

УДК 553.242.9 (571.651)

РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРОЛИВА ЛОНГА (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)

© 2020 г. Член-корреспондент РАН Н. А. Горячев^{1,2,*}, О. Т. Соцкая¹, А. С. Астахов³, Ши Сюефа⁴, Т. И. Михалицына^{1,5}, К. И. Аксентов³, Н. В. Бердников⁶

Поступило 12.10.2019 г.

После доработки 06.02.2020 г.

Принято к публикации 08.02.2020 г.

Проведено минералого-геохимическое исследование позднеплейстоценовых донных отложений колонки LV 77-10, отобранной в центре пролива Лонга. Установлены два интервала, обогащенных Au, Pd, Ag, различающихся по химизму осадков. Методом сканирующей электронной микроскопии с рентгеноспектральным микроанализом в них был установлен широкий спектр рудных минералов, включая наиболее распространенный пирит-марказит, а также арсенопирит, халькопирит, халькозин, самородные Au, Ag, Pb, акантит и сложные фазы Fe–Ni–Cr, Ag–Cu–Pb–Zn. Сделан вывод о привносе частиц с древесными остатками и о формировании некоторых из них в результате химических реакций в прибрежно-морских обстановках дельтовых фаций.

Ключевые слова: позднеплейстоценовые донные осадки, геохимия благородных металлов, микроминералогия Au и Ag, пролив Лонга, Арктическая Чукотка

DOI: 10.31857/S2686739720040064

Нами были исследованы донные осадки из колонки LV-77-10, полученной гравитационной трубкой в российско-китайской экспедиции ASW-2016 на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” в проливе Лонга на глубине моря 46 м (рис. 1), единственной, вскрывшей доголоценовые отложения. Осадки представлены тонкослоистыми, в т.ч. косослоистыми, алевролитами с линзами и прослоями торфа, растительного детрита и обломками древесины. Сверху с размывом залегает тонкий горизонт морских песков с раковинами, радиоуглеродная датировка которых дала раннеголоценовый возраст (рис. 2). Предварительно по всей ко-

лонке был выполнен рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) химического состава осадков, показавший наличие горизонтов обогащенных Fe, S и As (рис. 2), и в отдельных интервалах повышенное содержание Pd. Из них были исследованы 7 проб из интервалов: 51–56 см (ил с обломками сульфидизированной древесины); 56–58 см (ил с обломками древесины, обогащен углеродистым веществом); 59–62 см (торф); 123–125 см (ил); 144–146 (ожелезненный растительный детрит) и 158–160 см (ил с растительными остатками и примесью гидроксидов Fe до 15%) (рис.1).

Минералогические исследования выполнены на сканирующем электронном микроскопе EVO-50, с четырьмя энергодисперсионными спектрометрами “Bruker” и системой микроанализа “Quantax”. Объект изучения – зерна тонкопелитового материала и спилы древесины, наклеенные на углеродистый скотч и напыленные углеродом. Условия измерений с калибровкой на углеродное покрытие: ускоряющее напряжение 25 кВ, ток пучка 120 нА, размер излучающей области около 4 мкм, увеличение более 500 крат. Кроме того осадки были исследованы с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа и ICP–MS-метода.

Согласно данным РФА (рис. 2), в колонке выделено два обогащенных S, As и Fe горизонта: 52–62 см и 132–160 см. По данным спектрального анализа верхний рудный горизонт заметно обога-

