

УДК 551.35(268.56)

**МИНЕРАЛЬНЫЕ ЗЁРНА ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧУКОТСКОГО МОРЯ**© 2018 г. А. Н. Колесник^{1,*}, О. Н. Колесник^{1,**}, А. А. Карабцов², Н. В. Бондарчук²

Представлено академиком РАН М.И. Кузьминым 15.02.2016 г.

Поступило 02.03.2016 г.

Приведены данные рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа минеральных зёрен цветных (Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, Bi, Mo) и благородных (Ag, Au, Pd, Pt) металлов, впервые обнаруженных в осадках Чукотского моря. Рассмотрены особенности морфологии и химического состава зёрен, характер их распределения в осадках, источники.

DOI: 10.31857/S086956520000055-3

Арктическая континентальная окраина России богата россыпными полезными ископаемыми, прежде всего Au, Sn (касситеритом). Несмотря на то что россыпной потенциал складывается из ресурсов суши (континентальной, островной) и шельфа, разведаны и оценены в основном наземные объекты. Чукотское море в этом плане не исключение. Образующиеся в результате денудации коренных месторождений Чукотки и Аляски россыпи (рис. 1) имеют аллювиальное, прибрежно-морское происхождение, могут быть полигенными [4]. Ореолы рассеяния Au, Sn, прослеженные вдоль побережья Чукотки, образуют в донных осадках линейные тела, которые фиксируются на удалении от берега до 5–10 км и более. Длина ореолов может достигать десятков километров при ширине в сотни метров — первые километры [4]. При этом центральная часть моря и внешний шельф, где, в частности, установлены “весьма надёжные предпосылки эндогенной золотоносности и благоприятные условия для формирования генетически разнотипных и разновозрастных россыпей золота” [5, с. 166], остаются практически не изученными. Микрочастицы Au и некоторых других благородных и цветных металлов обнаружены в железомарганцевых конкрециях каньона Геральд (западная часть моря) и внешнего шельфа (восточная часть моря) [6, 7].

Цель нашей работы — выявить частицы цветных и благородных металлов в поверхностном (0–3 см) слое донных осадков Чукотского моря (далее по тек-

сту — осадки), изучить их химический состав и характер распределения, установить наиболее вероятные источники. Для этого на приборе JEOL JXA-8100 с системой энергодисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy проведено детальное исследование пелит-алевритовых, алеврит-пелитовых осадков из различных районов Чукотского моря (18 проб, каждая массой 2 г, ~900 анализов). На стадии пробоподготовки выделенную водно-ситовым методом псаммит-алевритовую фракцию клеили на полоски электропроводящего скотча (27 полосок, по 1–2 на каждую пробу; площадь одной полоски — 4,5 см²). При этом исключалось всякое попадание в осадки посторонних рудных частиц. Пробы подвергали только бесконтактной ультразвуковой обработке: не резали, не стирали и не шлифовали; для отмучивания и просеивания использовали дистиллированную воду, тщательно промытые стеклянную посуду и сита с синтетическими нитями. Полоски напыляли тонким слоем углерода. В ходе анализа энергетическое разрешение детектора на MnK α -линии составляло 137 эВ, ускоряющее напряжение — 20 кВ, сила тока — 10⁻⁸ А, угол отбора рентгеновского излучения — 45°. Объём анализируемой области не превышал 2–5 мкм в диаметре. Содержание элементов рассчитывали из отношения интенсивностей линий, излучаемых образцом, к интенсивностям тех же линий, полученных на стандартах (использовали библиотеку эталонов пользователя). Коррекцию матричных эффектов производили по схеме ХРР, в основе которой лежит метод Phi-Rho-Z. Затруднения, как правило, вызывал количественный анализ содержаний лёгких элементов, в том числе кислорода и углерода. Последний вследствие углеродного напыления полосок в результатах анализа не учитывали. Кроме того, на качество (чистоту) результатов влияли чрезвычайно

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

² Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

* E-mail: aiaks1986@mail.ru

** E-mail: kolesnik_o@poi.dvo.ru

малый (первые микрометры) размер анализируемых частиц и их неровная поверхность. Первое обстоятельство нередко становилось причиной возбуждения рентгеновских спектров химических элементов соседних фаз, второе — существенного разброса суммы элементов. Несмотря на это, погрешность измерений в основном не превышала 2 отн.%. Соответствие конкретной минеральной фазе проверяли сопоставлением химического состава проанализированной частицы с “эталонным” (из справочной литературы) составом того или иного минерала. В случае низкой суммы элементов определяли/предполагали только класс химического соединения.

