

УДК 504.422

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

© 2020 г. А. Ю. Мирошников¹, *, М. В. Флинт², Эн. Э. Асадулин¹,
М. Д. Кравчишина², В. Л. Лукша³, А. А. Усачева¹, Д. В. Рябчук⁴, Вл. Б. Комаров¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет, Москва, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: alexey-miroshnikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.05.2019 г.

После доработки 03.04.2020 г.

Принята к публикации 08.04.2020 г.

В сентябре 2017 г. при проведении комплексных исследований сибирских морей российской Арктики в рамках 69-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” было изучено радиационно-экологическое состояние донных отложений Восточно-Сибирского моря. По результатам γ -спектрометрического анализа было установлено, что в настоящее время удельная активность техногенного ^{137}Cs в осадках на два порядка ниже допустимого уровня и отражает влияние только глобальных выпадений из атмосферы. Установлено, что загрязненность осадков тяжелыми металлами также отсутствует. Донные осадки представлены пелитовыми, алевроито-пелитовыми и мелкоалевритовыми илами с содержанием пелитовых (<0.01 мм) фракций 40–80%. Западная и восточная части Восточно-Сибирского моря имеют отличия по характеру распространения и составу минеральных компонентов и элементному составу, что обусловлено влиянием водосборов рек Индигирки и Колымы, соответственно.

Ключевые слова: донные осадки, радиационное состояние, ^{137}Cs , тяжелые металлы, Восточно-Сибирское море

DOI: 10.31857/S0030157420040152

ВВЕДЕНИЕ

Окраинные моря Северного Ледовитого океана (СЛО) в настоящее время испытывают на себе интегрированное воздействие различных природных и антропогенных факторов, влияющих на их экологическое состояние. Продолжается сокращение ледяного покрова Арктики, меняются параметры стока рек, впадающих в арктический бассейн, усиливается воздействие климатических изменений на криолитозону. Параллельно возрастает интенсивность экономического освоения акваторий СЛО и прилегающих территорий суши: растут объемы морских перевозок, ведутся поиски и добыча углеводородов, работают горно-рудные предприятия.

Все эти процессы имеют самое прямое отношение к Восточно-Сибирскому морю (ВСМ), омывающему восточную часть арктического по-

бережья России от Ляховских островов и островов Анжу на западе до острова Врангеля на востоке. Континентальный сток, поступающий в ВСМ, находится в интервале 230–250 км³/год и занимает 10% общего объема речного стока во все арктические моря. В море впадает 49 рек, но более половины его обеспечивает Колыма (132 км³/год) и около четверти Индигирка (60 км³/год). Алазея, впадающая в 60 км от устья Индигирки, поставляет еще около 10 км³/год, а остальные реки несут в море около 35 км³/год. Общая площадь речных водосборных бассейнов составляет 1.35 млн км² [23].

Техногенное влияние на экологическое состояние ВСМ со стороны суши определяется хозяйственной деятельностью на площади его водосборной макроарены. Основными предприятиями являются горнорудные объекты, расположенные

в речных бассейнах Колымы и Индигирки, где разведаны и разрабатываются запасы золота, серебра, каменного угля, олова, сурьмы, вольфрама, свинца, цинка и др. руд. В результате создается крайне неблагоприятное сочетание высокой уязвимости компонентов речных экосистем, характеризующихся низкой устойчивостью и низкой восстановительной способностью, и наиболее “грязных” процессов, сопутствующих горнодобывающей деятельности. Основными загрязнителями, поступающими в ВСМ вместе с аллохтонным взвешенным веществом, могут быть соединения Cu, Fe, Zn и др. тяжелых металлов, а также нефтепродукты и фенолы. На естественный повышенный фон содержания микроэлементов может накладываться антропогенное воздействие размываемых рудных отвалов разведочных и эксплуатационных объектов и сточных вод горнодобывающих предприятий [1].

Радиационное состояние экосистемы ВСМ в настоящее время благополучное и определяется исключительно влиянием глобальных выпадений радионуклидов из атмосферы, а также выносом их части из водосборных бассейнов [6]. Какие-либо последствия подземных ядерных взрывов, активно производившиеся в СССР в народно-хозяйственных целях в период 1965–1988 гг., не затронули площади водосборной макроарены ВСМ [36]. Однако в качестве потенциальных источников радиоактивности необходимо отметить два радиационно-опасных объекта. В четырех километрах к востоку от г. Билибино на берегу ручья Большой Поннеурген, являющегося притоком Колымы пятого порядка, находится пока еще действующая Билибинская АЭС, единственная в мире атомная станция, расположенная в зоне вечной мерзлоты. Станция была введена в эксплуатацию в 1974 г., а окончательная остановка последнего четвертого блока запланирована на 2021 г. В период 1991–1998 гг. было зафиксировано 5 инцидентов, в двух из которых произошли утечки радиоактивных отходов в окружающую среду [19]. Кроме того, особенностью водно-графитовых реакторов БилАЭС является порождение больших объемов отработанного ядерного топлива (ОЯТ), вывоз которого на переработку пока не планируется в виду крайне высокой стоимости [3]. А это означает, что все ОЯТ будет оставаться на месте.

В декабре 2019 г. на берегу ВСМ в г. Певеке подключена к региональной энергосети уже запущенная плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) “Академик Ломоносов”, превышающая по мощности Билибинскую АЭС в полтора раза [30].

Таким образом, потенциальная вероятность радиационного загрязнения ВСМ возрастает, а оценка его экологического состояния в настоя-

щее время является крайне актуальной с точки зрения безусловной необходимости проведения наблюдений в дальнейшем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В августе 2017 года в ходе экспедиционных исследований в рамках 69-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Восточно-Сибирском море [34] на 17-ти морских станциях были получены пробы донных отложений. Работы проводились по двум субмеридиональным разрезам – Индигирскому и Колымскому, имевшим направление от приустьевых участков рек в сторону континентального склона, а также двум субширотным, соединяющим их в северной и южной частях (рис. 1).

Длина Индигирского разреза составила 610 км, а Колымского 530 км. Все станции были расположены в пределах континентального шельфа в диапазоне глубин от 14 до 59 метров.

Отбор проб донных отложений выполнялся с применением трубок Неймисто и дночерпателя Ван-Вина для получения образцов верхних слоев осадка. Также использовался пробоотборник ОКЕАН-0.25 с последующим вырезанием двух вертикальных колонок осадков пластиковыми трубчатыми сабкорерами диаметром 100 мм на глубину до 20 см. Одна колонка, получаемая разборным сабкорером, разрезалась вертикально на две половины для дальнейшего литологического описания и опробования. Вторая колонка секционировалась горизонтально на слои по 10 мм. Каждый слой отделялся от колонки предварительным рассечением капроновой леской и затем срезался пластиковым резак. При этом периферийная часть каждой полученной пробы обязательно удалялась по всей окружности на расстоянии 3–5 мм от внешней кромки, так как в ней всегда присутствует материал из вышележащих горизонтов вследствие вертикального движения керны вдоль стенок трубы и его пластичного смещения. Каждая проба, полученная таким образом, помещалась в чистую герметично закрывающуюся пластиковую банку. Затем пробы сушились при температуре 60°C. В результате было получено и подготовлено к проведению аналитических работ 152 пробы донных осадков.

Литологическое описание донных отложений и определение их типов проводилось с использованием классификации морских донных осадков [5] и цветовой шкалы Манселла [38], а также с использованием данных гранулометрического анализа и определений органического углерода.

