

## УГЛЕРОДИСТОЕ ВЕЩЕСТВО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ (Восточная Сибирь)

Э.А. Развозжаева, В.К. Немеров, А.М. Спиридонов, С.И. Прокопчук

*Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

Изучено нерастворимое углеродистое вещество (НУВ) золоторудного месторождения Сухой Лог по схеме: исходные сланцы—концентраты—остаточное вещество пород. В результате исследований методами электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии с микродифракцией электронов, термографии и масс-спектрометрии установлены морфогенетические разновидности НУВ: точечно-капельное, сотовидное, монокристаллы графита и кристаллы графита шаровидной формы.

Исследование изотопного состава углерода исходных сланцев и концентратов показало, что их значения близки друг к другу ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}}$  — 18.03—17.54 ‰). В остаточном углеродистом веществе фиксируется тяжелый изотопный состав углерода ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}}$  — 10 ‰). Обогащение тяжелым изотопом углерода остаточного НУВ в сравнении с исходными породами требует специальных геохимических исследований. Неоднородность НУВ сланцев месторождения Сухой Лог указывает на вариации физико-химических обстановок формирования руд месторождения.

*Углеродистый сланец, нерастворимое углеродистое вещество, концентрат нерастворимого углеродистого вещества.*

### CARBONACEOUS SUBSTANCE OF THE SUKHOI LOG GOLD DEPOSIT (East Siberia)

E.A. Razvozhayeva, V.K. Nemerov, A.M. Spiridonov, and S.I. Prokopchuk

Insoluble carbonaceous substance (ICS) at the Sukhoi Log gold deposit has been studied following the scheme: source shales – concentrates – residual substance of rocks. Examination by electron microscopy, transmission electron microscopy with electron microdiffraction, thermography, and mass spectrometry revealed several morphogenetic ICS varieties: dot-drop-like, honeycomb, single graphite crystals, and spherical graphite crystals.

Study of source shales and concentrates has shown their similar carbon isotope compositions ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{av}} = 18.03\text{--}17.54\text{ ‰}$ ). Residual carbonaceous substance is characterized by a heavy carbon isotope composition ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{av}} = 10\text{ ‰}$ ). Its enrichment with heavy carbon isotope, as compared with the source rocks, calls for special geochemical studies. The ICS heterogeneity in the Sukhoi Log shales points to variations in the physicochemical settings of ore formation at the deposit.

*Carbonaceous shale, insoluble carbonaceous substance, concentrate of insoluble carbonaceous substance*

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования природы углеродистого вещества и его роли в переносе, концентрировании и рассеянии рудных элементов относятся к одной из актуальных проблем современной геологии и, в частности, рудогенеза в черносланцевых осадочно-метаморфических толщах. Одним из аспектов этой проблемы являются трудности анализа металлоносности черносланцев.

Результаты исследований углеродистого вещества (УВ) в черносланцевых образованиях широко освещаются в литературе, включая работы [Kucha, 1982; Юдович и др., 1990; Буряк, Хмелевская, 1997; Ермолаев и др., 1999; и др.]. При этом УВ в метаморфических породах отводится, как правило, роль сорбента металлов, в том числе золота. Получаемые из черных сланцев в лабораторных условиях концентраты УВ по своей структуре и составу представляют собой результат трансформаций УВ морских осадков в условиях сидементогенеза, диагенеза, катагенеза и метаморфизма. УВ осадков превращалось последовательно в био-, затем в геополимеры и, наконец, в нерастворимое углеродистое вещество (НУВ) черносланцевых образований, являющееся пороодообразующим компонентом.

По существу, концентраты НУВ сланцев состоят в основном из углерода. Например, беззолные концентраты НУВ из руд месторождения Сухой Лог состоят на 95—96 % из углерода [Развозжаева и др., 2002]. Следовательно, НУВ сланцев представлено главным образом восстановленным углеродом и, по мнению многих авторов [Хаусен, Керр, 1973; Волкова, Богданова, 1980; Фридман и др., 1982; Варшал и др., 1991], обладает сорбционными свойствами по отношению к благородным металлам (золото). Вместе с тем исследование углеродсодержащих пород на благородные металлы констатирует неудовлетворительную сходимость результатов, полученных различными методами. При этом противоречия в

результатах и сомнения в надежности аналитических данных и сложность анализа, чаще всего, связывают с присутствием в породах углеродистого вещества [Курский и др., 1995].

Обычно при изучении углеродистых сланцев на благородные металлы первоначально производилось прокаливание проб до 600 °С. Однако в одной из экспериментальных работ было установлено, что термообработка проб в указанных условиях не приводит к полному окислению УВ [Варшал и др., 1991]. Вероятно, в сланцах присутствует окисляемый и неокисляемый в этих условиях углерод, что свидетельствует о сложном составе УВ сланцев. Следовательно, в породах присутствуют специфические формы углерода, требующие нестандартных аналитических решений. Поэтому разработка методов анализа черных сланцев, изучение их геохимии невозможны без исследования природы углеродистых веществ. В первую очередь это касается нерастворимого углеродистого вещества, составляющего основную массу рассеянного углеродистого вещества (РУВ) черносланцевых образований.