Таким образом, с помощью рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа в осадках Чукотского моря обнаружили многочисленные частицы цветных и благородных металлов — Cu, Zn, Sn, Pb, Ni, Bi, Mo; Ag, Au, Pd, Pt (рис. 1, 2; табл. 1). Большой частью это округлые или угловатые, неопределённой формы зёрна ~1–5 мкм. Встречены отдельные частицы до 50 мкм, а иногда 100–150 мкм в длину (рис. 2б). Зёрна зафиксированы среди обломков породообразующих минералов, главным образом кварца и полевых шпатов.

Изучение минеральных зёрен цветных металлов показало, что это в основном интерметаллиды и оксиды Cu, Zn, Sn, Pb, иногда Ni. Наиболее распространены цинкистая Cu и касситерит (рис. 2; табл. 1; табл. 2, строки 4, 10). Реже в осадках встречаются соединения Fe–Cr–Ni, Cu–Zn–Ag. В последнем соотношении компонентов может заметно варьироваться (табл. 1; табл. 2, строки 16, 20 и др.). Выявлены зёрна, основную роль в химическом составе которых играют Cu, Al и кислород (табл. 1; табл. 2, строка 3). В отдельных частицах зафиксировано очень высокое содержание Cu, Ni (табл. 1; табл. 2, строки 1, 12), значительное — Mo, Bi (табл. 1). Присутствуют зёрна состава Cr–Bi (табл. 1; табл. 2, строка 14), примесь Bi в других минералах встречается редко. Из серосодержащих минеральных фаз (редкие зёрна) обнаружены арсеницит (?), сульфат и сульфид Pb, последний с небольшим содержанием Cu, As, Zn, Sb (табл. 1; табл. 2, строка 15). Как второстепенный компонент, S отмечена в составе единичного Cu–Zn-зерна (табл. 1; табл. 2, строка 5).

Частицы благородных металлов, в отличие от цветных, представлены в осадках не так широко (рис. 1; табл. 1). Чаще всего встречается Ag — преимущественно оксидное, в отдельных случаях интерметаллидное (соединение Cu–Zn–Ag) и, по-видимому, сульфатное, самородное, оксийодидное (рис. 2а; табл. 1; табл. 2, строки 16–21). В подчинён-

