ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2024, том 518, № 1, с. 45–56

ГЕОХИМИЯ

УДК 551.583.7(268.6)

БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ В СОВРЕМЕННЫХ ДИАТОМОВЫХ ИЛАХ ЧУКОТСКОГО МОРЯ: ПРИЗНАКИ ТЕХНОГЕННОГО ОБОГАЩЕНИЯ

© 2024 г. А. С. Астахов[1], Н. В. Астахова[1,*], Д. В. Ким[1], В. О. Крутикова[2]

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 13.02.2024 г.
Поступило 13.02.2024 г.
После доработки 18.04.2024 г.
Принято к публикации 02.05.2024 г.

Изучено содержание и распределение благородных металлов в тонкозернистых донных осадках юго-западной части Чукотского моря, накопившихся в техногенный период (последние десятилетия). Показано повсеместное или локальное обогащение относительно средних содержаний в земной коре серебром, золотом, платиной и палладием, а также многократное обогащение их золотом и палладием относительно дотехногенных (позднеголоценовых) отложений. С использованием методов многокомпонентного статистического анализа общего химического состава осадков показаны различия условий накопления благородных металлов в позднеголоценовых и современных отложениях, определены источники поступления и обоснована возможность техногенного обогащения последних.

Ключевые слова: донные осадки, Чукотское море, золото, платиноиды, течения, геохимия, техногенные отложения, органический углерод, гранулометрический состав, многокомпонентный статистический анализ

DOI: 10.31857/S2686739724090057

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к накоплению благородных металлов в современных морских осадках возник после открытия золотоносности чёрных сланцев, месторождения которых приурочены к отложениям явно или предполагаемого морского происхождения. Особое внимание заслуживает Чукотское море, на побережьях которого известны многочисленные коренные и россыпные месторождения золота и серебра [1]. Это мелководное море, более 85% площади которого занимают глубины менее 200 м. В центральной зоне шельфа расположена обширная выровненная аккумулятивная Южно-Чукотская равнина (рис. 1) с глубинами пределах 45–55 м [2]. Этот район Чукотского моря находится в зоне взаимодействия тихоокеанских вод, поступающих через Берингов пролив, и холодных вод Сибирского прибрежного течения (СПТ), поступающих из Восточно-Сибирского моря вдоль побережья Чукотки (рис. 1). Струи течений в центральной части бассейна формируют халистазу, куда привносят большое количество терригенной и биогенной взвеси. В относительно спокойных гидродинамических условиях во внутренней части этой халистазы происходят осаждение тонкозернистого материала и устойчивое длительное накопление осадков, обогащенных органическим углеродом и кремнистыми остатками диатомей [1]. В этих осадках часто отмечались повышенные содержания и минералогические находки благородных металлов (БМ) [3–6]. Предполагалось, что золото и серебро поставляется в осадки Чукотского моря в основном от побережья Чукотки, где известны и эксплуатируются многочисленные россыпные и рудные месторождения [5, 6], а платиноиды с тихоокеанскими водами от побережья Аляски [6–8]. Установлено обогащение поверхностного слоя шельфовых осадков золотом [6], что дало основание предполагать

[1]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточное отделение Российской Академии наук, Владивосток, Россия
[2]Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина, Дальневосточное отделение Российской Академии наук, Хабаровск, Россия
**E-mail: n_astakhova@poi.dvo.ru*

дополнительное поступление его из-за разработки россыпных и рудных месторождений на суше, начавшееся в середине 20 века [8, 9].

Целью данной работы было изучение масштабов первичного (синседиментационного) обогащения благородными металлами современных тонкозернистых илов внутреннего шельфа Чукотского моря, накопившихся в техногенный период, сопоставление с дотехногенными отложениями и выявление возможных источников БМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач в 95 рейсе НИС "Академик М.А. Лаврентьев" в 2021 г. с помощью бокскорера были отобраны пробы поверхностного слоя осадков по профилям, пересекающим Южно-Чукотскую равнину (рис. 1). Для изучения из бокскорера отбирался верхний горизонт (1–2 см) осадка. Согласно имеющимся данным, донные осадки в этой части Чукотского моря накапливались со скоростью от 0.4 до 8.0 мм/год [10–12]. Соответственно, изученный слой 1–2 см осадка накапливался за последние 50 лет или позднее, преимущественно за последние 20–30 лет и, соответственно, в период освоения месторождений на суше [8, 9].

После отбора пробы замораживались при температуре –20°С, высушивались в лиофильной сушилке и растирались в агатовой ступке для последующих анализов. Определение содержания золота и платиноидов выполнялась в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТиГ ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре ICP-MS Elan 9000 с предварительным химическим концентрированием путём соосаждения с теллуром [13]. Из общей пробы 10 грамм для анализа откватовывались навески 2 г. Для химической подготовки формировались партии из 15±1 проб с обязательным добавлением стандартного образца, холостой пробы и одной пробы из предыдущего анализа. По данным внутрилабораторного контроля пределы обнаружения элементов составили (мкг/т): Au — 0.07, Pt — 0.01, Pd — 0.04, Ru — 0.56, Rh — 0.78, Ir — 0.13. Ошибка анализа при сопоставлении со стандартом WMG-1a (CCRMP, Канада) была (%): Au — 5, Pt — 8, Pd — 13, Ru и Rh — 3, Ir — 9. Содержания серебра определены в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 (Agilent Technologies). Пробоподготовка — кислотное разложение ($HClO_4$+HNO_3+HF) навески 50 мг. Предел обнаружения составил 50 мг/т, ошибка анализа – 16%.

Содержание биогенных элементов, гранулометрический и химический состав этих проб были изучены ранее [12]. Типизация осадков выполнялась на основе их гранулометрического состава по соотношениям пелитовой (<4 мкм), алевритовой (4–65 мкм) и песчаной (>65 мкм) фракций [14]. Статистическая и графическая обработка результатов исследований проводилась в пакетах стандартных программ EXCEL, STATISTICA-10, Surfer-12 (расчёт координатной сети методом кригинг).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные осадки представлены обводнёнными диатомовыми алевритовыми илами (алевритами), за исключением единичных проб, отобранных ближе к береговой линии и содержащих значительную примесь песка (табл. 1). Содержание аморфного кремнезёма в алевритах достигает 18%, что позволяет относить большую часть их к слабокремнистым диатомовым илам (табл. 1). Самые тонкозернистые осадки, обогащённые органическим углеродом и остатками диатомей, тяготеют к северо-западной части полигона, а также встречаются в виде пятен в его центральной части. Содержание $C_{орг}$ варьирует от 0.3% в песчаных осадках до 2.5% в алевритах.