Цель работы — выяснение геохимии нерастворимого углерода сланцев, форм нахождения углеродистых веществ, идентификация соединений НУВ, связи с металлами и т. д. Основная задача работы состоит в проведении комплексного исследования углерода, включающего изучение НУВ в исходных породах, концентратов НУВ (метод флотации) и углерода, оставшегося в пробе после извлечения флотируемого углерода (концентрат углерода НУВ), т. е. по схеме: исходная порода—концентрат НУВ—остаточный углерод.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве изучаемого объекта в данной работе взяты углеродсодержащие сланцы месторождения Сухой Лог, которое располагается в центре Ленского золотоносного района и приурочено к Бодайбинскому синклинию, сложенному углеродисто-терригенными и терригенно-карбонатными породами рифейского возраста [Буряк, Хмелевская, 1997; Вуд, Попов, 2006]. Вмещающие оруденение терригенные углеродсодержащие породы, метаморфизованные в условиях фации зеленых сланцев, относятся к верхнерифейской хомолхинской свите. Минеральный состав сланцев, по данным микроскопического исследования, представлен кварцем 10—62 %, плагиоклаз-серицит-хлоритовым агрегатом, в котором плагиоклаз составляет 10—25, хлорит 5—20, серицит до 10 и биотит 1—5 %. Валовое содержание углерода варьирует в пределах 0,5—7 %. В небольших количествах постоянно встречаются рутил, ильменит, турмалин, лейкоксен, сфен, циркон, эпидот и апатит. Характерным для пород свиты является появление в их составе обломков кремнистых пород (2—3 %).

По своим петрохимическим параметрам, в соответствии с классификацией А.Н. Неелова [1980], сланцы свиты соответствуют группе алевропелитов с низкой до умеренной щелочностью. Содержание магния в них значительно превышает количество кальция, т. е. сланцы относятся к классу высокомагнезиальных. Следует отметить также повышенную железистость рассматриваемых отложений [Немеров, 1988].

Пробы углеродсодержащих кварц-серицит-хлоритовых сланцев, представленные В.В. Коткиным (ВостСибНИИГГиМС, г. Иркутск), взяты из центральной части рудной зоны месторождения Сухой Лог (скв. 292, 180, 286) и ее восточного фланга (скв. 671) (рис. 1).

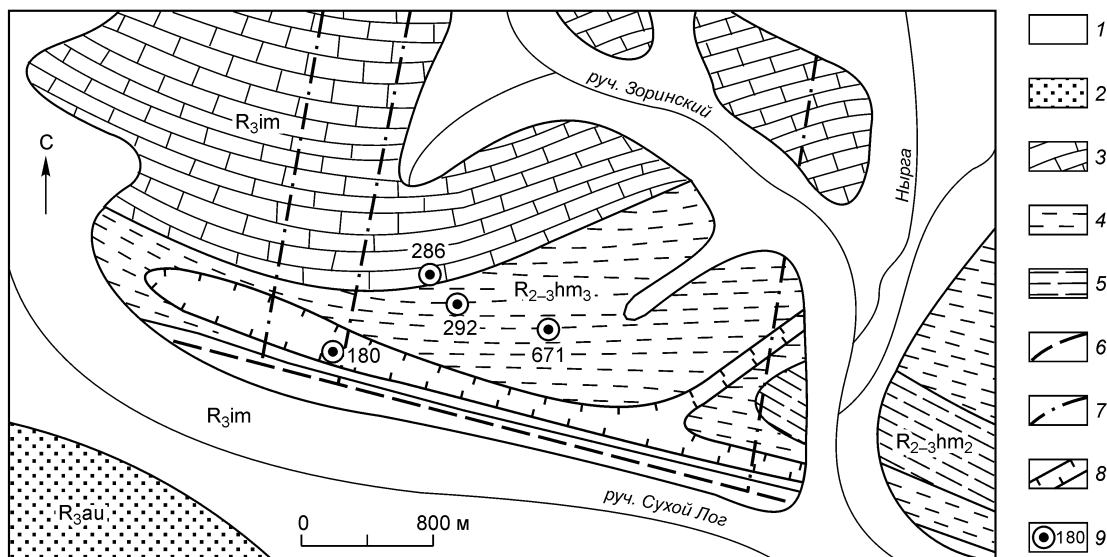


Рис. 1. Схематическая карта месторождения Сухой Лог.

1 — четвертичные отложения; 2—5 — свиты: 2 — аунакитская, 3 — имняхская, 4 — хомолхинская, средняя подсвита, 5 — хомолхинская, верхняя подсвита; 6 — надвиговая зона, 7 — разрывные нарушения; 8 — зона интенсивной сульфидной минерализации; 9 — скважины.

## МЕТОДИКА

Извлечение нерастворимого УВ осуществлялось из предварительно дебитуминизированных проб углеродистых сланцев в водной среде без нагревания, его выделение производилось с помощью метода флотации с петролейным эфиром. Концентраты НУВ объединялись в одну пробу и многократно промывались водой. Далее вещество осаждалось при центрифугировании на рентгеновскую пленку, очищенную от эмульсии. Высушенное вещество снималось с верхней части пленки и исследовалось [Развозжаева, 1978, 1983].