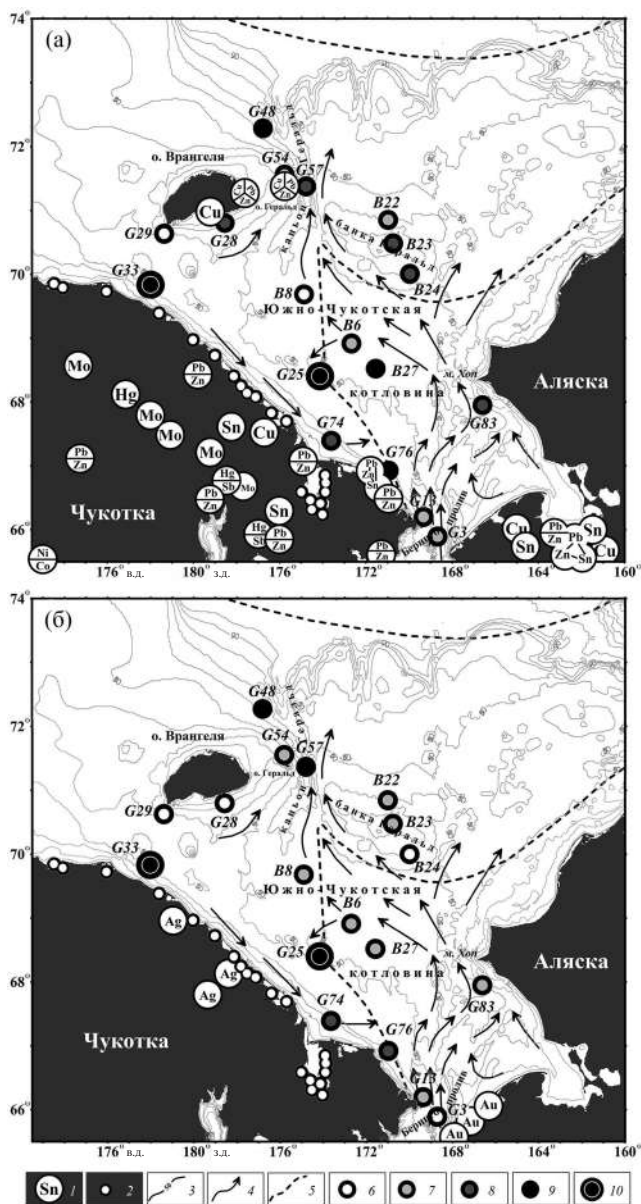


Рис. 1. Распределение минеральных зёрен цветных (а) и благородных (б) металлов в осадках Чукотского моря. 1, 2 — месторождения цветных и благородных металлов континентального обрамления: 1 — месторождения суши с указанием основного ценного компонента (компонентов), по Металлогенической карте Тихоокеанского рудного пояса (1979, масштаб 1:10 000 000, под ред. Е.А. Радкевич), 2 — олово- и золотоносные россыпи и россыпепроявления побережья Чукотки [1]; 3 — изобата, м; 4 — течения [2]; 5 — максимальное и минимальное положение кромки льдов в сентябре [3]; 6–10 — плотностное распределение зёрен цветных или благородных металлов в осадках Чукотского моря, шт./см² (табл. 1): 6 — зёрна не обнаружены, 7 — 0,1–1,5; 8 — 1,6–3,5; 9 — 3,6–4,5; 10 — 4,6 и более.

ном количестве металл содержится в минеральных фазах Au; как правило, это одиночные зёрна (табл. 1;

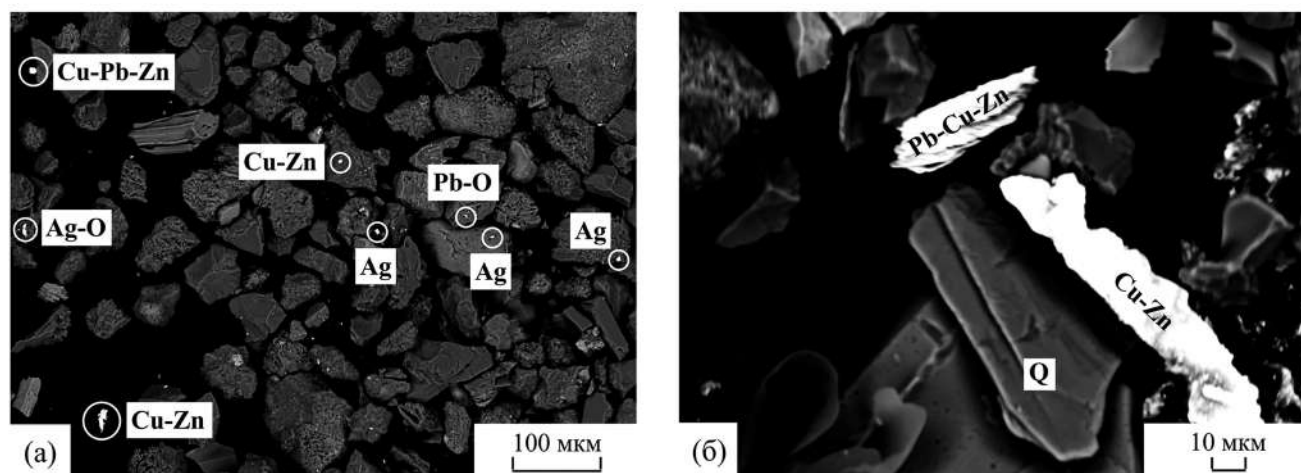


Рис. 2. Морфология и особенности локализации минеральных зёрен цветных металлов и серебра в осадках Чукотского моря (вид в отраженных электронах). Q — кварц.