Гранулометрический анализ. Гранулометрический состав осадков изучался методом лазерной дифрактометрии с использованием лазерного анализатора размера частиц Fritsch Analyzette 22 в МГУ им. М.В. Ломоносова (аналитик Е.В. Тер-

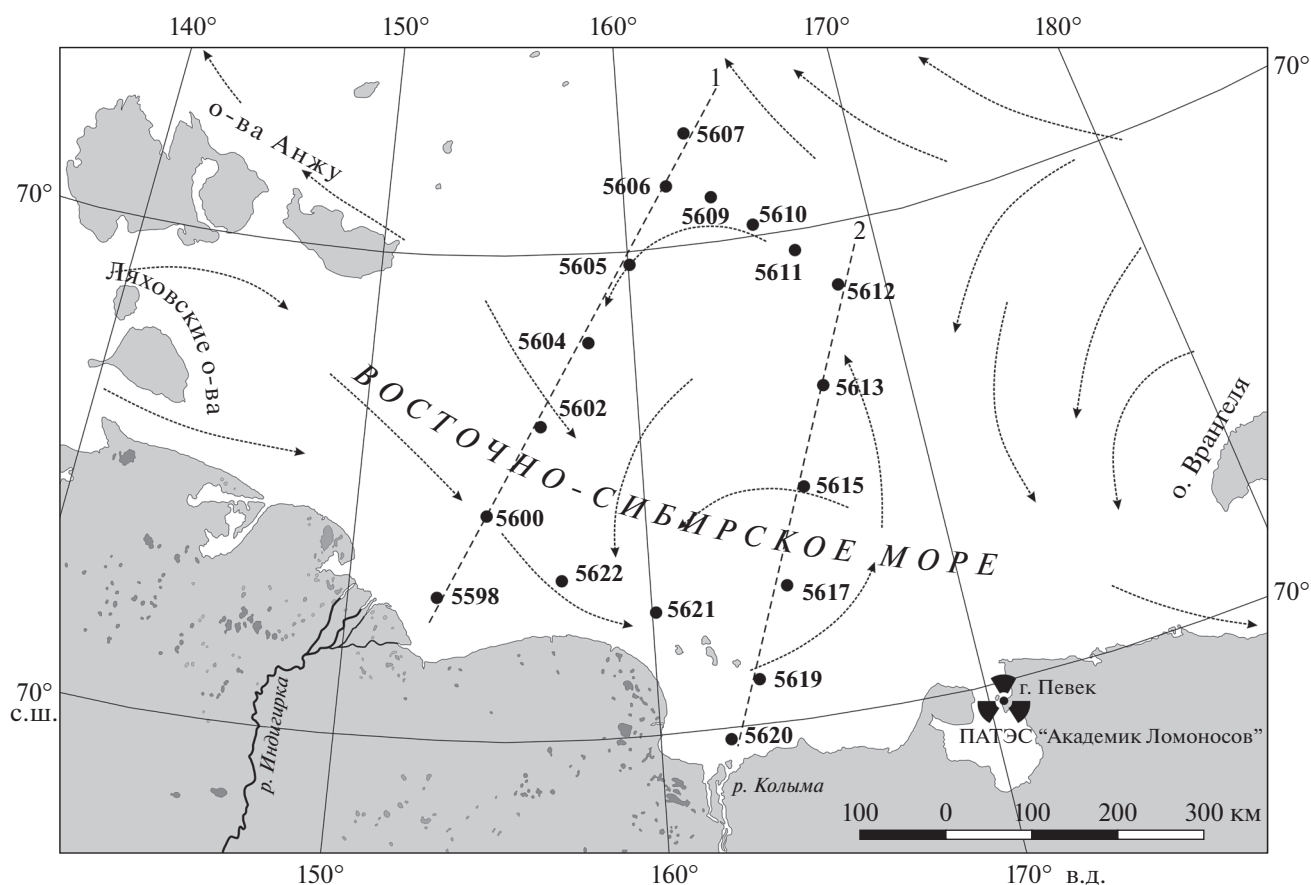


Рис. 1. Схема расположения станций опробования донных отложений. 1 – Индигирский разрез, 2 – Колымский разрез.

ская) и во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского. Всего проанализирована 51 проба.

Минеральный анализ. Рентгеновская съемка донных осадков выполнялась в МГУ им. М.В. Ломоносова на аппарате Rigaku Mini Flex 600 для порошковых препаратов (анод – Cu), приготовленных из 12-и проб. Дифрактограммы обрабатывались с помощью программы “Grl dif”. Для количественного анализа применялись корундовые числа из базы данных ICDD. Получены данные о валовом составе и содержании минеральных кристаллических фаз в изученных осадках. Следует заметить, что полученные рентгеновским методом количественные соотношения минералов имеют оценочный характер и подчеркивают, прежде всего, содержание основных осадкообразующих компонентов. Для изучения акцессорных минералов использовались, как правило, дополнительные приемы [28].

Глинистый комплекс проб донных осадков изучался методом рентгеновской порошковой дифрактометрии с помощью ДРОН–3М (анод – Co). Состав глинистых компонентов определялся по результатам рентгенофазового анализа тонко-

пелитовой фракции (<0.002 мм). Анализ выполнялся по стандартной методике [28] с использованием воздушно–сухих ориентированных препаратов (29 проб), насыщенных глицерином и прокаленных при температуре 600°C. Содержание каждой группы минералов рассчитывалось от суммы глинистых минералов в составе изученной фракции.

Анализ химических компонентов. Содержание углерода органического вещества ($C_{орг}$) в донных осадках (всего 21 проба) определялись Л.В. Добрыдневой в МГУ им. М.В. Ломоносова методом бихроматной окисляемости по Тюрину [2].

Определение валового химического состава донных осадков (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (сумм), MgO , CaO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 , S (сумм), $NaCl$ в процентах, Cr, V, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr, Ba, Th, Y, Nb, Pb в мг/кг) было проведено в ИГЕМ РАН А.И. Якушевым методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с использованием спектрометра последовательного действия с дисперсией по длине волны PW 2400 (Philips Analytical) и программного обеспечения SuperQ (PANalytical, 2009). Анализ выполнен по международной методике ASTM. Метод основан на взаимодействии

рентгеновского излучения с веществом и характеризуется широким диапазоном определяемых элементов (от F до U). Из полученных нами данных часть микроэлементов с множеством значений концентраций на пороге чувствительности метода и ниже была исключена из рассмотрения.

Радиометрический анализ. Определение удельной активности техногенного ^{137}Cs , а также природных радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , проводилось γ -спектрометрическим методом анализа в Лаборатории радиогеологии и радиогеоэкологии ИГЕМ РАН А.Л. Керзиным и Р.В. Соломенниковым. Измерения воздушно-сухих проб проводили на сцинтилляционном γ -спектрометрическом комплексе, оснащенный двумя низкофоновыми NaI(Tl)-детекторами 160×160 мм с колодцем 55×110 мм. Длительность экспозиций составляла 3600 с. Параллельно, в целях контроля точности измерений, использовался низкофоновый γ -спектрометр с полупроводниковым HgGe детектором GEM-4519 и амплитудным анализатором 919 EG&G ORTEC с последующей обработкой информации специальными программными средствами. Длительность экспозиций, как правило, составляла 28800 с. Радиационное состояние донных отложений оценивалось по результатам 187 измерений, выполненных по 152 пробам.

Методы оценки экологического состояния. При оценке экологической опасности загрязнения компонентов ландшафтов различными элементами, в том числе и тяжелыми металлами (ТМ), применяют три основных эталона сравнения: гигиенические нормативы, фоновые геохимические уровни и кларки химических элементов [15]. Эффект кларковых различий в зависимости от четности-нечетности порядкового номера соседствующих элементов в таблице Менделеева (правило Оддо—Гаркинса), затрудняющий объективное сравнение поведения элементов в природных объектах, нивелируется нормированием измеренных содержаний химических компонентов на их кларки. В результате получают одномасштабные безразмерные величины, называемые коэффициентами или кларками концентрации (КК). Для нормирования нами были использованы кларки верхней континентальной коры (ВКК) [40].

В связи с отсутствием нормативных актов, определяющих предельно допустимые концентрации (ПДК) ТМ в донных отложениях, многие исследователи часто вынуждены обращаться к значениям ПДК, установленным для почв [10]. Возможно, к такому шагу подталкивают публикации, посвященные полемике, связанной с понятиями “субаквальных почв”, “акваземов”, “аквентов” и др. [8, 11, 16, 27, 29, 32]. Однако следует помнить то, что наряду с некоторым сходством, процессы формирования морских донных отло-

жений и процессы почвообразования имеют весьма существенные отличия, а донные осадки являются геологическим образованием [13]. Использование фоновых геохимических уровней для аквальных ландшафтов ВСМ также не представляется возможным в связи с отсутствием достаточного объема таких данных.

Таким образом, примененное в настоящей работе нормирование геохимических данных на один из широко известных вариантов расчета кларков элементов для верхней части континентальной земной коры [40] можно считать оправданным и с экогеохимической точки зрения [15].