Углерод в исходных породах и концентратах НУВ определялся классическим методом сжигания [Корчагина, Четверикова, 1976].

Золото в исходных сланцах определялось экстракционно-атомно-абсорбционным методом. Предел обнаружения:  $n \cdot 10^{-7}$  % [Меньшиков и др., 1977]. Анализ содержаний благородных металлов (БМ) в концентратах НУВ сланцев выполнен прямым атомно-эмиссионным методом, что позволило установить присутствие БМ в НУВ и оценить их распределение между минеральной и углеродистой составляющими в продуктах флотации сланцев из исходных пород [Васильева и др., 1997, 2005].

Изотопный анализ углерода ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) проводился на масс-спектрометре VARIAN-VFN-203 с использованием международного стандарта РДВ, инструментальная погрешность составляла  $\pm 0.2\text{—}0.3$  ‰ (аналитик М.П. Богачева, ГЕОХИ РАН, г. Москва). Электронная микроскопия УВ исходных руд и концентратов НУВ произведена на приборе Labirbux Karl Zeis Jena (Tesla-620), а термические анализы сланцев и концентратов НУВ выполнены на дериватографе Ф. Паулик, И. Паулик и Л. Эрдей фирмы MOM (Венгрия). Анализы по термографии выполнены В.В. Котельниковым (ВостСибНИИГГиМС, г. Иркутск).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуемые сланцы (пр. 292, 180, 286, 671) характеризуются относительно однородным химическим составом. При этом содержания валового углерода в сланцах варьируют в пределах 0.66—0.99 % (табл. 1, 2).

Нерастворимое углеродистое вещество углеродсодержащих пород, являющееся пороодообразующей компонентой, составляет основную часть рассеянного углеродистого вещества (РУВ) пород, так как количество битумоидной ( $0.00 \cdot n$  %) и газовой составляющих незначительно.

В углеродсодержащих сланцах обнаружены две разновидности НУВ (Tesla-620). Первая — точно-капельвидная (свободная форма) представлена частичками (1—3 мкм), которые равномерно пронизывают минеральную часть сланцев. Однако плотность диспергирования различна. В отдельных участках породы плотность УВ настолько увеличивается, что порода становится черной, не просвечивающейся в проходящем свете. Тонкополосчатое распределение УВ совпадает со слоистостью породы. Данная капельвидная разновидность является, по-видимому, первичной формой УВ и сингенетична вмещающей породе. Вторая разновидность УВ представлена частицами (20—30 мкм), имеющими сотово-ячеисто-решетчатую разновидность (сотовидный тип вещества, связанная форма). Частицы соединены между собой, образуя тонкие сращения с терригенным материалом.

Кроме указанных морфологических форм углеродистых веществ (точно-капельвидной, сотовидной) в рудах Сухого Лога были найдены единичные монокристаллы графита (электронная микроскопия в сочетании с микродифракцией электронов), являющиеся свидетельством начальной стадии графитизации НУВ. Кристаллы графита дают точно-кольцевые картины, а более крупные кристаллы — точечные рефлексы. Одна из электронограмм представлена на рис. 2.

На следующем этапе работы исследовались концентраты НУВ [Развозжаева, 1983], извлеченные из руд месторождения. Они представляют собой высокодисперсные вещества черного цвета, состоящие преимущественно из углерода. В процессе обогащения иногда удавалось получать беззольные концентраты НУВ. По данным рентгеноструктурного анализа, НУВ в концентратах из сланцев (различной степени обогащения по углероду, включая беззольные концентраты) представлено разупорядоченной формой графитов (ДРОН-3,  $\text{CuK}_\alpha$ , Ni-фильтр). Из сланцев (табл. 1, пр. 292) были последовательно извлечены концентраты НУВ (концентрат-I, концентрат-II). Концентрат-I (93.3 % углерода) получен методом флотации (обработка породы водой с петролейным эфиром). Концентрат-II (87.7 % углерода) извлечен из той же пробы сланцев после получения концентрата-I в резуль-

Таблица 1. Содержание валового углерода (%) и золота (г/т) в исходных породах месторождения Сухой Лог

Скважина (проба), интервал, м	Порода	Свал	Au
292, 88—93	Углеродистый кварц-хлорит-серицитовый сланец	0.93	0.96
286, 74—117	»	0.85	0.96
671, 63—65	»	0.66	0.49
180, 88—185	»	0.70	0.60

Примечание. Анализ на золото (атомная абсорбция) выполнен Г.А. Валл (ВостСибНИИГГиМС, г. Иркутск).