¹ Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, Россия

² Институт геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

⁴ Первый Институт Океанографии КНР; Циндао, КНР

⁵ Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия

⁶ Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

*E-mail: goryachev@neisri.ru

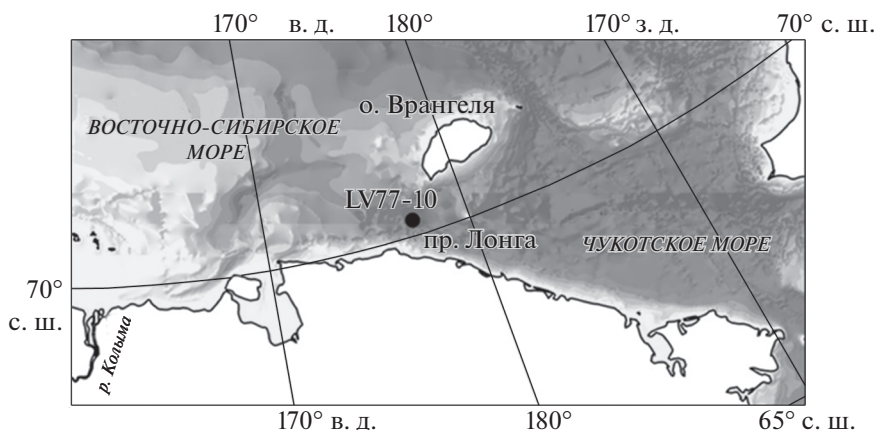


Рис. 1. Место отбора колонки LV77-10. Рельеф дна показан в оттенках серого по данным GEBCO.

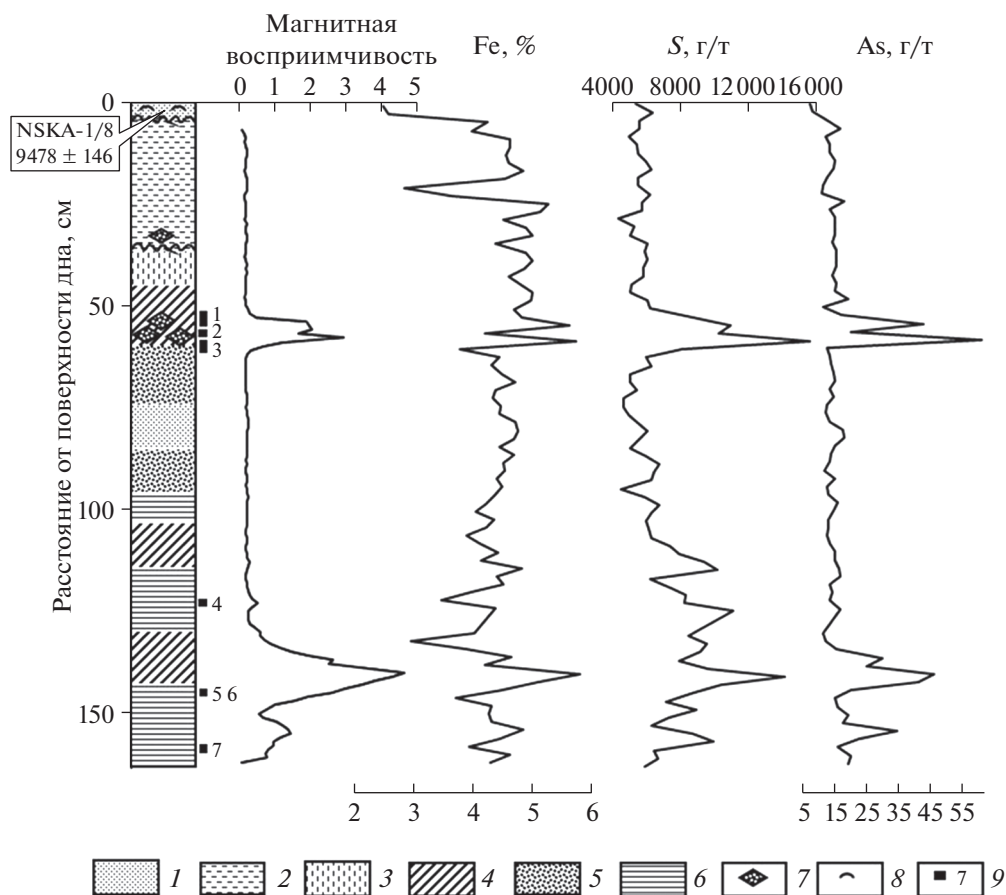


Рис. 2. Вариации магнитной восприимчивости и содержаний химических элементов (по данным рентгенофлуоресцентного анализа) в осадках колонки LV77-10: 1–6 – типы отложений: 1 – смешанные песчано-илистые с ракушей, 2 – плотный пелит алевритовый (суглинок), 3 – алеврит, 4 – сапропель, 5–6 – тонкослоистые осадки (алеврит – растительный детрит) с древесной и линзами оторфованного детрита: 5 – косослоистые, 6 – горизонтальнослоистые; 7 – крупные обломки древесины; 8 – ракуша; 9 – места отбора проб и их номера.