Сумма кларков породообразующих макроэлементов в эталоне ВКК составляет 100%. Соответственно, полученные из лаборатории данные по этим компонентам были сведены к такой же сумме при исключенных значениях потерь при прокаливании и содержаний NaCl. Далее применялись обычные методы статистической обработки данных. Для выявления закономерностей пространственной изменчивости содержаний элементов в донных осадках акватории прилегающей к наблюдательным станциям рассматривались план-схемы полей распределения КК. Построение изолиний КК осуществлялось с помощью метода линейного кригинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Литологический состав донных осадков. Вскрытая толща донных осадков (0–20 см) голоценового комплекса Восточно-Сибирского шельфа повсеместно представлена терригенными вязко-текучими и вязкими илами, что обусловлено особенностями рельефа и источниками сноса осадочного материала. В результате продолжительного ледового покрова в течение года и, как следствие, отсутствия действия волновых процессов, на внутреннем шельфе формировался пологий рельеф донной поверхности. Такая форма рельефа не является типичной для внутреннего шельфа арктических морей [18, 25]. Другой отличительной чертой являются многочисленные вдольбереговые гряды, осложняющие выровненный рельеф шельфа. Такие особенности морфологии дна формируют характерный гидродинамический режим подледной седиментации, в ходе которой происходит накопление, преимущественно, тонкодисперсного материала вне зависимости от удаленности от побережья. При этом периодические возмущения, вызываемые волновой деятельностью, приводят к перераспределению осадков, в том числе и к азональному [12, 24].

Изученные колонки донных осадков представлены пелитовыми, алевроито-пелитовыми и мелкоалевритовыми илами с содержанием пелитовых (<0.01 мм) фракций от 36 до 80%, с приме-

стью мелкозернистой песчаной (0.1–0.25 мм) фракции (1–7%) и признаками биотурбации (ходы и трубки илоедов). Среди включений иногда отмечались мелкие (<5 мм) фрагменты битой ракушки. Верхний окисленный вязко-текучий или текучий слой илов мощностью ~2 см различных оттенков коричневого цвета подстилается восстановленным вязким уплотненным слоем илов зеленовато-серых и серовато-сизых оттенков часто с прослоями и стяжениями гидротроилита. Переход между слоями постепенный. Цвет восстановленного слоя определяется, прежде всего, наличием и обилием гидротроилита.

Осадки плохо сортированы и содержат все гранулометрические фракции, кроме грубообломочных включений. Дифференциальные кривые гранулометрического состава верхнего слоя (0–2 см) донных осадков ВСМ в целом схожи и демонстрируют три моды в областях 1–3, 10–15 и 63–80 мкм, которые входят в состав тонкопелитовой, мелкоалевритовой и крупноалевритовой фракций, соответственно (рис. 2). Вклад песчаных фракций (>100 мкм) и вариации гранулометрического состава заметнее в осадках Колымского разреза. Здесь отмечалось закономерное уменьшение доли крупноалевритовой (0.05–0.1 мм) и песчаных (>0.1 мм) фракций в направлении от устьевой области реки к бровке шельфа. Алеврито-пелитовые илы внутреннего шельфа (глубина моря менее 30 м) характеризуются наибольшим содержанием мелкозернистого песка (до ~7%), что, по-видимому, связано с их формированием в зоне волновой сепарации на подводном береговом склоне [35].

В осадках северной части Индигирского разреза, наоборот, увеличивалась доля крупноалевритовой и песчаной фракций, несмотря на повсеместное преобладание пелитовых (<0.01 мм) и мелкоалевритовой (0.01–0.05 мм) фракций. Схожий гранулометрический состав осадков внешнего шельфа северо-западной части ВСМ описывался в работах [12, 24, 26]. Так, при общем преобладании тонких илов на этом участке дна отчетливо выделялись аazonальные песчаные области со средним размером частиц >60 мкм. Образование песчаных областей, необычных для внешнего арктического шельфа, может быть следствием как современной ледовой эрозии, так и комбинации ледового выпаживания с вымыванием тонкой фракции осадков.

Содержание пелитовых фракций (<0.01 мм) варьирует от ~40% вблизи устьевой области р. Колымы до 61–76% в остальной части изученного шельфа ВСМ.

Содержание $C_{орг}$ в верхнем слое донных осадков ВСМ не превышало 1.5% (табл. 1), а его максимальное значение приурочено к устьевой области р. Индигирки. Среднее содержание $C_{орг}$ в

Таблица 1. Содержание углерода органического вещества в донных осадках (0–2 см)

№ п/п	Станция	C _{орг} , %	Среднее, %	Станд. откл., %
Индигирский разрез				
1	5598	1.5	0.9	0.3
2	5600	0.9		
3	5602	0.5		
4	5604	0.8		
5	5605	0.8		
6	5606	0.9		
7	5607	0.9		
Колымский разрез				
1	5612	0.8	0.7	0.2
2	5613	0.6		
3	5615	0.9		
4	5617	0.5		
5	5619	0.5		

осадках Индигирского разреза было немногим больше, чем в осадках Колымского разреза. Полученные значения соответствуют данным литературы [7, 26, 41]. Установлена прямая, но не являющаяся достоверно значимой, парная корреляция ($r = 0.49$, $n = 12$) между содержанием пелитовой фракции и $C_{орг}$.

Наиболее низкие содержания $C_{орг}$ (0.5%) приурочены к алеврито-пелитовым илам вблизи устьевой области р. Колымы, где примесь песчано-алевритовых фракций (>0.01 мм) была наибольшей (до 61%). Мористее содержание $C_{орг}$ несколько увеличивалось до 0.8%, а доля песчано-алевритовых фракций снижалась примерно в два раза. Согласно данным литературы [26, 42], дополнительным источником $C_{орг}$ в восточной части моря могут быть трансформированные тихоокеанские водные массы с высокой продуктивностью. Очевидно, содержание $C_{орг}$ возрастает за счет вклада автохтонного ОВ.

Минеральный состав донных осадков ВСМ. В валовом минеральном составе изученных донных осадков идентифицированы такие минералы как кварц, плагиоклазы, калиевые полевые шпаты (КПШ), амфибол, пироксен, эпидот и глинистые минералы — иллит, хлорит и смектит. Так, в кристаллической фазе осадков преобладают обломочные минералы (кварц и полевые шпаты), доля которых достигает 87%. При этом доля кварца составляет около половины от суммы всех минералов (44–60%), а содержание суммы полевых шпатов обычно не превышает ~30% и достигает ~40% лишь вблизи устьевой области р. Колымы. Соотношение кварц/полевые шпаты колеблется от 1.3 до 3.0, составляя в среднем 2.1, и приближается к таковому соотношению в донных осадках моря Лаптевых [31].