По сравнению со средними содержаниями в земной коре [15] повышенные концентрации серебра (табл. 1) установлены во всех пробах (коэффициент концентрирования (КК) 1.4–2.4), в большинстве проб (в 43 из 47) – золота (КК 2.2–67.5), в 16 пробах – палладия (КК 1.6–6.1) и в 7 – платины (КК 2.2–121.8). Содержания рутения во всех пробах оказались меньше кларковых (табл. 1), содержания же иридия и родия в подавляющем большинстве проб оказались ниже предела чувствительности метода. Распределение коэффициента концентрирования в поверхностных осадках Южно-Чукотской равнины для БМ, чьи содержания превышают средние в земной коре, представлены на рис. 2.

При анализе карт распределения БМ (рис. 2) можно выделить различные тенденции. Серебро и, частично, палладий обогащают осадки центральной части полигона, где накапливаются наиболее тонкозернистые и обогащённые органическим углеродом осадки (рис. 3). Максимальные же содержания платины и палладия тяготеют к западной части полигона, где завершающая

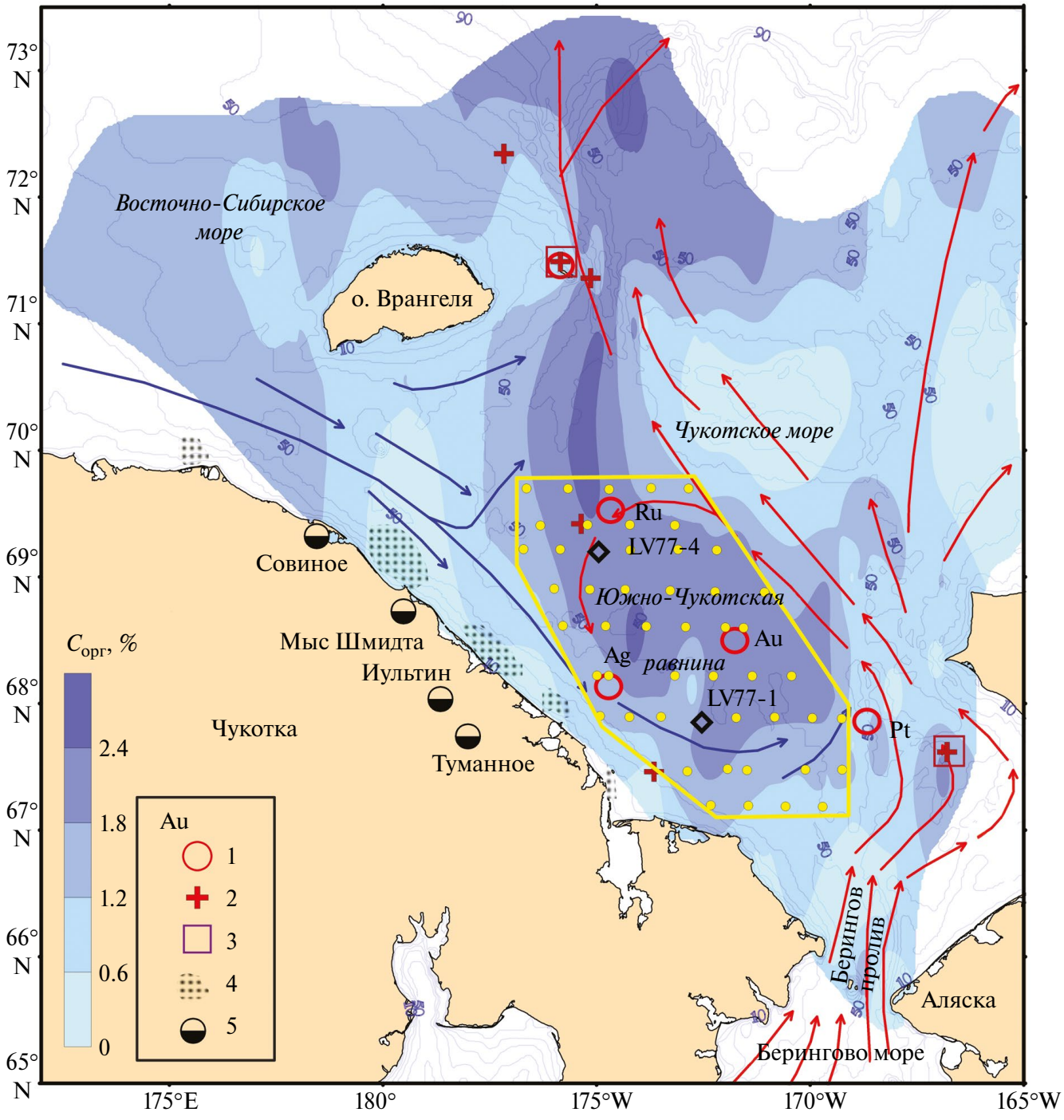

Рис. 1. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в поверхностных осадках Чукотского моря (по [4]), элементы океанологических условий, геохимические аномалии и минералогические проявления благородных металлов, местоположение района исследований (желтый многоугольник и точки). 1 — геохимические аномалии благородных металлов в донных осадках [4]; 2–3 — минералогические находки самородных металлов [5]: 2 — золота, 3 — платины; 4 — участки шельфа с выявленной россыпной золотоносностью [1]; 5 — основные районы разработки россыпных и рудных месторождений золота и полиметаллов (Иультин) в прибрежной зоне Чукотки [7, 9]. Красными и синими стрелками показано распространение тихоокеанских вод и вод Сибирского прибрежного течения соответственно.