Таблица 2. Химический состав углеродистых сланцев руд месторождения Сухой Лог (мас.%)

Проба	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	S <sub>общ</sub>	П.п.п.	Сумма
292	56.75	0.88	17.42	2.20	3.95	0.08	3.10	0.60	1.51	3.28	0.014	0.013	0.0004	0.14	0.50	1.20	10.11	100.75
180	55.75	0.81	16.44	2.40	3.17	0.09	3.40	0.80	1.64	3.15	0.016	0.011	0.0005	0.10	0.47	2.10	9.65	100.00
286	57.01	0.79	17.05	2.10	3.80	0.11	3.00	1.00	1.70	3.01	0.015	0.010	0.0004	0.12	0.42	1.30	8.96	100.40
671	59.01	0.88	15.41	3.17	2.24	0.12	3.10	1.10	1.88	2.86	0.014	0.012	0.004	0.14	0.50	0.89	8.52	100.63

тате растворения карбонатно-силикатной части пород в HCl и HF по методике [Развозжаева, 1983]. НУВ первого концентрата, возможно, представляет свободную форму углеродистых веществ (точечно-капельный тип), легко отделяемую от минеральной части (всплывание вещества в водной среде). НУВ второго концентрата можно отнести условно к связанной форме (сотовидный тип) НУВ сланцев. На приборе ПООС-1 были измерены дисперсии показателей отражения НУВ этих концентратов. Как видно (рис. 3), концентрат-II (сотовидный тип связанной формы) обладает несколько повышенной отражательной способностью по сравнению с концентратом-I (точечно-капельный тип, свободная форма).

По данным просвечивающей электронной микроскопии с микродифракцией электронов (JEM-100 C), нерастворимое УВ концентратов руд месторождения Сухой Лог представлено преимущественно аморфной формой [Дистлер и др., 2003]. Аморфное УВ в концентратах НУВ (пр. 292) присутствует в виде двух форм агрегатов ультратонких овальных частиц (600—1000 Å) и натечных пленок. Сравнивая исследования УВ руд и концентратов НУВ, можно полагать, что точечно-капельный тип свободной формы соответствует агрегатам ультратонких овальных частиц, а сотовидный тип связанной формы — натечным пленкам, сосредоточенным на минеральных фазах. Кроме аморфного углеродистого вещества в концентратах также распространены монокристаллы графита, встречающиеся в рудах исходных пород достаточно редко и имеющие форму мелких чешуек размером ~600 Å. Они формировали кольцевые картины дифракции электронов, на которых точно фиксировались только три отражения. При этом наиболее отчетливо проявлялся рефлекс 100, а следующий за ним рефлекс 101 не регистрировался. Это обстоятельство указывало на то, что кристаллы графита сильно „гофрированы“ вдоль плоскости {001} его кристаллической решетки. В единичных случаях (пр. 292, 180) были обнаружены крупные частицы графита закру-

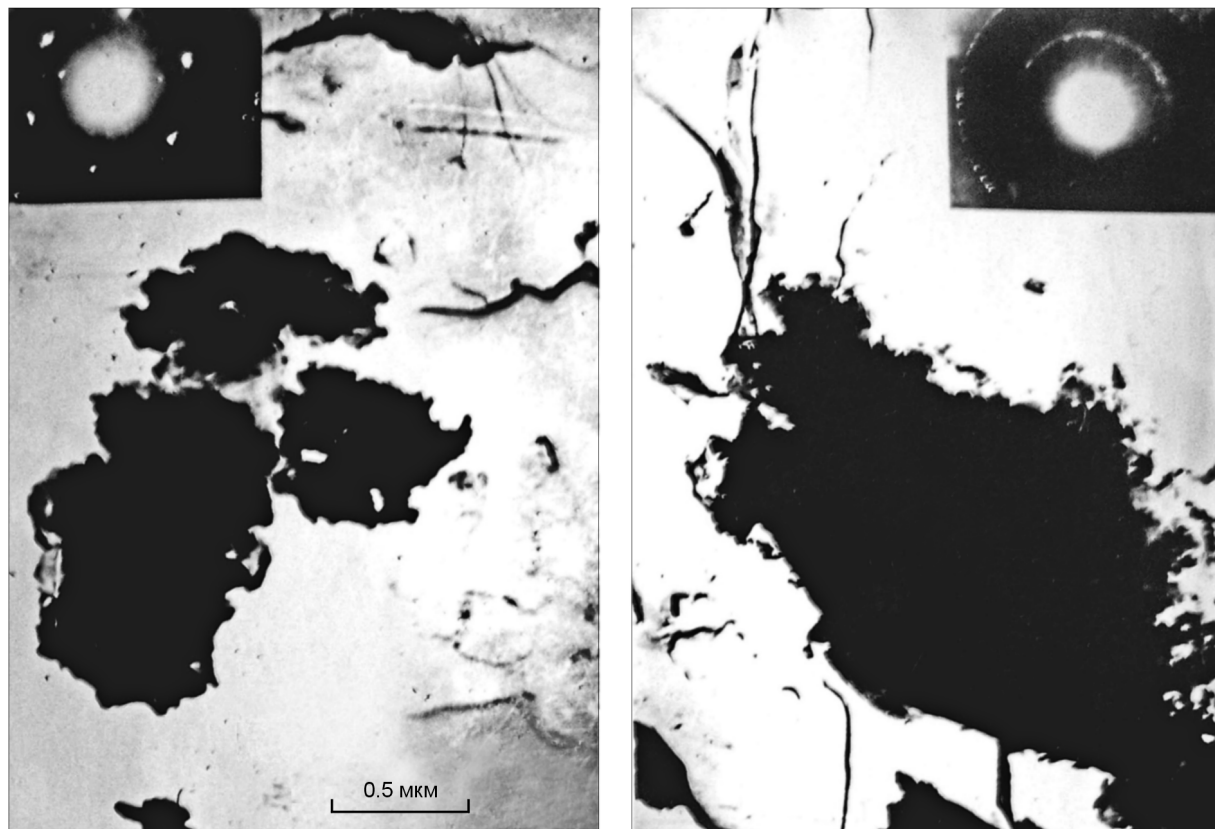
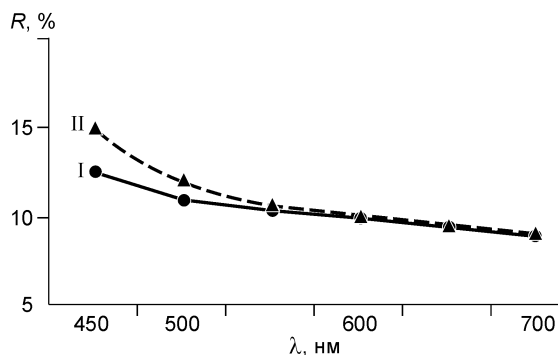