щен Fe, Mg, Mn, Cr и Ba, в то время как для нижнего рудного горизонта концентрации этих элементов существенно ниже (Fe, Mg, Cr, Ba), либо выше (Mn). Верхний рудный уровень также обо-

гащен Mo, Ag и отчасти Co (табл. 1), а в нижнем – заметно повышены содержания Pb, Sn, Li, Zn и отчасти Ni. Хотя относительно кларка эти элементы не аномальны, за исключением Ag и Zn.

Таблица 1. Рудные элементы (в г/т) в изученных пробах (по данным атомно-эмиссионного спектрального анализа)

№ пробы/интервал, см	Pb	Ga	Mo	Sn	Li	Cu	Ag	Zn	Ni	Co	Cr	Ba
1/51-56	13.7	9.7	17.4	0.3	13	11.1	0.6	15.6	11	35	1260	1241
2/56-58	14.4	10.3	6.3	0.3	13	10.2	0.6	2.2	12	27	84.7	764
3/59-62	15.5	12.1	4.6	0.3	13	10.8	3.6	4.3	13	27	94.4	802
4/123-125	24.6	14.7	1.9	0.9	13	13.1	0.6	0.2	15	23	61.2	496
5/144-146	23.4	17.9	1.7	5.5	111	14.2	0.6	85.8	17	24	62.4	444
6/144-146	23.9	17.1	1.8	5.5	111	12.8	0.5	82.1	16	22	56.5	444
7/158-160	22.0	16.3	2.0	5.4	112	13.2	0.4	82.5	14	24	50.3	464

Примечание: As, Sb, Te, Nb, Ta, Be, Ge, Se, La – ниже чувствительности анализа. Аналитический центр СВКНИИ ДВО РАН.

Данные ICP–MS (табл. 2), показывают неоднородное распределение Pd, Pt и Au в пробах.

При изучении пелитового материала, помимо породообразующих минералов (гидрослюда, полевые шпаты, кварц), были обнаружены тонкодисперсные минеральные фазы: пирит (марказит?), арсенопирит, самородные Au и Ag, акантит, оксиды или гидроксиды (?) Fe, Ag-Cu, Cu, Pb, Cu-Zn-Pb, а также касситерит, ильменит, барит, галит, гипс, циркон, монацит и ксенотим.

Пирит (марказит?) преобладает и образует скопления сферических глобулярных микровключений размером от 1.0–2.0 мкм. Реже встречается фрамбоидальный пирит размером до 30 мкм. Арсенопирит отмечен в алюмосиликатной матрице в виде микрокристаллов размером около 1 мкм.

Микровключения самородных Au и Ag размером до 2 мкм образуют вроски в гипсе и в алюмосиликатной матрице. Пробность Au варьирует от 896 до 915‰. В ассоциации с ним установлены включения самородной меди (0.4–1.8 мкм) и фазы Fe–Ni–Cr-состава. Самородное серебро размером от 1 до 8 мкм присутствует в виде просечек среди смеси гидроксидов Fe и галита и мелких включений в породообразующей массе. Иногда встречаются фазы Cu–Zn–Pb- и Pb–Cu-состава размером от 0.9 до 20 мкм, в которых обнаружены золотинки микронных размеров (от 0.8 до 1 мкм). Из минералов Ag найден его сульфид, предположительно акантит, представленный кристаллами копьевидного (рис. 3 а) и кубического облика размером от 2.5 до 13 мкм. Иногда он образует более крупные сростки шестоватых и копьевидных кристаллов (до 0.5 мм).

При исследовании спилов древесины, захороненной в осадках верхнего рудного уровня, были обнаружены мелкие включения самородных Au (0.4–3.1 мкм) (рис. 3б) и Ag (1.8–8.3 мкм), а также Fe–S-фазы. Очень часто в них встречаются участки в виде скопления зерен Fe–S–O-состава.