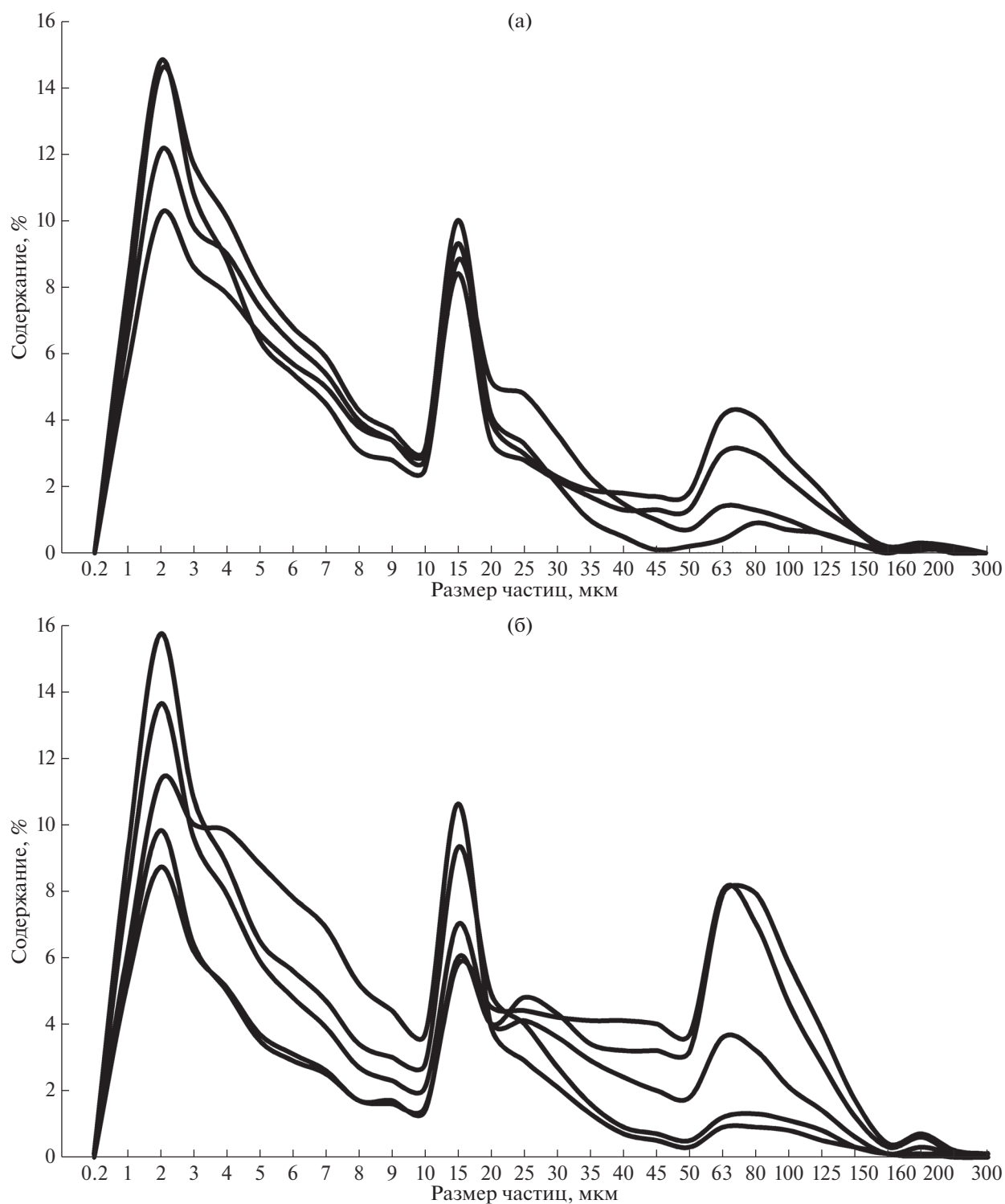


Рис. 2. Дифференциальные кривые верхнего слоя (0–2 см) донных осадков Индигирского (а) и Колымского (б) разрез по данным гранулометрического анализа.

Следует подчеркнуть схожий минеральный состав изученных проб верхнеголоценовых осадков ВСМ. Основную массу обломочного материала составляет полевошпатово–кварцевая ассоциа-

ция (70–85%), а остальная часть сложена частицами слоистых силикатов (не более 25%) и силикатов группы пироксенов, амфиболов и эпидота (не более 10%).

Глинистый комплекс тонкопелитовой фракции (<0.002 мм) донных осадков выполнен частицами основных групп слоистых силикатов: иллита, смектита, хлорита, каолинита, смешанослойных образований. Ведущее место в составе изученной фракции принадлежит хлорит–иллитовой ассоциации. Суммарное содержание этих минералов составляет 80–85% от суммы глинистых компонентов. В составе этой ассоциации абсолютно доминировал иллит, содержание которого варьировало от 61 до 74%. Полученные дифрактограммы демонстрируют достаточно хорошую окристаллизованность основной массы иллитовых частиц. Наряду с этим, отмечается незначительное присутствие и более гидратированных структур слюдяного ряда, содержащих 10–15% разбухающих межслоев.

Так, иллит является главным глинистым минералом донных осадков ВСМ, так же как и других арктических морей Евразии [20]. ВСМ расположено в пределах иллитового пояса, который простирается от Баренцева моря вплоть до моря Бофорта [14]. Однако этот пояс представляет собой сложное образование, где выделяются локальные минералогические провинции.

Вторым по содержанию минералом тонкопелитовой фракции является хлорит (11–20%). Рентгеновские параметры хлорита (соотношение интенсивностей базальных рефлексов) позволяют отнести его к Fe–Mg разновидностям. Он также хорошо окристаллизован, что подтверждается его термоустойчивостью при нагревании до 600°C (после прокаливании $d\ 001 = 13.8\text{--}13.9\ \text{\AA}$). Повышенное содержание хлоритовых частиц (до 20%) наблюдалось вблизи устьевой области р. Индигирки (ст. 5598).

Структуры разбухающих глинистых минералов отличаются наибольшей неоднородностью. Они обладают высокой дисперсностью кристаллитов и в значительной мере представлены продуктами деградации слюд – неупорядоченными смешанослойными образованиями (смектит–иллит) с преобладанием в них смектитовых межслоев (60–90%). Характерным показателем минералов этой группы служит наличие относительно слабо выраженного рефлекса первого порядка в области 17.0–18.5 Å на дифрактограммах препаратов, насыщенных глицерином. Содержание минералов разбухающей фазы тонкопелитовой фракции составляло 8–16%.

В составе глинистого комплекса опробованных осадков ВСМ также присутствует каолинит, содержание которого не превышало 5–8%. Отношение иллит/хлорит + каолинит в осадках ВСМ колеблется от 2.3 до 4.1, что заметно выше, данных литературы для осадков моря Лаптевых (1–2) [31].

Надлежит отметить большое сходство состава глинистого комплекса верхнеголоценовых донных осадков ВСМ и малый разброс содержания каждой выделенной группы минералов. Такая относительная однородность состава глинистых частиц обусловлена стабильным поступлением терригенного материала с речным стоком (рек Индигирки и Колымы) и в результате береговой термоабразии, прежде всего, Новосибирских островов в голоцене [39]. Тонкодисперсная речная взвесь Индигирки и Колымы, в основном, является результатом размыва сланцевых и магматических пород мезозойско-палеозойского возраста, в глинистом комплексе которых преобладают иллит и хлорит [17, 45]. Вклад материала ледового разноса незначителен в осадках ВСМ [39, 45].

Таким образом, в составе терригенных осадков ВСМ преобладают обломочные минералы (кварц и в меньшей степени полевые шпаты), состоящие в основном из неизмененных зерен минералов, характерных для водосборного бассейна, где доминирует физическое выветривание горных пород.

Осадки ВСМ характеризуются хлорит–иллитовой ассоциацией высокодисперсных минералов, типичной для условий ледового седиментогенеза [21]. Смектит и смешанослойные образования смектит–иллит являются постоянными спутниками иллита.

В пределах изученного интервала геологического времени (верхнеголоценовая толща) источники сноса материала, судя по всему, не менялись. Диагенетические процессы преобразования осадков выражены слабо и проявляются, преимущественно, в наличии гидротроилита.

Сопоставляя глинистый комплекс осадков ВСМ и других морей Сибирской Арктики (Карское и Лаптевых), наблюдается значительное увеличение смешанослойных минералов (смектит–иллит) и уменьшение, собственно, смектита, а также каолинита и, наоборот, увеличение иллитовых и хлоритовых частиц [14, 31, 44]. Такой комплекс высокодисперсных минералов косвенно указывает на меньшую сорбционную емкость частиц осадков ВСМ по сравнению с осадками морей Карского и Лаптевых. Источником смектита в осадках сравниваемых морей является речная взвесь таких крупных рек, как Обь, Енисей и Лена, истоки которых находятся далеко за пределами арктической зоны [14].

Латеральное распределение химических компонентов в верхнем слое донных отложений. Выборка геохимических данных представлена пробами 1-го и второго 2-го см, данные по которым были усреднены для слоя 0–2 см. Материал представлен в табл. 2 в форме коэффициентов концентрации (КК) химических компонентов и приведены использованные для нормирования кларки ВКК.