Рис. 2. Кристаллы графита, электронограмма (участок Сухой Лог, пр. 292).

**Рис. 3. Дисперсионная отражательная способность концентратов НУВ.**

I — концентрат-I (93.3 % углерода) — точечно-капельный, II — концентрат-II (87.7 % углерода) — сотовидный. R — отражательная способность,  $\lambda$  — длина волны.



ченной шаровидной формы [Дистлер и др., 2003], впервые выявленные в сланцах руд Сухого Лога, и дальнейшее их исследование, несомненно, представляет интерес как новое морфогенетическое проявление НУВ.

Следует заметить, что в рудах месторождения отмечаются только единичные кристаллы графита, а при концентрировании вещества происходит их значительное накопление. Итак, в рудах и концентратах НУВ обнаружены морфологические разновидности нерастворимого углерода: точечно-капельный, сотовидный типы (размер 600—1000 Å), монокристаллы графита ( $\approx 600$  Å) и частицы графитов закрученной формы (около 1 мкм). Методом термического анализа исследованы концентраты НУВ из сланцев взятых проб (табл. 3). Температуры начала ( $T_0$ ) экзотермических реакций этих проб не выходят за пределы 500—570 °С. По шкале температурных интервалов уровня метаморфизма по РУВ, основанной на температурах начала экзоэффектов, исследуемые образцы концентратов НУВ относятся к графитоидам и скрытокристаллическим графитам мусковит-хлоритовой и биотит-хлоритовой субфаций зеленых сланцев [Иванова и др., 1974; Коткин, Титкова, 1982]. На всех термограммах сланцев присутствуют два максимума экзотермических эффектов, что свидетельствует о присутствии в сланцах двух форм УВ, окисляющихся при различных температурах. Эти данные также указывают на неоднородность нерастворимого УВ руд месторождения Сухой Лог.

После извлечения основной массы НУВ в пробе остается углеродистое вещество, не отделяемое от породы (остаточное НУВ). Содержание углерода в остатке породы составляет 0.08—0.19 %.

Изучение изотопного состава углерода сланцев проведено по схеме: исходная порода — концентрат НУВ (кероген) — остаточный углерод (табл. 4). Изотопный состав углерода исходных сланцев заключен в интервале — 17.27—18.00 ‰. Тот же диапазон вариаций изотопного состава характерен для углерода концентратов НУВ, соответствующий 17.30—17.90 ‰. Изотопный состав углерода в остаточном НУВ пород — 9—11 ‰ углерода. Таким образом, по величине  $\delta^{13}\text{C}$  углерод разбивается на два типа. К первой группе изотопно-легкого углерода относятся исходные сланцы и концентраты НУВ, в которых  $\delta^{13}\text{C}$

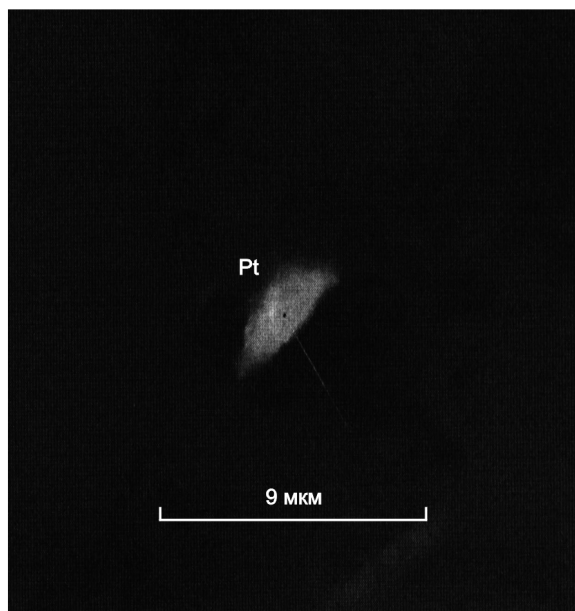
Таблица 3. Термический анализ концентратов НУВ руд месторождения Сухой Лог

Проба	С, %	$T_0$	$T_{\max}$	$T_k$	Тип НУВ по шкале Т.Н. Красавиной [1973], С.Г. Паняка [1973] по $T_0$
		°С			
292	50.05	500	600, 680	740	Графитоид
180	47.11	570	650, 690	750	Графитоид + скрытокристаллический графит
286	62.05	510	610, 690	740	Графитоид
671	71.70	520	600, 680	760	»

Примечание. С — содержание углерода в концентратах НУВ; температура:  $T_0$  — начала реакции,  $T_{\max}$  — максимума экзоэффекта,  $T_k$  — конца реакции.