По результатам минералогических исследований можно судить о присутствии минеральных форм рудных элементов, As и S в изученных “руд-

ных” прослоях, что подтверждается геохимическими данными. Это сопоставимо с минеральными формами рудных элементов пермских терригенных пород Яно-Колымского орогенного пояса [1], осадочные бассейны которого имеют определенное геохимическое сходство с современным бассейном Чукотского моря [2]. Собственные минеральные формы благородных металлов и сульфидов железа достаточно обычны как в мелководных шельфовых морских отложениях, так и в глубоководной обстановке [3, 4]. Наши находки сульфидов железа среди слабо литифицированных горизонтов морских осадков, обогащенных серой, равно как и глобулярная их морфология, свидетельствуют о первично осадочном происхождении фрамбоидального пирита, известного во многих сланцевых толщах разного возраста. Мы полагаем, что исследованные осадки представляют собой дельтовые отложения палео-Колымы, современное устье которой находится не так далеко от позиции изученного разре-

Таблица 2. Концентрации (мг/т) платиноидов и Au в изученных пробах (по данным ICP–MS-анализа)

№ пробы	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au
1	0.78	0.50	<0.01	<0.01	34.34	25.14
2	0.73	0.74	31.34	<0.01	26.46	24.19
3-1	0.89	0.22	19.87	<0.01	14.39	10.70
3-2	0.49	0.48	1132.14	<0.01	114.53	248.74
4-1	0.80	0.37	<0.01	<0.01	10.04	14.61
4-2	0.19	0.26	109.83	<0.01	63.69	53.47
5	0.86	0.23	<0.01	<0.01	3.33	154.85
6-1	0.65	0.63	<0.01	<0.01	38.14	41.92
6-2	0.17	0.12	<0.01	<0.01	6.21	39.45
7	<0.01	0.03	169.65	<0.01	13.18	<0.01

Примечание: Полужирным шрифтом выделены аномальные концентрации элементов. Инновационно-аналитический центр ИТиГ ДВО РАН.

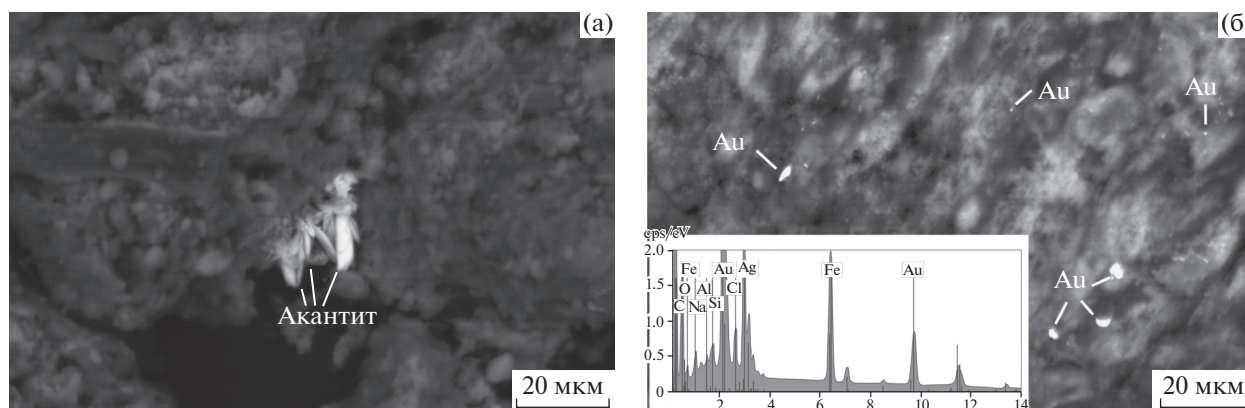


Рис. 3. Кристаллы акантита копьевидного облика в породообразующей массе (а) и микровключения самородного золота в слоях древесины. На врезке – энергодисперсионный спектр (б).

за (рис. 1), а по рельефу дна палеодолина прослеживается как в Восточно-Сибирском море, так и в проливе Лонга [5]. Это предполагает возможный вынос благородных и рудных элементов рекой в форме химических соединений и осаждение их в прибрежно-морской зоне. Об этом, в частности, свидетельствуют находки сростков микрокристаллов акантита, формы срастаний которых свидетельствуют об их кристаллизации из раствора. Результаты исследования остатков древесины также указывают на возможность разноса самородных металлов и в виде сорбированных частиц, с захоронением их вместе с крупными древесными остатками, которые в дальнейшем при полной литификации отложений бассейна превращаются в обогащенные углеродом и благородными металлами слои.