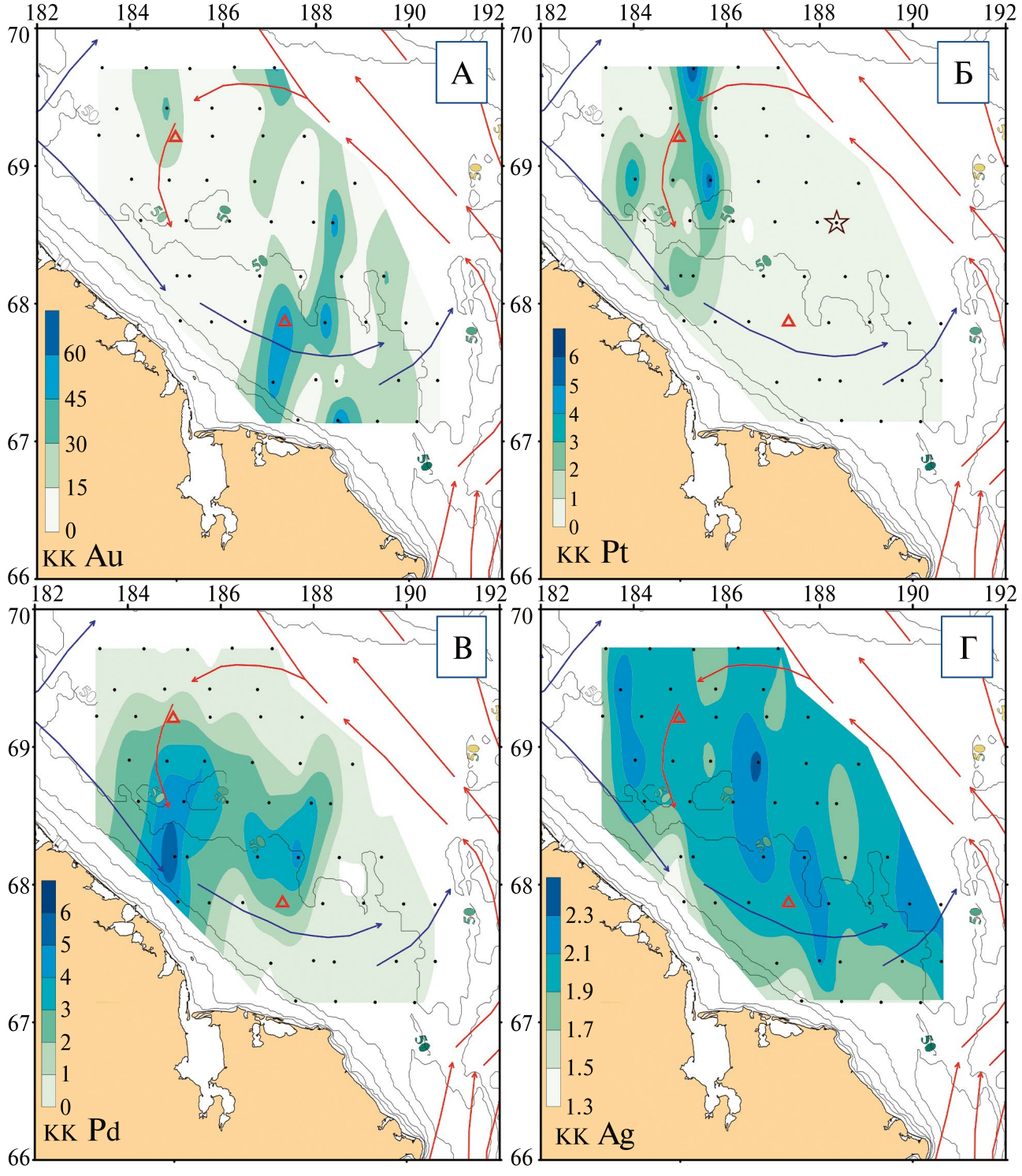

Рис. 2. Распределение коэффициента концентрирования (КК) благородных металлов в поверхностном слое осадков. Красными треугольниками показаны станции LV77-1 и LV77-4 [6], использованные для характеристики позднеголоценовых отложений, звёздочной на диаграмме Б — станция 95-34, с аномальным содержанием платины, не использованная при построении карты.

циклонический круговорот ветвь тихоокеанских вод смешиваются с водами СПТ (см. рис. 1). При построении карты распределения платины не учтена проба 95-34 (рис. 2 Б) с резко аномальным содержанием (0.07 г/т), превосходящим фоновые концентрации почти на два порядка. Золото весьма неравномерно обогащает осадки восточной части полигона, где воды СПТ отходят от берега и поворачивают на северо-восток, входя затем в контакт с тихоокеанскими водами (рис. 2 А). В этой же зоне ранее были отмечены аномальное содержание (0.3 г/т) и минералогические находки золота в верхних десяти сантиметрах колонки LV77-1 [6].

В распределении золота и платины в северо-западной и юго-восточной частях полигона отмечается некоторая “мозаичность”, связанная с наличием проб с высокими и аномальными содержаниями, соседствующими с фоновыми. Подобная, но менее выраженная, субширотно-ориентированная изменчивость прослеживается и в распределении серебра (рис. 2 Г), а также пелитовой фракции осадков и органического углерода (рис. 3). Она могла возникнуть из-за наличия субширотно ориентированных понижений и поднятий на шельфе, наследующей фрагменты затопленной речной сети [2]. Необходимо также учитывать возможность ледового разноса крупных зёрен металлов от побережья. Обогащённый золотом осадок, захваченный припайными льдами на мелководье или выносимый речными льдами, может попадать в илистые осадки глубоководных районов при таянии этих льдов на контакте с тёплыми тихоокеанскими водами, а также на всём пути их дальнейшей транспортировки.

Для выявления зависимостей между содержаниями БМ, и вещественным составом изученных проб были выполнены корреляционный, факторный и кластерный анализы по массиву из 46 проб и 22 переменных, включающих гранулометрические фракции, БМ, $C_{орг}$, и химические элементы, имеющие достаточно хорошую положительную или отрицательную корреляцию с БМ (рис. 4).

При анализе корреляционной матрицы выявлено, что значимые корреляционные связи с другими химическими элементами и фракциями осадков у золота и платиноидов, почти полностью отсутствуют. Серебро же имеет значимые положительные корреляции с большинством макро- и микроэлементов, $C_{орг}$ и алевритом. Относительно высокая, но не значимая