Таблица 4. Изотопный состав углерода исходных сланцев, концентратов НУВ и остаточного НУВ

Проба	Исходная порода		Концентрат НУВ		Остаточное НУВ	
	Сорг, %	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	Содержание углерода, %	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	Содержание углерода, %	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰
292	0.99	-17.27	20.56	-17.56	0.15	-10.00
180	0.70	-17.49	31.30	-17.30	0.08	-10.00
286	0.85	-18.00	71.70	-17.90	0.19	-9.00
671	0.66	-17.75	62.05	-17.40	0.17	-11.00
Среднее значение	0.8	-18.03	46.40	-17.54	0.15	-10.00



**Рис. 4. Частица платины размером  $2 \times 4$  мкм в обратнорассеянных электронах.**

колеблется в пределах — 18.03—17.54 ‰. Ко второй — относится углерод остаточного НУВ,  $\delta^{13}\text{C}$  которого соответствует 10 ‰. Из этого следует, что остаточный углерод обогащен тяжелым изотопом более чем на 7 ‰ по сравнению с углеродом исходных руд и концентратов НУВ (рис. 4).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Нерастворимое углеродистое вещество, составляющее основную массу рассеянного УВ сланцев месторождения, находится преимущественно в тонкодисперсном состоянии и распределено по всему объему породы. Углеродистое вещество руд месторождения Сухой Лог, кроме метаморфизма, прошло еще и этап гидротермально-метасоматических преобразований [Немеров и др., 2005].

Вместе с тем полученные результаты комплексного исследования НУВ сланцев месторождения Сухой Лог свидетельствуют о неоднородности УВ. Это проявляется прежде всего при рассмотрении форм нахождения углеродистых веществ (свободная, сорбированная формы и микрокристаллы графита). Кроме того, неоднородность вещества фиксируется данными термографии (на термограммах два максимума окисления УВ сланцев) и отражается в значительном утяжелении по результатам изотопного анализа остаточного углерода, наиболее прочно связанного с минералами сланцев.

Особого внимания заслуживает исследование углеродистых сланцев золоторудных месторождений на благородные металлы.

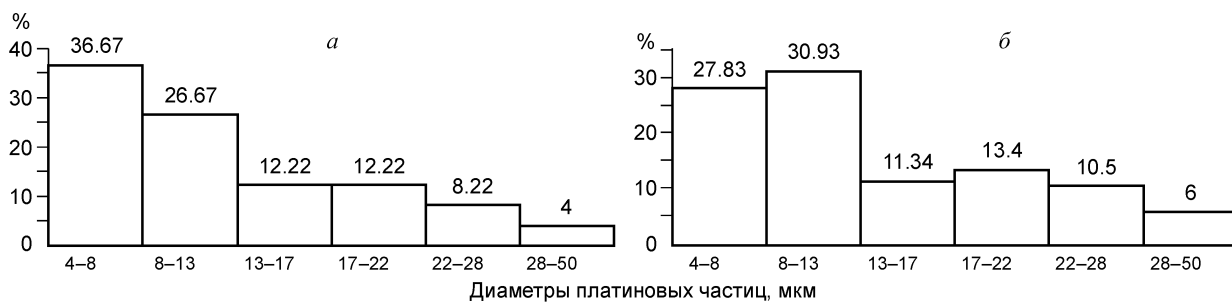
При обжиге сланцев (600 °С) происходит неполная деструкция УВ в пробах [Варшал и др., 1994]. При этом фиксируются расхождения и невоспроизводимость результатов анализов на благородные металлы (золото). На примере руд месторождения Кумтор (Киргизия) и Бакырчик (Казахстан) экспериментально установлено, что большая часть УВ окисляется, а оставшееся вещество, активизируясь при термообработке и под влиянием кислотных воздействий, является причиной потерь золота. Следовательно, оставшееся углеродистое вещество в пробе обладает, возможно, специфическими свойствами, отличными от углеродистых веществ, окисляющихся в данном температурном режиме.