Таблица 2. Коэффициенты концентрации (КК) химических компонентов в верхнем слое (0–2 см) илов ВСМ относительно кларков ВКК

№ станции	т.о.*	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th
5598	Пл	0.93	1.45	1.26	1.48	1.90	0.95	0.24	0.70	1.15	1.72	2.99	1.26	1.86	1.30	1.25	1.54	2.18	1.68	0.54	2.19	1.05	1.31	1.03	3.72	1.31
5600	АПл	0.99	1.35	1.15	1.14	1.30	0.87	0.22	0.80	1.06	1.68	2.31	0.99	1.60	0.97	0.90	0.99	1.69	1.51	0.58	1.96	1.22	1.35	0.98	2.44	1.38
5602	АПл	1.01	1.34	1.13	1.06	0.86	0.84	0.22	0.72	1.05	1.51	2.29	0.89	1.54	0.94	0.80	0.83	1.53	1.43	0.58	2.06	1.36	1.13	0.96	1.87	0.98
5604	АПл	1.03	1.21	1.07	1.03	0.46	0.77	0.21	0.73	1.06	1.54	1.56	0.86	1.40	0.81	0.79	0.71	1.47	1.54	0.56	1.93	1.39	1.21	1.02	2.03	1.29
5605	АПл	0.99	1.21	1.12	1.07	3.80	0.97	0.22	0.84	1.09	1.42	4.34	0.94	1.86	1.18	0.80	0.67	1.64	1.51	0.54	1.73	1.06	1.21	0.99	2.06	1.05
5606	АПл	1.04	1.07	1.03	0.88	4.44	0.79	0.23	0.78	1.01	1.65	3.24	0.72	1.44	0.94	0.68	0.43	1.20	1.31	0.60	1.64	1.15	1.04	0.96	1.07	0.76
5607	АПл	0.97	1.15	1.04	1.29	16.4	1.06	0.27	0.71	1.08	1.43	7.90	0.97	2.20	1.65	1.89	0.93	2.01	1.51	0.58	1.74	0.86	1.08	1.00	1.74	1.10
5609	АПл	0.99	1.13	1.03	1.21	9.40	1.02	0.26	0.78	1.06	1.49	6.54	0.87	2.07	1.45	1.21	0.70	1.84	1.46	0.55	1.71	0.93	1.08	0.98	1.71	0.71
5610	АПл	1.00	1.15	1.00	1.24	6.19	1.08	0.28	0.74	1.05	1.46	6.69	1.00	2.22	1.59	1.01	0.80	1.99	1.46	0.52	1.62	0.88	1.08	0.99	2.21	1.10
5611	АПл	1.00	1.13	0.99	1.22	7.75	1.10	0.28	0.73	1.03	1.23	6.71	0.98	2.34	1.50	0.99	0.75	1.96	1.46	0.52	1.64	0.87	1.13	0.98	2.12	1.10
5612	Пл	0.98	1.27	1.14	1.17	2.80	1.08	0.24	0.67	1.07	1.23	5.13	1.10	2.39	1.53	0.86	0.82	2.01	1.50	0.49	1.57	0.97	1.17	1.02	2.00	1.05
5613	АПл	0.98	1.31	1.20	1.09	0.77	0.90	0.21	0.76	1.05	1.90	3.52	0.95	1.74	0.92	0.71	0.68	1.60	1.48	0.56	1.86	1.11	1.21	0.93	1.88	0.62
5615	АПл	0.98	1.41	1.20	1.27	0.89	0.89	0.20	0.62	1.06	1.33	2.76	0.99	1.72	0.95	0.84	0.96	1.85	1.54	0.53	1.90	1.09	1.21	0.99	2.12	1.10
5617	МА	1.07	1.18	1.01	0.71	0.40	0.66	0.27	0.82	0.89	1.45	2.73	0.55	1.13	0.66	0.50	<0.3	1.02	1.11	0.63	1.71	1.53	0.92	0.86	0.82	0.52
5619	МА	1.06	1.25	1.03	0.81	0.72	0.70	0.28	0.83	0.89	1.28	2.28	0.73	1.22	0.68	0.57	0.40	1.11	1.13	0.65	2.02	1.69	0.88	0.87	1.29	0.90
5621	Пл	1.01	1.31	1.08	1.14	1.78	0.80	0.25	0.74	0.99	1.55	2.59	0.96	1.46	0.84	0.85	0.86	1.66	1.38	0.59	2.05	1.27	1.17	0.90	1.91	1.24
5622	АПл	1.01	1.24	0.97	1.59	1.39	0.63	0.31	0.78	0.88	2.86	1.92	0.85	1.74	1.01	0.76	0.91	1.63	1.15	0.63	2.36	1.72	1.13	0.88	3.47	1.33
КК в среднем		1.00	1.25	1.09	1.14	3.60	0.89	0.25	0.75	1.03	1.57	3.85	0.92	1.76	1.11	0.91	0.81	1.67	1.42	0.57	1.86	1.19	1.14	0.96	2.03	1.03
ВКК**		66.6	0.64	15.4	5.58	0.10	2.48	3.59	3.27	2.80	0.15	0.06	92	97	17.3	47	28	67	84	320	21	193	12	624	17	10.5

* Тип осадка: Пл – пелитовый ил (>70% фракций <0.01 мм), АПл – алеврито-пелитовый ил (50–70% фракций <0.01 мм), МА – мелкоалевритовый ил (>50% фракций 0.01–0.1 мм).

** Кларки верхней континентальной коры (окислы и сера в %, остальные компоненты в мг/кг). Умножение КК на кларк возвращает измеренное содержание компонента.

Содержания большинства макроэлементов в общем близки к кларкам или практически им равны. Исключения составляют повышенные концентрации MnO , S , P_2O_5 и пониженные CaO . Следует отметить, что без вычета потерь при прокаливании и $NaCl$, которые в верхнем слое осадков составляют вместе 10–17% веса пробы, КК группы всех породообразующих макроэлементов оказались бы заметно смещены в сторону понижения. Судя по КК микроэлементов, средние содержания более половины из них соизмеримы с кларками, определенный привнос демонстрируют Pb , Y , V , Zn , дефицит отмечается у Sr . При всем этом, в таблице виден разброс содержаний почти всех химических компонентов.

Небольшое количество данных по верхнему слою осадков относительно размера площади, охватывающей различные элементы аквальных ландшафтов, не позволяет делать уверенные интерпретации корреляционного анализа. Тем не менее, обращают на себя внимание некоторые его результаты. Тривиальна отрицательная корреляция между кремнеземом и множеством иных химических компонентов как результат разбавления глинистой составляющей осадка кварцем. Тесно коррелирующую группу образуют MgO , MnO , V , S , Co , Zn , Ba . У биофильных фосфора (в форме P_2O_5) и серы обнаруживается отрицательная связь при положительной связи между P_2O_5 и Y . Это наблюдение позволяет предположить, что источником фосфора и иттрия могут быть переотлагаемые терригенные фосфориты, в то время как за накопление серы отвечает органика современной морской седиментации.

Район исследований расположен в пределах единого мелководного морского ландшафта (до 200 м) на таком участке континентального шельфа, где осадконакопление происходит в постепенно изменяющихся элементах ландшафта от прибрежных к собственно морским. Наиболее мелководная часть шельфа (до изобат 20–30 м) находится под влиянием стока речных вод (соленость от 4–5 до 24–26 ЕПС), которые, вместе с береговой абразией, обеспечивают поступление в море терригенного материала. Здесь, в области смещения пресной и соленой воды на геохимическом барьере река/море, происходит основной процесс его осаждения.

Мористее условия седиментации меняются, что, соответственно, приводит к некоторой трансформации корреляционных связей между геохимически подвижными элементами. Для более наглядного отображения особенностей накопления химических компонентов в донных осадках использованы план-схемы распределения величин КК (рис. 3). Из-за линейного расположения станций пробоотбора достоверность интерполируемых содержаний элементов внутри

образуемого профилями полигона и экстраполируемых за его пределы снижается по мере удаления от профилей перпендикулярно их направлениям. Тем не менее, тренды пространственной изменчивости концентраций проглядываются достаточно явно, что, по всей вероятности, отражает изменения в условиях осадконакопления.

На план-схемах интенсивность различий оттенков серого цвета областей повышенных и пониженных относительно кларков коэффициентов концентрации химических компонентов имеет иллюстративный характер, показывая тренд. Величины истинного разброса отражены цифрами на легендах и в табл. 2, где цифре 1 соответствует равенство содержания данного компонента кларку верхней континентальной коры.

Пространственно упорядоченные изменения содержаний некоторых химических компонентов в донных осадках наиболее выражены по субмеридианальному направлению от прибрежных районов к континентальному склону. Также наглядно проявилось геохимическое различие терригенного материала на барьерных зонах рек Колыма и Индигирка.

С точки зрения повышенного выноса в море отдельных металлов более “загрязненными” оказались воды Индигирки. При этом отмечается смещение ореолов относительного накопления от устьев рек к востоку вдоль береговой линии, вероятно под влиянием течений. Следует отметить, что в данной работе термин “загрязнение” употребляется исключительно в значении, отражающем тот факт, что ореолы повышенных концентраций химических компонентов образуют закономерно локализованные пространства, т.е. распределены неслучайно, хотя их абсолютные значения могут несущественно отличаться от кларковых.

Тяжелые металлы в донных осадках ВСМ. С целью выявления возможного антропогенного загрязнения были рассмотрены особенности распределения тяжелых металлов (ТМ) в вертикальных колонках, отобранных на десяти станциях Индигирского и Колымского разрезов. Данные РФА в этой выборке охватывают 150 проб донных отложений по колонкам мощностью от 9 до 18 см.