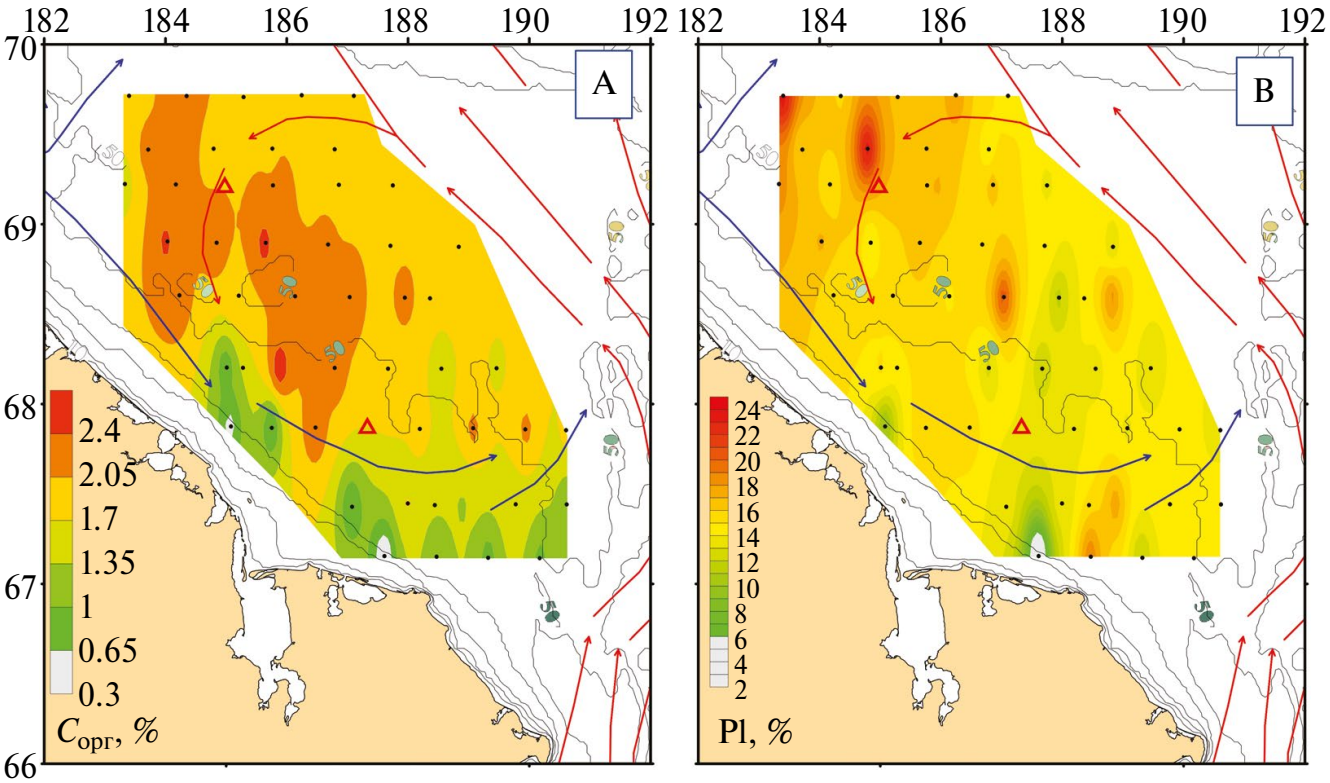

Рис. 3. Карты распределения органического углерода (А) и гранулометрической фракции менее 4 микрон (В) в поверхностных осадках.

положительная корреляция у золота имеется с Ru; у платины – с Pd и $C_{орг}$ и пелитом; у Pd значимые положительные связи отмечаются с Pt, слабые – с As, K, Sb, $C_{орг}$. Данные R-кластерного анализа (рис. 4) подтверждают результаты корреляционного: обособляются пары элементов Au–Ru, Pd–Pt и ассоциация Ag–алеврит-$C_{орг}$-комплекс элементов. Эти результаты не подтверждают имеющуюся точку зрения об ассоциации золота и некоторых платиноидов с органическим веществом и крупными фракциями осадков в этом районе [2, 6], Учитывая особенности распределения $C_{орг}$. (рис. 3 А) и БМ (рис. 2) в поверхностном слое осадков, можно предполагать, что в данном случае основную роль играет локализация источников и неравномерность поступления БМ в бассейн от прилегающих побережий.

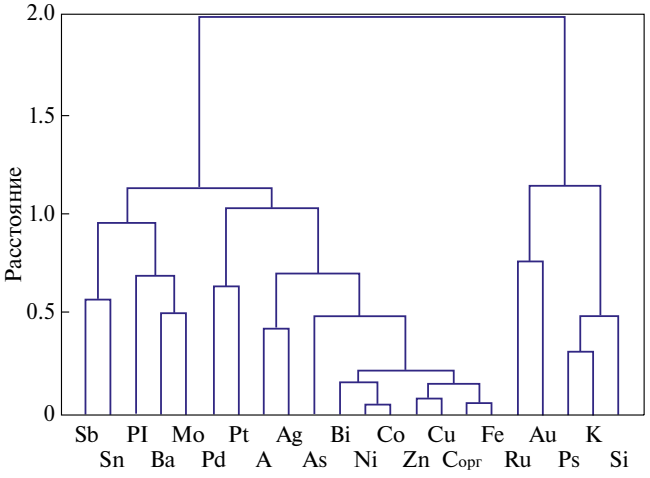

Рис. 4. Дендрограмма связей между химическими элементами и гранулометрическими фракциями в поверхностных осадках (22 переменных, метод полной связи, 1-r Пирсон).

Более значимые выводы можно сделать исходя из результатов R-факторного анализа. (рис. 5). Основной вклад (41%) в изменчивость выборки дает фактор 1, определяемый соотношением элементов, накапливающихся в крупнозернистых (обломочных) и тонкозернистых (глинистых) компонентах осадка, что в общем виде подтверждает известные для этого бассейна закономерности [4]. Соответственно, положительный знак этого фактора имеют $C_{орг}$, Fe и многочисленные микроэлементы в том числе халькофильный элемент *серебро*, накапливающиеся совместно или в составе глинистых минералов, органического вещества, тонкодисперсных гидроксидов железа. Отрицательные значения фактора имеют элементы обломочных минералов: кварца (Si) и полевых шпатов (K), небольшой вклад дают Au и Ru. Учитывая однородное распределение серебра (рис. 2 В), близкое распределению $C_{орг}$ (рис. 5), повсеместные находки его минеральных зёрен микро- и наноразмерности [5, 6], можно заключить, что распределение серебра по площади (рис. 2 Г) почти полностью определяется дифференциацией осадочного вещества при осаждении. Тесная корреляция Ag с Fe, $C_{орг}$, цветными металлами позволяет предположить, что серебро частично переносится в виде органических коллоидных соединений или с органическими остатками.

Фактор 2 определяется совместным накоплением в западной и центральной частях полигона ряда металлов (Mo, Sb, Ba, Bi), а также части Ag без связи с органическим веществом, хотя по отдельности эти элементы имеют значимую положительную корреляцию с ним. Возможно, эта ассоциация определяется различиями в составе терригенного материала, поставляемого с ближайшего побережья Чукотки. Эти металлы присутствуют в виде примеси в полиметаллических и олово-вольфрамовых месторождениях и рудопроявлениях Иультинского рудного узла, и на острове Врангеля [16].

Фактор 3 определён совместным накоплением Pd и Pt в западной части, а золота – в восточной части полигона, вследствие различных источников их поступления. Учитывая сродство Pd и Pt с органическим веществом в этом факторе (рис. 5) и отсутствие такового у золота, противостояние их в факторе 3 может быть объяснено и различными способами транспортировки. Если для золота можно предполагать преобладающий перенос в форме минеральных частиц микро- и наноразмерности, [5, 6, 17] при резко неравномерном распределение металла в пробах (рис. 2 А), то для Pd и Pt можно предполагать преобладающую поставку в составе органоминеральных соединений, коллоидов или в растворённой форме [18].