Процесс окисления углеродистых веществ резко интенсифицируется в присутствии таких катализаторов, как нитрат свинца [Варшал и др., 1994]. Установлено, что часть УВ (остаточное вещество) сохраняется в пробе при 600 °С и окисляется только при 750 °С в присутствии катализатора. Эти данные также свидетельствуют, что углеродистое вещество сланцев представлено смесью соединений углерода гетерогенной природы. Неоднородность УВ в значительной мере подтверждается результатами изучения изотопных составов углерода исходных руд, концентратов НУВ и остаточного углерода, не извлеченного при флотации и оставшегося в породе с минеральной частью сланцев. И действительно, данные изотопного анализа углерода остаточного НУВ свидетельствуют о том, что остаточный углерод значительно обогащен тяжелым изотопом ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср}} \dots 10$  ‰) по сравнению с НУВ исходных руд и концентратов ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср}} = 18.03 \dots -17.54$  ‰) (см. табл. 4), что составляет около 7 ‰.

Нерастворимое углеродистое вещество пород месторождения Сухой Лог в целом неоднородно по своей природе (электронная микроскопия, термография, изотопия углерода). По-видимому, в этом заключается одна из причин противоречивости [Курский и др., 1995] результатов анализов на благородные металлы. В итоге детальных исследований высокоуглеродистых концентратов НУВ из руд месторождения Сухой Лог методами высокоразрешающей электронной спектроскопии [Дистлер и др., 2003; Павлова и др., 2005] обнаружены микрочастицы самородных металлов, в частности, платины (см. рис. 4).

Таким образом, частицы самородных металлов, выявленные в высокоуглеродистых концентратах ( $\text{C}_{\text{орг}} 50\text{—}90$  ‰), находятся в матрице из нерастворимого углерода. Этот природный экран и создает, вероятно, сложности при разложении и анализе руд на благородные металлы. Высокие содержания платины и размер частиц в данных концентратах НУВ подтверждаются также сцинтилляционным анализом [Развозжаева и др., 2002] (рис. 5).

В концентратах, кроме золота и платины, находящихся в парагенезисе с НУВ, обнаружен целый ряд самородных металлов и минералов: молибденит, дисульфид рения, экзотический по составу  $\text{PtTiCl}_3$ , многие из которых сохранились благодаря углеродистой матрице руд месторождения Сухой Лог [Дистлер



**Рис. 5. Распределение платиновых частиц в концентратах.**

а — пр. 292 ( $C_{\text{орг}}$  — 91.78 мас.%, содержание платины 500 г/т), б — пр. 180 ( $C_{\text{орг}}$  — 53.31 мас.%, содержание платины 1000 г/т).

и др., 2003]. Сонахождение наночастиц благородных металлов и углерода в рудоносных черных сланцах свидетельствует скорее не о привносе металла извне, а о выделении его *in situ* на начальной, метаморфогенной стадии рудообразования в условиях зеленосланцевой фации (420—380 °С, 5—6 кбар), причем из металлоносной нефтидной составляющей углеродистых веществ [Немеров и др., 2005]. В таких условиях при недостатке кислорода создается резко восстановительная обстановка, при которой металлы переходят в самородное состояние, образуются редкие минералы, формируются в парагенетические ассоциации с углеродом, характерные для руд рассматриваемого месторождения. При этом из системы удаляются восстановленные соединения с легким изотопом углерода (например, метан и пр.), поэтому, вероятно, оставшийся углерод обогащается изотопом  $^{13}\text{C}$ . В этой связи участие углеродистых веществ в процессах рудообразования в определенной мере подтверждается фракционированием изотопного состава углерода. Вместе с тем установленное наличие как минимум двух-трех разновидностей НУВ указывает на стадийность физико-химических обстановок формирования руд месторождения [Немеров и др., 2005] и(или) на существование дополнительного источника углеродистых веществ на одном из этапов формирования месторождения [Развозжаева и др., 2006]. Не исключено, что оба фактора оказывают влияние как на генезис УВ, так и руд месторождения Сухой Лог, локализованного в черносланцевых формациях.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной компонентой рассеянного углеродистого вещества (РУВ) является нерастворимое углеродистое вещество (НУВ), имеющее тонкорассеянную высокодисперсную форму. Установлено три морфологических типа НУВ: точно-капельный, сотовидный и кристаллы графита. Различия в результатах определения  $\delta^{13}\text{C}$  в УВ дают дополнительную информацию к вопросам генезиса углерода месторождения Сухой Лог.

Полученный материал позволяет расширить представление о природе углерода и его роли в рудообразующих процессах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 05-05-64466 и 05-05-97301-р-Байкал).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Буряк В.А., Хмелевская Н.М.** Сухой Лог — одно из крупнейших золоторудных месторождений мира. Владивосток, Дальнаука, 1997, 156 с.

**Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я., Баранова Н.Н., Галузинская А.Х., Козеренко С.В., Сафронов Н.С., Банных Л.Н., Павлуцкая В.И., Чхетия Д.М.** Формы связи благородных металлов с углеродистым веществом пород и их влияние на степень извлечения металлов // Тез. докл. Третьего Всесоюз. совещ. по геохимии углерода. М., Изд-во ГЕОХИ АН СССР, 1991, т. 2, с. 259.

**Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я., Баранова Н.Н., Козеренко С.В., Галузинская А.Х., Сафронов Н.С., Банных Л.Н.** О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород // Геохимия, 1994, № 6, с. 814—823.

**Васильева И.Е., Кузнецов А.М., Васильев И.Л., Шабанова Е.В.** Градуировка методик атомно-эмиссионного анализа с компьютерной обработкой спектров // Журнал аналит. химии, 1997, т. 52, № 12, с. 1238—1248.