Реконструкция процессов загрязнения морских экосистем ТМ, если они имели место, возможна при анализе особенностей вертикального распределения элементов в толще донных отложений. При наличии явных неоднородностей содержаний металлов в вертикальных профилях можно установить также и уровни их природных значений, отражающих локальный геохимический фон. Естественно, необходимо учитывать вероятность диффузного перемещения элементов, влияние диагенетических и динамических процессов, а также скорость осадконакопления.

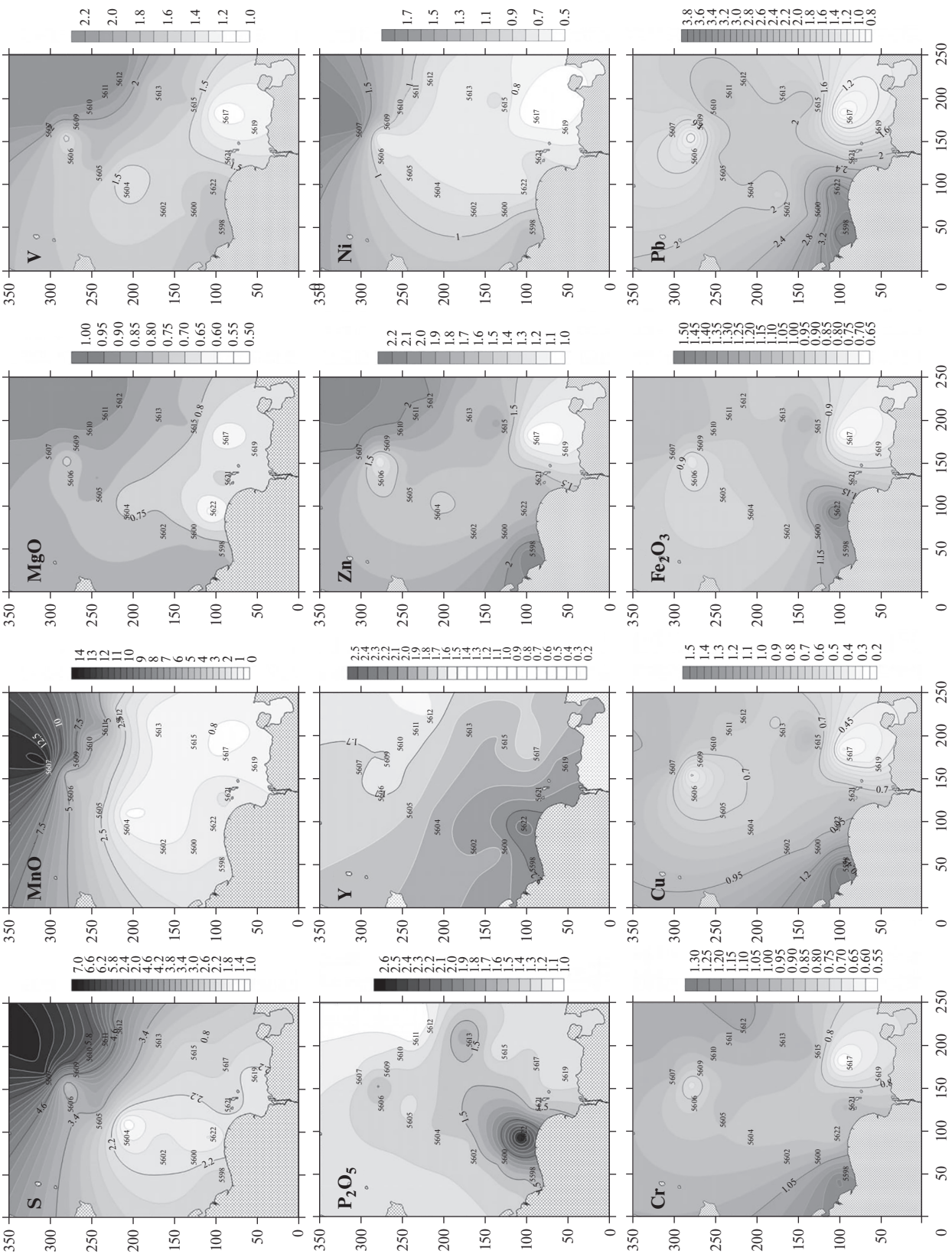


Рис. 3. План-схемы распределения коэффициентов концентрации химических компонентов в донных отложениях ВСМ. Изменение цвета от светлого к темному соответствует увеличению величин КК.

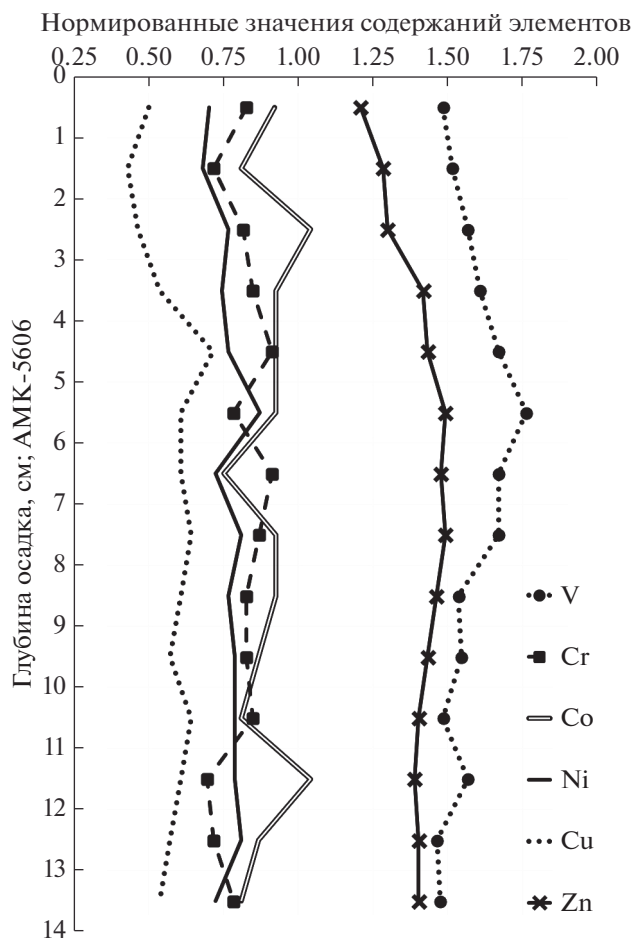


Рис. 4. Вертикальное распределение коэффициентов концентрации V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn, характерное для центральной и северной частей Индигирского разреза, ст. 5606.

Рассматривая концентрации таких ТМ, как V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn в донных отложениях ВСМ относительно их ПДК для почв, мы должны были бы отметить, что только V по величине своих средних значений находится как раз на уровне ПДК. При этом Cr превышает почти в 14 раз, Ni в 9,5, Cu в 7 раз, Co в 3,5, а Zn в полтора раза. Очевидно, что полученные значения коэффициентов превышения ПДК иллюстрируют не уровень загрязненности донных осадков, а степень некорректности применения норм, установленных для почвы. В итоге, как уже было отмечено выше, мы использовали кларки верхней земной коры для получения нормированных значений [40].

Изучение вертикального распределения содержаний ТМ в колонках донных осадков показало, что как для основной части Индигирского (рис. 4), так и для всего Колымского (рис. 5) разрезов характерен достаточно ровный характер разброса концентраций без аномалий и значи-