Фактор 4 определяется накоплением рутения, а также части серебра, золота и палладия в северо-западной части полигона (рис. 2 А, В, Г) как возможный результат совместной поставки с тихоокеанскими водами или от острова Врангеля. Это подтверждается противопоставлением их характерным элементам (Ba, Bi, Mo, Co, Ni) терригенного вещества, поставляемого с ближайшего побережья Чукотки. Фактор 5 определяется совместным накоплением в центральной части полигона палладия, возможным источником которого предполагаются тихоокеанские воды, и

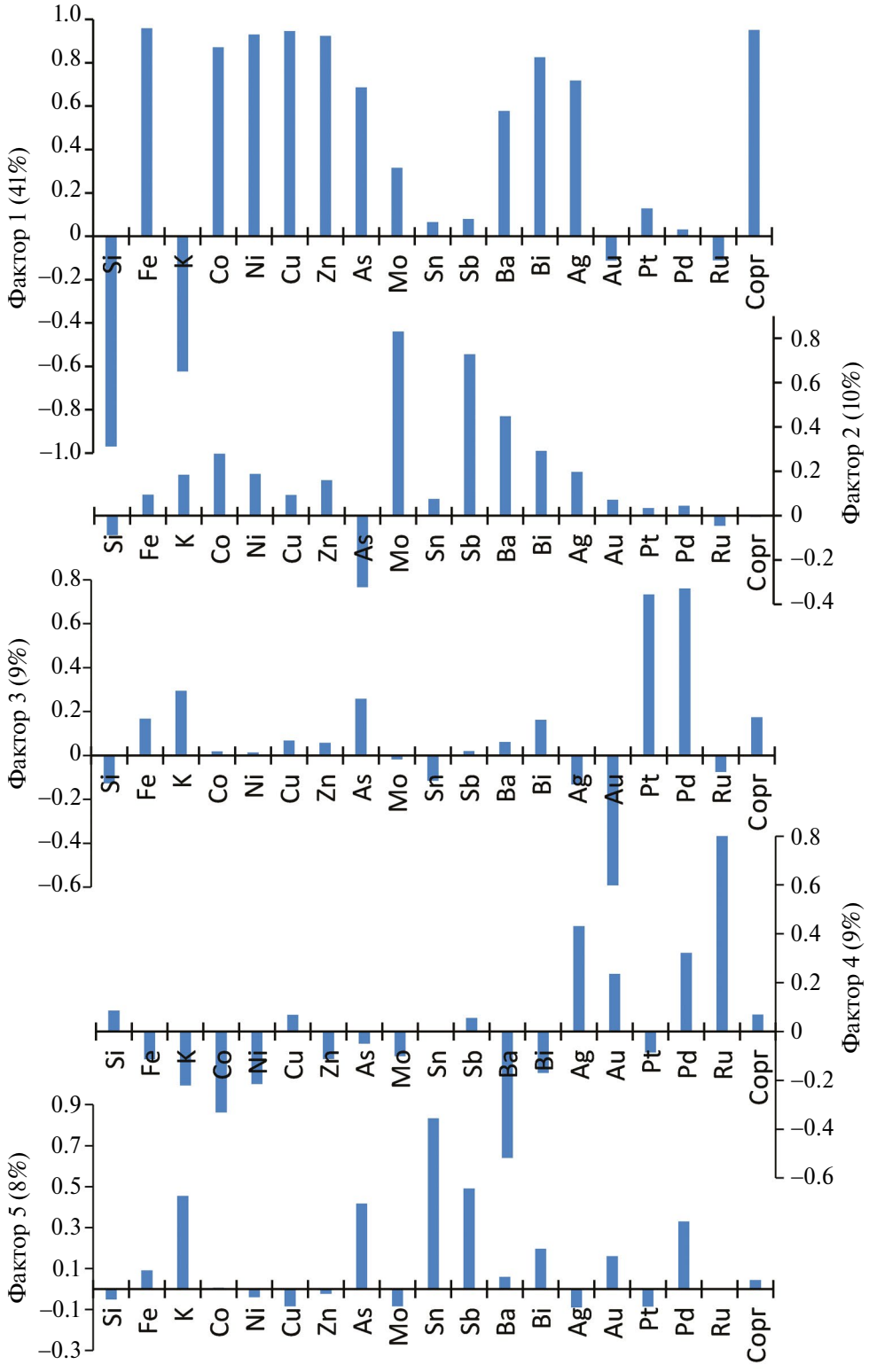

Рис. 5. Значения факторных нагрузок факторов 1–5 для химических элементов 46 проб поверхностного слоя осадков шельфа Чукотского моря.

элементов (Sn, Sb, As, Bi), характерных для рудных месторождений и формаций Иультинского узла [5, 6].

Ранее определение содержаний БМ тем же методом и с подобным статистическим анализом распределения были выполнены по колонкам LV77-1 и LV77-4 из этого района (рис. 1) [6]. За исключением двух проб поверхностных осадков изучались дотехногенные отложения позднеголоценового возраста, и соответственно, полученные результаты по ним можно рассматривать как модель природного распределения БМ в данном районе. В них также проявлена ассоциация Pt-Pd, установленная нами для современных осадков (рис. 6 А), и ассоциация характерных элементов, поступающих от ближайшего побережья Чукотки (Sb–Mo–Ni–Co) [6].

Разница в содержаниях БМ и современных осадках относительно позднеголоценовых оказалась значительной: средние содержания золота увеличились почти в три раза (от 16.6 до 36.6 мг/т), а палладия — в шесть раз (от 1.8 до 10.5), хотя содержания органического вещества и гранулометрический состав, которые обычно определяют изменчивость распределения БМ в осадочных толщах, не изменились. Содержания платины оказались близкими: 3.22 в современных осадках и 3.82 — в позднеголоценовых (26.04 — с учётом пробы 95-34). Содержание рутения несколько уменьшились.

Возможность дополнительного обогащения золотом осадков Чукотского моря в связи с дополнительной поставкой его с прилегающей суши, где разрабатываются его россыпные и рудные месторождения, ранее обсуждалась [6, 7]. В нашем случае, помимо трёхкратного увеличения средних содержаний, смена источников и способов поступления металла подтверждается коренным изменением парагенетических ассоциаций золота с другими элементами и гранулометрическими фракциями. Исчезли значимые положительные корреляции Au с $C_{орг}$, алевритовой и песчаной фракциями осадков, а с $C_{орг}$ и Ps появилась даже отрицательная корреляция при положительной корреляции с Pl (рис. 6).

Указанные изменения в содержаниях и парагенетических ассоциаций золота в современных осадках могут быть объяснены не только увеличением его поставки с суши, сколько возможным увеличением его транспортировки в тонкодисперсной форме, в составе органоминеральных соединений, коллоидных или истинных растворов. Важное значение при этом может иметь разработка рудных месторождений, начавшаяся на Чукотке в последние десятилетия [7, 9], при которой БМ поступают в водные потоки в тонкодисперсных форме, в виде различных органоминеральных соединений или растворов без связи с органическим веществом. При разработке же россыпей процесс выноса металла подобен его природному стоку, при котором увеличивается также и вынос органического вещества.