Все вышеизложенное предполагает в арктических бассейнах современной пассивной континентальной окраины существование условий для образования горизонтов, обогащенных благородными металлами, источниками которых могут являться как крупные реки, так и зоны рассеянного рифтогенеза, установленные восточнее в котловине Чукотского моря [2]. В обоих случаях возможно формирование потенциально рудоносных осадков при их литификации и метаморфизме. Наши исследования показали, что в изученном разрезе позднеплейстоценовых дельтовых осадков выявлены два уровня с повышенными концентрациями Fe, S, As, Au и Pd, в которых обнаружены самородные Au и Ag, фаза состава близкого к Ag_2S , пирита (марказита?), арсенопирита, фазы сложного состава (Ag–Pb–Cu–Zn, Ag–Cu). Это свидетельствует о том, что в арктических бассейнах современной пассивной континентальной окраины возможно формирование обогащенных благороднометалльной минерализацией горизонтов. Благородные металлы при их формировании могли как накапливаться в собственных минеральных формах (Au, Ag), локали-

зованных в древесных остатках, так и образовывать сульфидные минералы (Ag) при химических реакциях растворенных форм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность за оказанную помощь в выполнении аналитических работ Т.Н. Козыревой, Е.М. Горячевой (СВКНИИ ДВО РАН) и Е.А. Лопатникову (ТОИ ДВО РАН).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, ДВО РАН (грант 2018–1–008) и гранта NSFC-Shandong (U1606401).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соцкая О.Т. Минералогические и геохимические особенности месторождений золото-сульфидно-вкрапленного типа в южной части Яно-Колымского пояса // Автореф. дисс... канд. геол.-мин. наук. Магадан, 2017. 23 с.
2. Астахов А.С., Горячев Н.А., Михалицына Т.И. Об условиях формирования обогащенных золотом горизонтов рудовмещающих черносланцевых толщ (на примере пермских и современных морских отложений Северо-Востока Азии) // ДАН. 2010. Т. 430. № 2. С. 212–217.
3. Коноплева Е.В., Батулин Г.Н., Голева Р.В., и др. Формы золота и платины в железо-марганцевых корках Магеллановых гор (Тихий океан) // ДАН. 2004. Т. 397. № 2. С. 253–257.
4. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A. Compositional Variation of Glauconites in Upper Cretaceous-Paleogene Sedimentary Iron-ore Deposits in South-eastern Western Siberia // Sedimentary Geology. 2017. V. 355. P. 20–30.
5. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. 192 с.

ORE MINERALIZATION IN THE PLEISTOCENE SEDIMENTS OF THE LONG STRAIT (EAST SIBERIAN SEA)

Corresponding Member of the RAS **N. A. Goryachev^{a,b,#}, O. T. Sotskaya^a, A. S. Astakhov^c, Shi Xuefa^d,
T. I. Mikhailitsyna^{a,e}, K. I. Aksentov^c, and N. V. Berdnikov^f**

^a *Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation*

^b *Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

^c *Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^d *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources China, Qingdao, China*

^e *North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation*

^f *Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: goryachev@neisri.ru*

A mineralogical-geochemical study of the Late Pleistocene bottom sediments of the column LV 77-10 selected in the center of the Long Strait was carried out. Two horizons of enriched Au, Pd, Ag, differing in the chemistry of precipitation, have been established. Using scanning electron microscopy with X-ray microanalysis, a wide complex of ore minerals was found in them, including the most common pyrite-marcasite, as well as arsenopyrite, chalcopyrite, chalcocite, native Au, Ag, Pb, acanthite and complex phases Fe–Ni–Cr, Ag–Cu–Pb–Zn. It is concluded that particles with wood residues were introduced and some of them were formed as a result of chemical reactions in coastal marine environments of delta facies.

Keywords: Late Pleistocene bottom sediments, precious metals geochemistry, Au and Ag micromineralogy, Long Strait, Arctic Chukotka