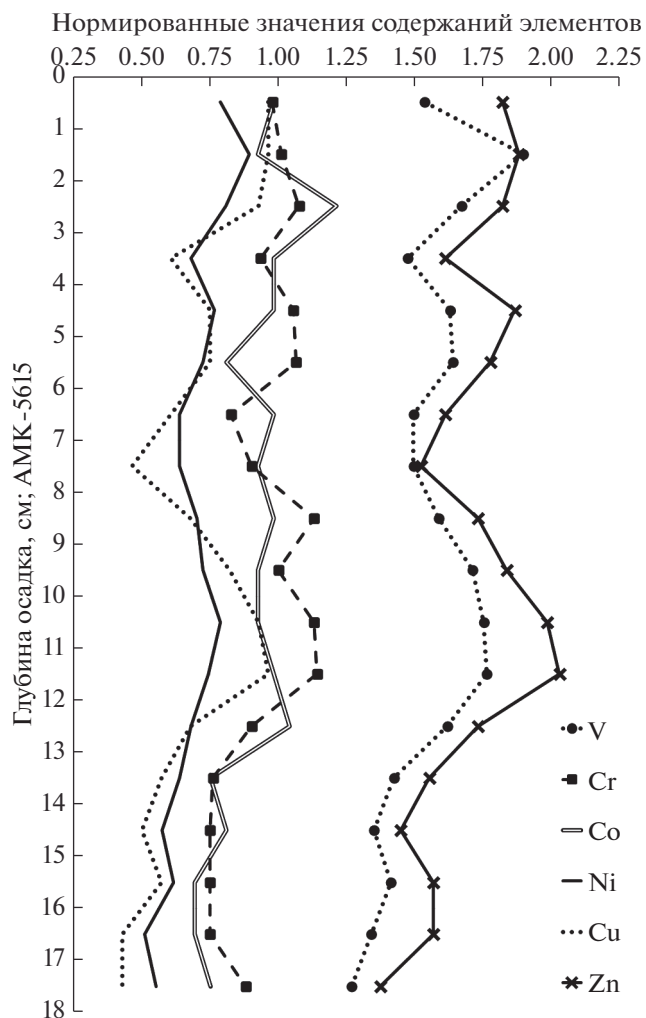


Рис. 5. Вертикальное распределение коэффициентов концентрации V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn, характерное для Колымского разреза, станция 5615.

тельных локальных пиков. Это может свидетельствовать об изменчивости содержаний ТМ за счет природных факторов и отсутствии антропогенного влияния.

В целом вертикальное распределение ТМ в осадках ВСМ характеризуется тем, что содержания V и Zn превышают кларки ВКК и находятся в диапазоне 1.1–2 значений коэффициентов концентрации. Содержания Cr, Co, Ni и Cu незначительно ниже кларков этих элементов и занимают диапазон от 1 до 0.3.

Некоторые отличия установлены в точке, наиболее близко расположенной к устью Индигирки (ст. 5598), которые показаны на рис. 6. Здесь графики распределения V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn иллюстрируют устойчивый тренд увеличения их содержаний в интервале 7–0 см, что свидетельствует о некотором возрастании поступления этих эле-

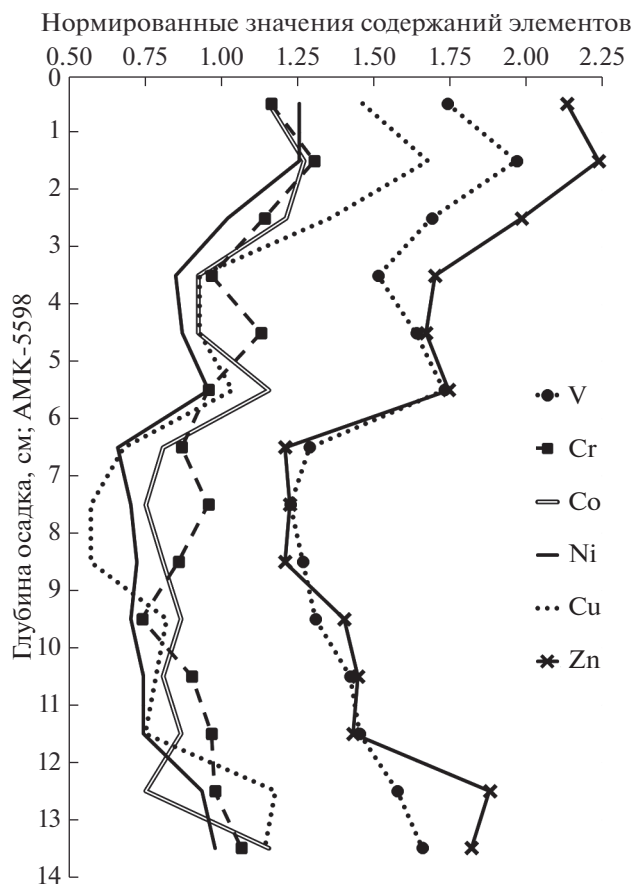


Рис. 6. Вертикальное распределение коэффициентов концентрации V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn в колонке донных отложений в приустьевой части Индигирки, ст. 5598.

ментов в область смещения речных вод Индигирки с водами ВСМ в период времени, соответствующий накоплению донных осадков в данном интервале. С ростом содержаний этих элементов совпадают более высокие коэффициенты концентрации Pb, установленные при изучении пространственного распределения элементов (табл. 2, рис. 3), достигая трехкратного превышения кларка. Ореолы «свинцового загрязнения», по сравнению с другими элементами, распространяются от устья Индигирки наиболее широко. Одновременно-одинаковый характер колебаний значений обсуждаемых ТМ по глубине колонки станции 5598, может свидетельствовать как в пользу специфического влияния диагенеза, динамики вод и иных условий седиментации, так и единого несущего агента от источника загрязнения. Подтверждается такое объяснение и тем, что в интервале 7–14 см фиксируется также единообразный тренд одновременно для всех элементов, но направленный на снижение содержаний к близкларковым значениям от более чем полуторного превышения (рис. 6).

К сожалению, в литературе отсутствуют данные по оценке скоростей седиментации в ВСМ, и мы не можем уверенно идентифицировать тот интервал времени, в течение которого сформировалась толща донных отложений мощностью 14–18 см. При этом очевидно, что скорость осадконакопления здесь никак не могла достигать 5 мм/год, установленных для областей лавинной седиментации Карского моря [22] и моря Лаптевых [4]. Исходя из данных, полученных для открытых частей Карского моря [33], предположим, что в ВСМ осадконакопление происходило со скоростью около 2 мм/год. Следовательно, изучаемые нами колонки донных отложений могут отражать период времени в 70–90 лет, охватывающий времена развития горнорудных предприятий в бассейнах Индигирки и Колымы, и мы не видим каких-либо неоднородностей на построенных графиках.

Таким образом, анализ вертикального распределения V, Cr, Co, Ni, Cu и Zn не выявил загрязнения донных отложений ВСМ тяжелыми металлами, но и не дал однозначного объяснения их повышенных концентраций именно у устья Индигирки.

Радиационно-экологическое состояние донных осадков ВСМ оценивалось, прежде всего, по уровням удельной активности техногенного ^{137}Cs в верхнем слое (ст. 5604, 5620, 5622) и в вертикальных колонках (ст. 5598, 5600, 5602, 5605, 5606, 5612, 5613, 5615, 5617, 5619). В измеренных 152-ти пробах максимальные значения в $4.7(\pm 2.8)$ и $5.0(\pm 4.0)$ Бк/кг были установлены только в двух, полученных из одной колонки на станции 5605. Оба горизонта находятся в интервале 8–10 см в глубине осадка и представлены преимущественно пелитовым илом с примесью алевритовых фракций. В 107-ми пробах из 152-х были получены «нулевые» значения активности радиоцезия, т.е. находящиеся за пределами его обнаружения используемым методом. Построение схемы вертикального распределения радиоцезия, отражающей некоторую закономерность его поступления в осадок через приемлемый коэффициент достоверности аппроксимации ($R^2 = 0.511$), оказалось возможным только для одной из десяти колонок (рис. 7).

Измерения активности радиоцезия в верхнем слое осадков ВСМ, проведенные коллегами из ТИНРО-Центра по 20-ти пробам в 2015 г., показали среднюю величину в $1.7 (\pm 0.5)$ Бк/кг [6]. Коллеги из Техасского университета приводят в качестве среднего значения для донных отложений ВСМ на 2001 г. 4.2 Бк/кг [37]. В соответствии с указаниями Госкомгидромета СССР от 1981 г. допустимым уровнем удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях континентального шельфа является 150 Бк/кг [9].