Парагенетические же связи палладия изменились в меньшей степени, исчезла ассоциация с крупными фракциями осадков, но сохранилась связь с платиной и через неё с органическим веществом, появилась корреляция с мышьяком и калием (рис. 6). Можно предполагать, что избыточная часть металла поступала в формах, отличных от природной поставки. Появившаяся корреляция с мышьяком и калием дает основание полагать, что с имело место поступление из каких-то относительно локальных источников. Резкое увеличение содержаний палладия в современных осадках частично может быть объяснено расположением колонок LV77-1 и LV77-4 вне зоны современного накопления палладия (рис. 2 В).

Учитывая достаточно узкую локализацию участков накопления золота и палладия, и произошедшие изменения в способах поставки металлов, что отразилось на парагенетических ассоциациях, увеличение накопления БМ можно объяснить дополнительным поступлением с суши в тонкодисперсной форме, в составе органоминеральных соединений, коллоидных или истинных растворов, что не характерно для россыпей, но возможно при освоения рудных месторождений. В контексте этого не вызывает сомнения поступление золота от северного побережья Чукотки, где в последние десятилетия добыча россыпного золота почти прекратилась, но начали разрабатываться золоторудные месторождения Майское, Совиное, Туманное и др. (рис. 1). Аляска же является традиционным районом разработки россыпных и рудных месторождений золота, продолжающейся и до настоящего времени, освоение рудных месторождений платины началось в середине 20-го века [7–9]. Резкое увеличение содержаний палладия и, возможно, платины, в современных осадках и обогащение ими западной части полигона (рис. 2) не полностью укладывается в концепцию поставки их тихоокеанскими водами со стороны Аляски. В качестве возможных источников их следует также рассматривать Au–Ag-формации Северной Чукотки, о платинометалльной

Таблица 1. Содержание благородных металлов (мг/т), $C_{орг}$, биогенного кремнезёма ($SiO_{2ам}$) и гранулометрический состав (Ps — песок, A — алеврит, Pl — пелит) (%) поверхностного слоя осадков юго-западного шельфа Чукотского моря. Жирным шрифтом выделены содержания БМ, превышающие кларковые в земной коре (по [15]: Ag — 7.3, Au — 3.5, Pt — 5.7, Pd — 9.0, Ru — 4.0 мг/т)

Номера станций*	Ag	Au	Pt	Pd	Ru	$C_{орг}$*	$SiO_{2ам}$*	Pl*	A*	Ps*
95-12	**169.2**	**51.5**	3.3	1.63	0.01	2.12	16.48	15.93	83.82	0.24
95-13	**152.3**	**120.2**	2.4	3.61	0.08	1.97	15.41	23.54	76.46	0.00
95-14	**127.1**	**8.5**	0.9	1.32	0.04	2.01	17.55	16.49	83.44	0.06
95-15	**144.5**	**19.9**	1.5	2.46	н. о.	1.76	15.41	14.23	85.30	0.46
95-16	**138.2**	**167.8**	1.0	1.09	0.03	1.77	15.20	14.59	84.57	0.83
95-17	**144.4**	**58.6**	1.9	1.43	0.03	1.69	15.20	17.81	82.18	0.01
95-18	**138.6**	**6.6**	**35.2**	0.67	н. о.	1.95	17.98	16.86	82.87	0.27
95-19	**143.3**	**67.9**	3.2	0.87	0.06	2.38	16.27	15.82	83.99	0.20
95-20	**129.5**	н. о.	0.7	6.73	н. о.	1.88	16.91	23.56	76.44	0.00
95-21	**116.3**	**14.9**	1.1	1.62	н. о.	1.50	14.77	18.45	81.42	0.13
95-22	**141.7**	**34.8**	5.6	**14.69**	н. о.	2.11	13.27	14.92	84.90	0.19
95-23	**150.3**	**11.4**	3.1	4.42	0.20	2.14	15.84	17.15	82.79	0.05
95-24	**131.7**	**74.1**	1.2	1.53	0.04	1.86	15.62	16.40	83.41	0.20
95-25	**145.0**	**43.0**	1.0	2.56	0.34	1.85	14.34	13.83	85.13	1.04
95-26	**142.9**	н. о.	0.7	1.51	0.03	1.93	13.91	13.45	86.17	0.39
95-27	**142.8**	**2.5**	1.7	1.21	н. о.	2.04	14.55	14.91	84.02	1.07
95-28	**174.0**	**67.0**	н. о.	**20.09**	0.25	2.21	16.48	15.32	84.36	0.31
95-29	**132.5**	**25.7**	**33.3**	**36.62**	0.10	2.52	14.55	16.78	83.04	0.18
95-30	**153.1**	**39.0**	**12.6**	**33.23**	0.19	2.29	13.91	14.06	85.52	0.41
95-31	**166.4**	**18.1**	**25.3**	**26.42**	0.16	2.47	14.34	17.16	82.79	0.06
95-32	**149.4**	**7.8**	0.9	**17.27**	0.12	2.24	14.55	15.06	84.79	0.14
95-33	**154.0**	**28.0**	н. о.	**39.88**	0.17	2.04	14.13	15.03	84.75	0.22
95-34	**134.4**	**192.8**	**694.4**	**22.75**	0.13	1.77	12.63	18.32	81.67	0.01
95-35	**146.7**	**26.6**	н. о.	**31.09**	0.04	2.22	14.77	11.71	87.66	0.63
95-36	**140.8**	**50.9**	н. о.	**19.33**	0.15	2.39	15.84	20.54	79.46	0.00
95-37	**155.7**	**15.7**	н. о.	**26.43**	0.18	2.30	16.27	14.87	84.82	0.30
95-38	**113.0**	**14.5**	**18.5**	**55.01**	0.20	0.77	7.71	15.11	81.79	3.10
95-39	**150.5**	**21.3**	**13.9**	**26.91**	0.13	2.66	13.06	15.20	84.69	0.11
95-40	**158.2**	**40.7**	н. о.	**36.76**	0.19	2.28	14.55	12.72	86.59	0.69
95-41	**159.3**	**13.6**	н. о.	**41.05**	0.27	1.98	12.63	12.24	86.38	1.38
95-42	**99.4**	**16.45**	3.2	**36.86**	0.13	0.53	5.99	9.94	50.79	39.27
95-44	**145.2**	**18.4**	0.2	4.41	0.15	2.32	12.20	15.67	84.30	0.04
95-45	**150.0**	**211.2**	н. о.	н. о.	0.57	1.77	11.56	13.67	86.28	0.05
95-46	**156.5**	**22.8**	н. о.	н. о.	0.13	2.14	11.77	13.88	85.63	0.49
95-47	**133.9**	**39.5**	н. о.	н. о.	0.12	1.55	11.34	13.52	86.31	0.17
95-48	**147.9**	**115.6**	н. о.	0.64	0.19	1.67	10.27	13.14	86.60	0.27
95-49	**170.8**	**22.8**	н. о.	2.32	0.16	2.13	10.92	14.37	85.58	0.05
95-50	**152.6**	**27.8**	3.3	0.02	0.13	1.76	9.20	13.17	86.68	0.15
95-55	**133.7**	**186.7**	н. о.	0.02	0.08	0.68	3.85	13.41	82.92	3.67
95-56	**157.2**	**29.5**	н. о.	1.10	0.35	1.72	8.13	13.39	85.07	1.53
95-57	**129.6**	**22.3**	н. о.	8.36	0.39	1.32	8.99	17.51	82.46	0.03
95-58	**137.9**	**107.6**	н. о.	0.19	0.07	1.63	8.56	14.92	84.91	0.16
95-59	**150.1**	**8.2**	н. о.	0.03	0.12	1.13	8.56	15.00	84.72	0.28
95-60	**123.6**	**46.0**	н. о.	н. о.	0.23	0.93	7.49	14.60	85.05	0.35
95-61	**118.6**	**48.0**	н. о.	0.47	0.05	0.87	6.64	12.10	78.30	9.60
95-62	**141.8**	**236.3**	н. о.	4.50	0.20	1.02	8.13	18.69	81.29	0.02
95-63	**102.5**	0.5	н. о.	н. о.	0.19	0.34	4.71	2.99	12.19	84.80