Таблица 1. Минеральные ассоциации цветных и благородных металлов в осадках Чукотского моря

№ пробы	Цветные металлы		Благородные металлы	
	Минеральные формы выделения и количество зёрен*	Плотность распределения**	Минеральные формы выделения и количество зёрен*	Плотность распределения**
B6	Cr–Bi (1)	0,1	Ag–O (1)	0,1
B8	–		Ag (1), Au–Ag? (1)	0,4
B22	Cu–Zn (1), Fe–Cr–Ni (1), Cu–O (1)	0,3	Ag–J–O? (2)	0,2
B23	Cu–Al–O? (7), Cu–Zn (4)	2,4	Ag–O (1)	0,2
B24	Cu–Zn (10), Cu–Zn–Ni (1), Cu–Zn–Pb (1), Pb–Cu–Zn (1), Cr–Bi (2), Pb–S–O? (2)	1,9	–	
B27	Cu–Zn (20), Cu–Zn–Pb (6), Cu–Pb–Zn (1), Pb–Cu–Zn (2), Cu? (2)	3,4	Ag–O (4)	0,4
G3	Fe–Cr–Ni (1)	0,2	–	
G13	Cu–Zn (1), Cu–Zn–Pb (4), Pb–S–O (1)	1,3	Ag–O (1)	0,2
G25	Cu–Zn (19), Cu–Zn–Pb (2), Pb–Cu–Zn (3), Cu–Al–O? (1), Mo–Cu–Zn–O? (1), Pb–O? (1), Sn–O (1)	6,2	Ag–O (20), Ag? (1)	4,7
G28	Sn–O (20), Sn–Pb–O (3), Pb–Sn–O (1), Cu–Sn (2)	2,9	–	
G29	–		–	
G33	Cu–Zn (23), Cu–Zn–Ag (3), Cu–Al–O? (1)	6,0	Ag–O (23), Cu–Zn–Ag (3)	5,8
G48	Cu–Zn (21), Cu–Zn–Pb (3), Cu–Sn? (1), Pb–O (5), Zn–O? (1), Cu–Pb–Zn (1), Cu–Zn–Ag (1), Cu–O? (1), Fe–Cr–Ni (1)	3,9	Ag–O (28), Au (1), Cu–Zn–Ag (1)	3,3
G54	Pb–O (2), Sn–O (1), Ni? (1)	0,4	Ag–O (1), Au–Cu–Ag (1), Pd–Pt (1)	0,3
G57	Cu–Zn (5), Cu–Zn–Pb (3), Pb–Cu–Zn (1)	2,0	Ag–O (11), Au (8)	4,2
G74	Cu–Zn (3), Ni–Cu–Zn (1), Pb–O (1), Bi–Cl–O? (1), Pb–As–S? (1), Fe–Cr–Ni (1)	1,8	Ag–O (5), Ag–S–O (3), Au (2), Ag–Cu–Zn (1)	2,4
G76	Cu–Zn (7), Cu–Zn–Pb (1), Pb–Cu–Zn (1), Cu–Ag (4), Cu? (2)	3,6	Ag–O (5), Cu–Ag (4)	2,0
G83	Cu–Zn (17), Cu–O (2), Pb–O? (5), Cu–Zn–S? (1), Fe–As–S? (1)	2,9	Ag–O (3), Au–Cu–Ag (1), Ag–S–O (2), Pt–O (1)	0,8

Примечание. *Приведён упрощённый (без учёта примеси) химический состав минеральных зёрен цветных и благородных металлов. К примесным отнесены элементы из химического состава близлежащих обломков породообразующих минералов (см. текст, описание методики). Количество зёрен конкретной минеральной фазы указано в скобках. Прочерк — минеральные зерна цветных и/или благородных металлов не обнаружены. **Общее количество зёрен цветных или благородных металлов в псаммит-алевритовой фракции осадка на 1 см² полоски электропроводящего скотча (см. текст, описание методики).