**Васильева И.Е., Шабанова Е.В., Развозжаева Э.А.** Прямое атомно-эмиссионное определение благородных металлов в нерастворимом углеродистом веществе // Благородные редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: Материалы научн. конф. 3—7 октября 2005 г.. Иркутск, Ин-т географии СО РАН, 2005, т. 2, с. 215—218.

**Волкова И.Б., Богданова М.В.** О природе углеводородистого вещества на примере некоторых золоторудных формаций // Сов. геология, 1980, № 10, с. 90.

**Вуд Б.Л., Попов Н.П.** Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (3), с. 315—341.

**Дистлер В.В., Юдовская М.А., Развозжаева Э.А., Мохов А.В., Трубнин Н.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К.** Новые данные по платиноносности золотых руд месторождения Сухой Лог (Ленский золоторудный район, Россия) // Докл. РАН, 2003, т. 393, № 4, с. 524—527.

**Ермолаев Н.П., Созинов Н.А., Котина Р.П., Паликова Е.А., Горячкин Н.И.** Механизмы концентрирования благородных металлов в терригенно-углеродистых отложениях. М., Научный мир, 1999, 121 с.

**Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розина Е.Л.** Термический анализ минералов горных пород. Л., Недра, 1974, 399 с.

**Корчагина Ю.И., Четверикова С.П.** Методы исследования органического вещества осадочных пород. М., Недра, 1976, 229 с.

**Коткин В.В., Титкова И.В.** Методические рекомендации по применению термографического метода при поиске месторождений золота в черных сланцах. Иркутск, ВостСибНИИГГиМС, 1982, 34 с.

**Красавина Т.Н.** Термографическое исследование концентрированных и рассеянных форм разных типов природных органических веществ и графитов: Автореф. дис. ... к. г.-м. н. Л., ВСЕГЕИ, 1973, 25 с.

**Курский А.Н., Витоженец Г.Ч., Мандругин А.В., Аучкова Т.В.** Проблемы аналитического определения металлов платиновой группы в рудах черносланцевых комплексов // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. М., Геоинформмарк, 1995, т. II, кн. 1, с. 159—174.

**Меньшиков В.И., Хлебникова А.А., Цыханский В.Д., Малых В.Д.** Атомно-абсорбционное определение золота в геохимических образцах с использованием импульсных атомизаторов // Журнал аналит. химии, 1977, т. 32, № 5, с. 954—959.

**Неелов А.Н.** Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканических пород. Л., Недра, 1980, 100 с.

**Немеров В.К.** Геохимические черты эволюции условий накопления позднедокембрийских толщ Байкало-Патомского нагорья // Докл. АН СССР, 1988, т. 298, № 6, с. 1446—1449.

**Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матель Н.Л., Будяк Е.Е., Станевич А.М.** Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа // Отечественная геология, 2005, № 3, с. 17—24.

**Павлова Л.А., Развозжаева Э.А., Карманов Н.С., Канавкин С.В.** Электронно-зондовый микроанализ в нерастворимом углеводородистом веществе руд месторождения Сухой Лог (Байкало-Патомское нагорье) // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: Материалы науч. конф. 3—7 октября 2005 г. Иркутск, Ин-т географии СО РАН, 2005, т. 2, с. 234—237.

**Паняк С.Г.** Свободный углерод — индикатор степени и характера регионального метаморфизма: Автореф. дис. ... к. г.-м. н. Свердловск, Свердлов. горный ин-т, 1973, 23 с.

**Развозжаева Э.А.** Метод извлечения нерастворимого органического вещества из метаморфических пород докембрия // Литология и полезные ископаемые, 1978, № 6, с. 144—145.

**Развозжаева Э.А.** Метод фракционирования нерастворимого органического вещества осадочно-метаморфических пород // Литология и полезные ископаемые, 1983, № 3, с. 133—135.

**Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Цыханский В.В., Васильева И.Е., Прокопчук С.И.** Платина в углеводородистом веществе руд месторождения Сухой Лог // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (3), с. 286—296.

**Развозжаева Э.А., Немеров В.К., Макрыгина В.А.** Изотопный состав углерода отложений юга Сибирской платформы и ее складчатого обрамления // Геохимия, 2006, № 3, с. 297—306.

**Фридман И.Д., Файзулина Е.М., Клюева Е.М., Тарасова Т.А.** Исследование взаимосвязи природы сорбционных свойств углеродсодержащих золотых руд и химической структуры углеродистых веществ // Журнал приклад. химии, 1982, т. 55, № 1, с. 7—11.

**Хаусен Д.М., Керр П.Ф.** Месторождение тонкодисперсного золота Карлин, штат Невада // Рудные месторождения США. Т. 2. М., Мир, 1973, с. 634—691.

**Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Мерц А.В.** Геохимия и рудообразование золота в черных сланцах. Сыктывкар, Геонаука, 1990, 62 с.

**Kucha H.** Platinum-group metals in the Zechstein copper deposits, Poland // Econ. Geol., 1982, v. 77, № 6, p. 1578—1591.