Примечание. н. о. – не определено (ниже предела обнаружения). * данные из [12], номера станций соответствуют указанным в [12] без первых двух букв.

минерализации в которых появились данные в последние годы [7, 19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые специализированные исследования по изучению распределения благородных металлов в тонкозернистых обогащенных остатками диатомей и органическим углеродом осадках южной части Чукотского моря, накопившихся за последние десятилетия, выявили локальное обогащение их относительно кларка в земной коре золотом, серебром, платиной и палладием. Локализация районов накопления указывает на поступление металлов от ближайших побережий Чукотки и Аляски с транспортировкой водами Восточносибирского прибрежного течения и тихоокеанскими водами, поступающими через Берингов пролив. При сопоставлении с отложениями, накопившимися в дотехногенный период (позднеголоценовыми), выявлено многократное обогащение современных осадков золотом и палладием, а также полное изменение парагенетических ассоциаций золота и платиноидов с органическим углеродом, другими химическими элементами, гранулометрическими фракциями. Результаты многокомпонентного статистического анализа, указывают на дополнительное накопление в осадках золота и платиноидов в формах, отличных от природной поставки. Локализацию участков их накопления свидетельствует о поступлении из районов суши, где в настоящее время ведется разработка рудных месторождений, при которой в природную среду металлы поступают преимущественно в виде истинных или коллоидных растворов, органоминеральных соединений, тонкодисперсных минеральных зёрен. Это северное побережье Чукотки, где рудные месторождения золота, содержащие платиноиды как неизвлекаемую примесь, разрабатываются три последние десятилетия, и частично побережье Аляски, где рудные месторождения золота и платиноидов разрабатываются с середины 20-го века. В формировании своеобразных техногенных ореолов рассеивания важную роль играют направление и интенсивность морских течений, определяющих локализацию мест накопления тонкой минеральной взвеси, и повышенная продуктивность планктона, определяющая возможность осаждения металлов, переносимых в составе коллоидов и органоминеральных соединений. Накопление палладия вблизи побережья Чукотки требует дополнительного изучения с позиций выявления

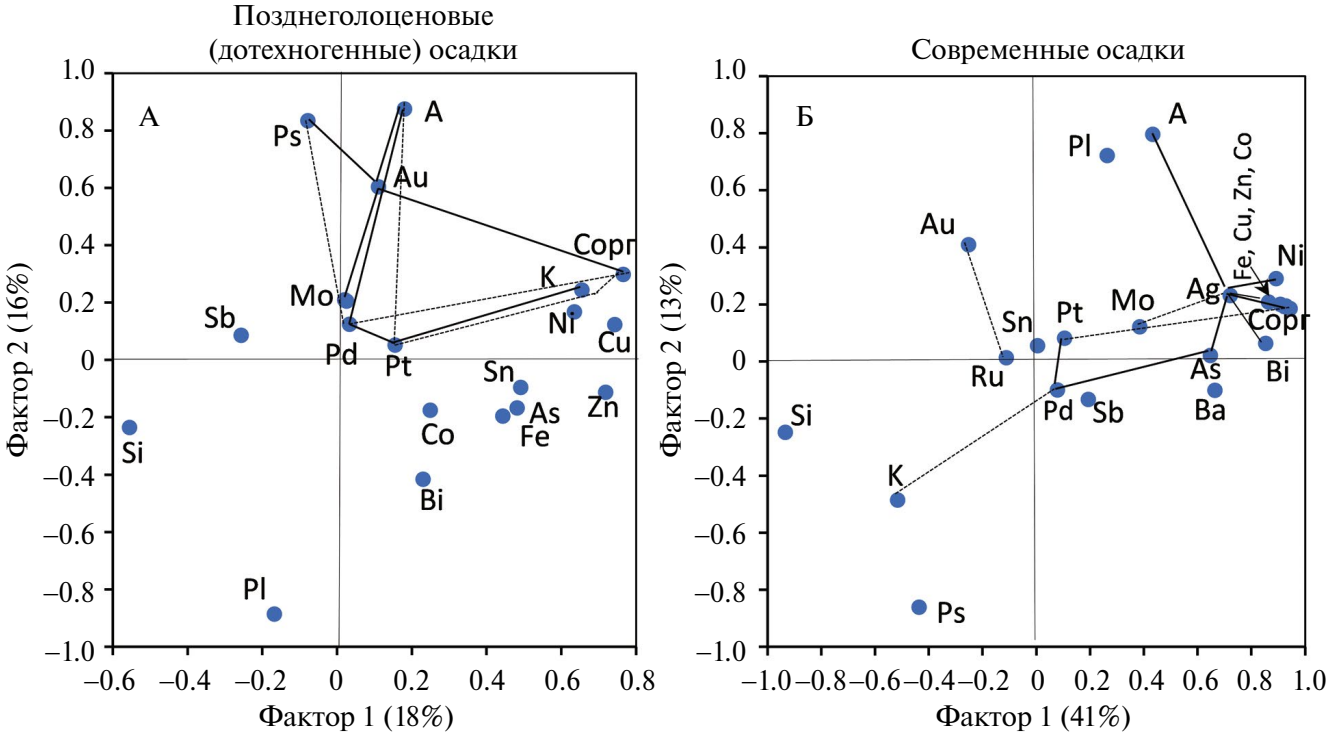

Рис. 6. Факторные диаграммы в пространстве первого и второго факторов для химических элементов и гранулометрических фракций (PL, A, Ps) позднеголоценовых (А) и современных (Б) осадков. *Линиями показаны* ***положительные*** *корреляции БМ с другими элементами: сплошными —* ***значимые****, штриховыми —* ***слабые****.*