Таблица 2. Химический состав минеральных зёрен цветных и благородных металлов в осадках Чукотского моря, мас.%

Зерно (строка)	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	Bi	As	Ag	Au	Pt	Cr	Ti	O	S	I	Si	Fe	Al	Ca	Mg	Cl	Сумма
1	93,89											0,60				0,34	0,47					95,30
2	81,12												13,18			2,03	0,88	1,03				98,24
3	81,09												2,96			1,49	2,22	7,74			0,30	95,80
4	63,29	33,03											1,74									98,06
5	68,91	16,91											7,16	3,06		5,50	0,48	0,25				102,27
6	54,63	36,26	2,06										2,65			0,79	0,37	0,34	0,21			97,31
7	36,54	24,90	35,77										5,05			1,74	0,59	0,63				105,22
8	3,42	3,27	72,55										15,38			0,54					0,38	95,54
9			7,05	68,37									33,37									108,79
10				93,33									12,30									105,63
11	31,63			53,21	1,62								14,71									101,17
12					79,67								1,94	0,25		0,33	1,89					84,09
13	0,99	0,81			10,34						17,91	0,66	2,49			0,67	68,08					101,95
14	1,01	0,72				2,24					82,98					4,46	0,27					91,68
15							33,52						8,07	14,41		0,84	23,28		0,20			80,32
16	8,46	2,17						93,72														104,35
17	1,51	1,50						88,99					8,01			0,35				0,32	0,20	100,88
18								72,18					19,12	9,39		1,08	0,53	0,46		0,52	0,42	103,70
19								37,16					39,07	0,31	5,15	15,43	0,55	0,93	1,61	1,79		102,00
20	41,04	25,74						23,65					4,84	0,35		1,70	0,34					97,66
21	81,47	1,30						13,87														96,64
22	5,07	3,56						5,95	85,65				0,50			1,99						102,72
23								1,83		78,96		3,04	15,27			1,21			0,26			100,57

Примечание. Пустые ячейки — элемент не обнаружен.

табл. 2, строка 22). Установлено присутствие в осадках редких частиц платиноидов — Pd, Pt — с примесью других металлов (табл. 1; табл. 2, строка 23).

Исследование показало, что минеральные зёрна цветных и благородных металлов распределены в осадках Чукотского моря неравномерно. Варьируется не только количество (плотность распределения) зёрен, но и сам набор металлов, а также образующих ими минеральных фаз. Наиболее обогащённые донные отложения у берегов Аляски и Чукотки (в первую очередь западное мелководье) с продолжением в южную часть Южно-Чукотской котловины, а также каньона Геральд (рис. 1; табл. 1). Значительная плотность распределения минеральных зёрен цветных металлов отмечена также вблизи

м. Хоп, у юго-восточных берегов о-ва Врангеля, в привершинной части и на южном склоне банки Геральд (рис. 1а; табл. 1). Вместе с тем осадки юго-западного мелководья о. Врангеля и Берингова пролива таких зёрен вообще не содержат либо содержат, но единичные. Большинство изученных осадков — кроме тех, что отобраны у о. Врангеля, Геральд, на северном склоне банки Геральд, вблизи западного побережья Аляски — содержит примесь Cu, Zn ~1–3 мас.%. Наиболее стабильно примесь фиксируют в отложениях Южно-Чукотской котловины и на прилегающих участках морского дна. Вероятно, это Cu–Zn-частицы субколлоидной, <1 мкм размерности (химический состав таких мелких частиц не может быть надёжно зафиксирован

при рентгеноспектральном электронно-зондовом микроанализе), скапливающиеся в пониженных формах рельефа в результате литодинамических процессов.

