, № 4, с. 53—63.

Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток, Дальнаука, 2006, кн. 1, 572 с.; кн. 2, 981 с.

Геология СССР. Т. XIX. Хабаровский край и Амурская область. Ч. I. Геологическое описание / Ред. Л.И. Красный. М., Недра, 1966, 736 с.

Горбачев О.В., Созинов Н.А. Некоторые петрохимические и геохимические аспекты классификации докембрийских углеродистых отложений // Проблемы осадочной геологии докембрия. М., Наука, 1985, вып. 10, с. 55—62.

Гурская Л.И. ПлатинOMETалльное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2000, 208 с.

Котов А.Б., Великославинский С.Д., Сорокин А.А., Котова Л.Н., Сорокин А.П., Ларин А.М., Ковач В.П., Загорная Н.Ю., Кургузова А.В. Возраст амурской серии Буреинско-Цзямусинского супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: результаты Sm-Nd-изотопных исследований // ДАН, 2009, т. 429, № 8, с. 637—640.

Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. Стратифицированное золото-кварцевое оруденение углеродисто-терригенных толщ Южного Верхоянья. Владивосток, ДВО АН СССР, 1991, 128 с.

Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Семейкина Л.К. Критерии прогнозирования комплексного платино-полиметалльного оруденения в углеродистых осадочных формациях // Платина России. Т. VI. М., Геоинформмарк, 2005, 320 с.

Оболенский А.А., Гущина Л.В., Анисимова Г.С., Серкебаева Е.С., Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Физико-химическое моделирование процессов минералообразования бадранского золоторудного месторождения (Якутия) // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (3), с. 373—392.

Парада С.Г. Условия формирования и золотоносность черносланцевых комплексов Амуро-Охотской складчатой области: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Ростов-на-Дону, РГУ, 2004, 48 с.

Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бодарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томур-

тогоо О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология, 2003, т. 22, № 6, с. 7—41.

Плюснина Л.П., Ханчук А.И., Гончаров В.И., Сидоров В.А., Горячев Н.А., Кузьмина Т.В., Лихойдов Г.Г. Золото, платина и палладий в рудах Наталкинского месторождения (Верхнеколымский регион) // ДАН, 2003, т. 391, № 3, с. 383—387.

Развозжаева Э.А., Немеров В.К., Спиридонов А.М., Прокопчук С.И. Углеродистое вещество золоторудного месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (6), с. 495—502.

Решения IV Межведомственного регионального стратиграфического совещания по докембрию и фанерозою юга Дальнего Востока и восточного Забайкалья. Комплект схем / Под ред. М.Т. Турбина, В.А. Бажанова, Г.В. Беляева, В.Ю. Забродина, Г.В. Роганова. Хабаровск, ХГГГП, 1994, 124 с.

Сорокин А.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Сорокин А.П., Яковлева С.З., Федосеенко А.М., Плоткина Ю.В. Первые данные о возрасте раннепалеозойских гранитоидов Малохинганского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса // ДАН, 2010, т. 431, № 2, с. 228—232.

Сорокин А.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Кудряшов Н.М., Великославинский С.Д., Яковлева С.З., Федосеенко А.М., Плоткина Ю.В. Раннепалеозойские гранитоиды Малохинганского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: геохимические особенности, геохронология, геодинамическая интерпретация // Петрология, 2011, т. 19, № 6, с. 632—648.

Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Вып. 1. Владивосток, Дальнаука, 2000, с. 5—34.

Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П., Медведев Е.И. Благородные металлы в высокоуглеродистых метаморфических породах Ханкайского террейна, Приморье // Тихоокеанская геология, 2007, т. 26, № 1, с. 70—80.

Ханчук А.И., Бердников Н.В., Черепанов А.А., Коновалова Н.С. Тонкодисперсные золото и платиноиды в графитовых сланцах Буреинского массива — новый тип благороднометалльного оруденения на Дальнем Востоке России // Горный информационно-аналитический бюллетень. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009а, вып. 5, с. 9—18.

Ханчук А.И., Бердников Н.В., Черепанов А.А., Коновалова Н.С., Авдеев Д.В. Первые находки видимых платиноидов в черносланцевых толщах Буреинского массива (Хабаровский край и Еврейская АО) // ДАН, 2009б, т. 424, № 5, с. 672—675.

Ханчук А.И., Диденко А.Н., Рассказов И.Ю., Бердников Н.В., Александрова Т.Н. Графитовые сланцы как перспективный источник благородных металлов на Дальнем Востоке России // Вест. ДВО, 2010а, № 3, с. 3—12.

Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П., Медведев Е.И. Углеродизация и геохимическая специализация графитоносных пород северной части Ханкайского террейна, Приморье // Геохимия, 2010б, т. 48, № 2, с. 115—125.

Чернышев Н.М. Золото-платинометалльное оруденение в докембрийских черносланцевых толщах и метасоматитах Воронежского кристаллического массива — основа создания Центрально-Российской минерально-сырьевой базы благородных металлов XXI в. // Платина России. Т. III. М., Геоинформ-марк, 1999, с. 226—241.

Шарапов В.Н., Лапухов А.С., Гузман Б.В., Черепанова В.К. Динамика фазовых границ в магматогенном флюиде при формировании золото-серебряных месторождений Южной Камчатки // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (9), с. 1095—1115.

Юдович Я.Э., Беляев А.А., Кетрис М.П. Геохимия и рудогенез черных сланцев Пай-Хоя. СПб., Наука, 1998, 366 с.

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

Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic discrimination of sedimentary basins // Contr. Miner. Petrol., 1986, v. 92, p. 181—193.

Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol., 1993, v. 104, p. 1—37.

Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American Shale Composite», its compilation, major and trace element characteristics // Geochim. Cosmochim. Acta, 1984, v. 48, p. 2469—2482.

Manikyamba C., Kerrich R., González-Alvarez I., Mathura R., Khanna T.C. Geochemistry of Paleoproterozoic black shales from the Intracontinental Cuddapah basin, India: implications for provenance, tectonic setting, and weathering intensity // Precam. Res., 2008, v. 162, p. 424—440.

Murray R.W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications // *Sediment. Geol.*, 1994, v. 90, p. 213—232.

Pieczonka J., Piestrzynski A., Mucha J., Gluszek A., Kotarba M., Wieclaw D. The red-bed-type precious metal deposit in the Sieroszowice-Polkowice copper mining district, SW Poland // *Ann. Soc. Geol. Poloniae*, 2008, v. 78, p. 151—280.

Plank T., Kelley K.A., Murray R.W., Stern L.Q. Chemical composition of sediments subducting at the Izu-Bonin trench // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2007, v. 8, Q04I16.

Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // *J. Geol.*, 1986, v. 94, p. 635—650.

Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data // *Chem. Geol.*, 1988, v. 67, p. 119—139.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise Geochem.*, 2004, v. 3, p. 1—64.

Sener A.K., Grainger C.J., Groves D.I. Epigenetic gold-platinum-group element deposits: examples from Brazil and Australia // *Trans. Inst. Mining Metal.*, 2002, v. 111, B65—B73.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. London, Blackwell, 1985, 312 p.

*Рекомендована к печати 18 октября 2012 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию
30 мая 2012 г.*