коренных источников поступления и наличия природных (дотехногенных) концентраций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны капитану, команде и членам научной группы 95 рейса НИС “Академик М.А. Лаврентьев” за помощь в экспедиционных работах, а также Н.В. Зарубиной и К.И. Аксентову за помощь в выполнении аналитических исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерство науки и высшего образования РФ (госзадание ТОИ ДВО РАН, проект 121021700342-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольдфарб Ю. И.* Динамика формирования, классификация и возраст аллювиальных россыпей золота Северо-Востока Азии / Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2009. 48 с.
2. *Павлидис Ю. А.* Обстановка осадконакопления в Чукотском море и фациально-седиментационные зоны его шельфа. В кн.: Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. М.: “Наука”, 1982. С. 47–76.
3. *Астахов А. С., Колесов Г. М., Дударев О. В., Иванов М. В., Колесник А.Н.* Благородные металлы в донных осадках Чукотского моря // Геохимия. 2010. Т. 48. № 12. С. 1289–1301.
4. *Астахов А. С., Гусев Е. А., Колесник А. Н., Шакиров Р. Б.* Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 9. С. 1348–1364.
5. *Колесник А. Н., Колесник О. Н., Карабцов А. А., Бондарчук Н. В.* Минеральные зерна цветных и благородных металлов в поверхностном слое донных осадков Чукотского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2018. Т. 481. № 1. С. 76–80.
6. *Астахова Н. В., Колесник О. Н., Астахов А. С., Ши С., Ху Л., Алаторцев А. В.* Благородные металлы в голоценовых отложениях Чукотского моря // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 5. https://doi.org/10.15372/GiG2023174
7. *Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В., Галямов А. Л., Викентьев И. В., Тарасов Н. Н., Дистлер В. В., Лаломов А. В., Аристов В. В., Мурашов К. Ю., Чижова И. А., Чефранов Р. М.* Месторождения стратегических металлов Арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–509.
8. *Athey J. E., Werdon M. B.* Alaska’s mineral industry 2016: Special Report 72 / Alaska Division of Geological & Geophysical Surveys. [S. l.], 2017. 65 p. http://doi.org/10.14509/29748
9. *Волков А. В., Галямов А. Л., Сидоров А. А.* Проблемы освоения минеральных ресурсов Арктики (на примере Чукотки и Аляски) // Арктика: экология и экономика. 2018. № 4 (32). С. 4–14.
10. *Vologina E. G., Sturm M., Astakhov A. S., Shi Xuefa.* Anthropogenic traces in bottom sediments of Chukchi Sea // Quaternary International. 2019. V. 524. P. 86–92.
11. *Astakhov A. S., Xuefa Shi, Darin A. V., Kalugin I. A., Hu Limin, Tsoy I. B., Kolesnik A. N., Obrezkova M. S., Alatortsev A. V., Babich V. V., Plotnikov V. V.* Reconstructing ice conditions in the southern Chukchi Sea during the last millenniums based on chemical composition of sediments and diatom assemblages // Marine Geology. 2020. V. 427/ 106220.
12. *Kim D. V., Aksentov K. I., Astakhov A. S., Sattarova V. V., Ivanov M. V., Alatorsev A. V., Obrezkova M. S., Selutin S. A.* Geochemistry aspects of modern mercury accumulation in bottom sediments from the southwestern Chukchi Sea // Marine Pollution Bulletin. 2023. V. 189. P. 114768
13. *Jin X., Zhu H.* Determination of platinum-group elements and gold in geological samples with ICP-MS using sodium peroxide fusion and tellurium coprecipitation // J. Anal. Atom. Spectrom. 2000. V. 15. P. 747–751.
14. *Wentworth C. K.* A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments // Journal of Geology. 1922. V. 30. P. 377–392.
15. Интерпретация геохимических данных: Учеб. Пособие / Е.В. Скляров и др. Под ред. Е.В. Склярова. М.: Интермент Инжиниринг, 2001. 288 с.
16. *Бондаренко С. А., Виноградов В. А., Горячев Ю. В., Гусев Е. А. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Чукотская. Лист R-1, 2 – остров Врангеля. Пояснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 144 с.
17. *Горячев Н. А., Соцкая О. Т., Астахов А. С., Ши Сюефа, Михалицына Т. И., Аксентов К. И., Бердников Н. В.* Рудная минерализация в плейстоценовых отложениях пролива Лонга (Восточно-Сибирское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 37–41.

18. *Кубракова И. В., Набиуллина С. Н., Пряжников Д. В., Киселева М. С.* Органическое вещество как формирующий и транспортирующий агент в процессах переноса ЭПГ и золота // Геохимия. 2022. Т. 67. № 8. С. 741–749.

19. *Сахно В. Г., Кузнецов Ю. А., Дубков А. А., Ненахова Е. В.* О находках платиноидов в первичных рудах золотосеребряных месторождений северной Чукотки // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2019. № 3. С. 111–117.

20. *Русанов Р. В., Янникова Ю. Ю., Янникова Л. Ю.* Платиноносность Au-Ag формации на примере месторождения Валунистое (Чукотский автономный округ) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2019. № 4. С. 71–78.

PRECIOUS METALS OF THE CHUKCHI SEA DIATOM MUDS; TECHNOGENIC ENRICHMENT SIGNS

A. S. Astakhov[a,#], N. V. Astakhova[a], D. V. Kim[a], V. O. Krutikova[b]

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh February 13, 2024.
[a]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Science, Vladivostok, Russian Federation
[b]Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation
[#]E-mail: n_astakhova@poi.dvo.ru

The content and distribution of precious metals in fine-grained bottom sediments of the southwestern part of the Chukchi Sea have been studied. The ubiquitous or local enrichment of silver, gold, platinum and palladium according the earth's crust average, as well as the enrichment of sediments accumulated during the technogenic period (last decades) relative to pre-technogenic (Late Holocene) deposits with gold, platinum and palladium are shown. Using the methods of multicomponent statistical analysis of the total chemical composition of sediments, the differences in the conditions for the accumulation of precious metals in modern and late Holocene deposits are shown, possible sources of input are determined and the possibility of technogenic enrichment is substantiated.

Keywords: bottom sediments, Chukchi Sea, gold, platinum, silver, palladium, currents, geochemistry, technogenic enrichment, multicomponent statistical analysis