Наибольший интерес среди изученных осадков центрального и внешнего шельфа, безусловно, представляют осадки каньона Геральд. В южной части каньона отмечено максимальное количество минеральных зёрен Au (относительно других изученных осадков), значительное — окисленного Ag; распространены Cu–Zn-интерметаллиды (табл. 1). В северной части каньона доминируют частицы окисленного Zn и цинкистой Cu, а также некоторых других оксидов и интерметаллидов. Осадки у берегов о. Геральд и Аляски (вблизи м. Хоп) примечательны единичными зёрнами очень редких для Чукотского моря платиноидов.

В связи с тем что осадки Чукотского моря формируются главным образом из обломков механически выветрелых горных пород, снесённых с суши (абразия берегов) и/или поступивших при местном размыве дна [8], особенно важным при выяснении источников обнаруженных в них (осадках) зёрен цветных и благородных металлов представляется геологическое строение (металлогения) окружающей суши. Известно, что в пределах области питания Чукотского моря терригенным материалом находится по крайней мере несколько металлогенических зон и районов, объединяющих десятки коренных и россыпных месторождений и проявлений Sb, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Ag, Au, Fe, Mo, Hg, Sb (рис. 1). Практически все изученные осадки содержат в том или ином количестве частицы именно этих металлов. Больше всего частиц отмечено в донных осадках тех районов, где рудные месторождения суши расположены максимально близко к берегу — вплоть до побережья (например, западное мелководье Чукотки) либо наблюдаются местный размыв морского дна, вероятное вскрытие коренного источника на днище и/или склонах подводной морфоструктуры с накоплением продуктов разрушения вблизи источника — в углублённой форме-коллекторе или у подножия возвышенности (каньон Геральд, банка Геральд). Полученные результаты, подкреплённые данными других исследователей [1, 4, 5, 9, 10], указывают на то, что источник минеральных зёрен цветных и благородных металлов в осадках Чукотского моря — металлоносные геологические формации суши, имеющие продолжение на шельфе. Распределение зёрен проис-

ходит в процессе механической дифференциации осадочного материала и контролируется размером, формой, удельным весом обломков минералов и горных пород при важной роли течений (их направления и скорости), ледовой обстановки, морфологии морского дна (рис. 1).

Полученные результаты могут быть использованы при организации и проведении исследований, направленных на получение более точных количественных и качественных характеристик россыпей (россыпепроявлений, металлоносных осадков) на шельфе Чукотского моря с выявлением коренных источников ценных металлов. В центральной и северной частях моря первоочередное внимание следует обратить на район каньона Геральд.

Работа выполнена в рамках российско-американского проекта долгосрочного мониторинга Арктики RUSALCA при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15–05–05680-а, № 16–35–00364-мол_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванова А.М., Смирнов А.Н., Ушаков В.И.* Кайнозойский рудогенез в шельфовых областях России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2005. 167 с.
2. *Коучмен Л.К., Огород К., Трупп Р.Б.* Берингов пролив. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 199 с.
3. *Grebmeier J.M., Cooper L.W., Feder H.M., Sirenko V.I.* // Progress Oceanog. 2006. V. 71. № 2–4. P. 331–361.
4. Геология и полезные ископаемые России. Т. 5. Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1. Арктические моря. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 468 с.
5. *Флеров И.Б., Дундо О.П., Гусев Е.А., Сухорослов В.Л.* // Руды и металлы. 2011. № 3/4. С. 165–166.
6. *Батулин Г.Н., Дубинчук В.Т.* // ДАН. 2011. Т. 440. № 1. С. 93–99.
7. *Колесник О.Н., Колесник А.Н.* // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 853–866.
8. *Кошелева В.А., Яшин Д.С.* Донные осадки арктических морей России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. 286 с.
9. *Додин Д.А.* // Литосфера. 2009. № 5. С. 15–35.
10. *Сидоров А.А., Волков А.В.* // ДАН. 2014. Т. 459. № 3. С. 345–348.