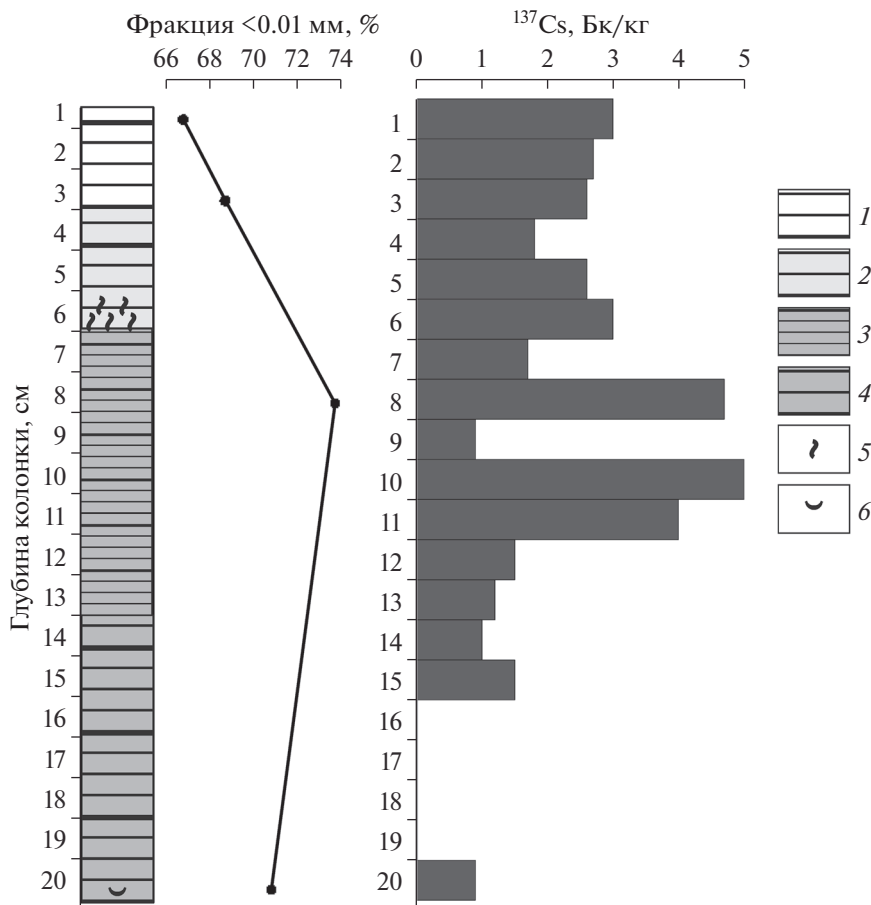


Рис. 7. Распределение удельной активности ^{137}Cs в колонке донных отложений относительно литологических типов осадков, станция АМК-5605. 1 – алевроито-пелитовый ил, окисленный слой бурого цвета, вязко-текучий, переход постепенный по плотности (консистенции) и цвету; 2 – алевроито-пелитовый ил зеленовато-серого цвета, вязкий; 3 – преимущественно пелитовый ил с примесью алевроитовых фракций ~25%, темно-серый сизоватый с обильными примазками гидротроилита, вязкий; 4 – алевроито-пелитовый ил, темно-серый сизоватый с обильными примазками гидротроилита, вязкий; 5 – ходы илоедов; 6 – включения ракушечного детрита.

Следовательно, полученные и нами, и другими исследователями величины активности радиоцезия в донных отложениях ВСМ почти на два порядка ниже. Однако необходимо отметить, что установленное отсутствие техногенного радиационного загрязнения определяется не упомянутым нормативным актом, а уровнем глобальных выпадений радиоактивности из атмосферы.

Распределение естественных радионуклидов (ЕРН) ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в донных отложениях равномерное и слабоконтрастное. Основной вклад в естественную радиоактивность осадков вносит изотоп калия. Активность ^{40}K варьирует от 510 до 790 Бк/кг, ^{226}Ra от 16 до 36 Бк/кг, а ^{232}Th от 25 до 53 Бк/кг. Полученные данные согласуются с величинами, полученными по донным осадкам ВСМ и моря Лаптевых [6], а также соответствуют типичным диапазонам активности ЕРН в почвах мира [43].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что в представленной статье показаны результаты изучения в качестве объекта исследований только донные отложения, следует понимать, что именно в осадках отражаются почти все конечные этапы природных и антропогенных процессов, формирующих представление об экологической обстановке изучаемой акватории.

Изучение минерального состава донных осадков и его сравнение с современными отложениями Карского моря, подвергнувшегося существенно радиационному воздействию, показало, что комплекс глинистых минералов и органического углерода ВСМ обладает меньшим сорбционным потенциалом по отношению к радиоактивным и стабильным загрязнителям. Это обусловлено прежде всего тем, что в осадках ВСМ присутствует значительно больше иллита и хлорита на фоне уменьшения смектита и каолинита.

Анализ геохимических данных показал, что отклонения концентраций химических элементов от их кларков в верхней континентальной земной коре не превышают полутора-двух раз. Примеры более чем трехкратного превышения демонстрируют S и MnO у начала континентального склона и Pb у устья реки Индигирка. Вместе со свинцом отмечается накопление Cr, Co, Ni, Cu, Zn. Таким образом можно констатировать, что основным поставщиком тяжелых металлов в море являются воды Индигирки. При этом концентрации рассмотренных потенциальных загрязнителей ВСМ не достигают тревожных значений.

Результаты проведенных нами исследований позволяют сделать вывод о том, в настоящее время радиационно-экологическое состояние экосистемы Восточно-Сибирского моря следует считать благополучным. В то же время эти результаты фиксируют те параметры, которые с течением времени могут изменяться под влиянием климатических факторов и возрастания антропогенной нагрузки.

Таким образом, исследования, которые будут проводиться в Восточно-Сибирском море в дальнейшем, опираясь на полученные результаты, будут отражать динамику возможных изменений в радиационно-экологическом состоянии компонентов морской экосистемы.

Благодарности. Авторы благодарят капитана НИС “Академик Мстислав Келдыш” Ю.Н. Горбача и весь экипаж легендарного судна. Мы благодарны Г.И. Надъярных, выполнившей весь трудоемкий цикл от пробоотбора на борту до пробоподготовки в лаборатории.

Источники финансирования. Работа выполнена по теме госзадания ИГЕМ РАН в части γ-спектрометрического анализа и обобщения данных литературы при финансовой поддержке РФФИ: грант № 18-05-60246 при реализации аналитической программы; грант № 18-05-00480 при анализе параметров геохимической устойчивости морской экосистемы и написании настоящей статьи; грант № 19-05-50090 при изучении литологического состава осадков. Экспедиционные исследования были выполнены при поддержке госбюджета (финансирование морских экспедиций) и проекта РФФИ № 14-50-00095.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек российской Арктики // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 14–31.
2. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
3. Асмолов В.Г. Российские АЭС признали безопасными // Атомная энергия 2.0. 2011. <http://www.atomic-energy.ru/smi/2011/05/20/22390>.
4. Бакунов Н.А., Большаков Д.Ю., Макаров А.С. От глобального ^{137}Cs к определению седиментации в глубоких озерах и морских эстуариях // Радиохимия. 2015. Т. 57. № 3. С. 283–288.
5. Безруков П.Л., Лисицын А.П. Классификация осадков современных морских водоемов // Геологические исследования в Дальневосточных морях. Тр. ИО АН СССР. Т. XXXII. М.: АН СССР, 1960. С. 3–14.
6. Борисенко Г.С., Надточий В.А. Исследование радиоактивного фона донных отложений морей восточного сектора Арктики // Материалы V Международной конференции. Томск. 13–16 сентября 2016 г. Изд-во “СТТ” г. Томск. С. 135–137.
7. Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183–195.
8. Владыченский С.А. Некоторые вопросы “подводного почвообразования” и использования мелководных // Почвоведение. 1968. № 3. С. 9–18.
9. Временные методические указания по организации и проведению государственного надзора за соблюдением требований к составу вод над шельфом и донных отложений, в т.ч. и показателям их химического и радиоактивного загрязнения при работах на континентальном шельфе. М.: Гидрометеоиздат. 1981. 25 с.
10. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
11. Глазовская М.А. Почвы мира. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1972. 231 с.
12. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во ТПУ. 2016. 192 с.
13. Ивлев А.М., Нестерова О.В. К вопросу об изучении аквапочв // Вестник ДВО РАН. 2004. № 4. С. 47–52.
14. Калинин В.В. Глинистые минералы в осадках Арктических морей // Литология и полез. ископаемые. 2001. № 4. С. 418–429.
15. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
16. Ковда В.А., Лобова Е.В., Розанов Б.Г. Проблема классификации почв мира // Почвоведение. 1967. № 4. С. 3–22.
17. Короновский Н.В. Краткий курс региональной геологии СССР. М.: Изд-во Московского университета, 1976. 398 с.

18. Кошелева В.А. Особенности вещественного состава неоплейстоцен-голоценовых отложений арктических морей России // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 2. С. 160–171.
19. Кузнецов В.М. Основные проблемы и современное состояние безопасности предприятий ядерного топливного цикла Российской Федерации. 2002. М.: Росс. дем. партия “Яблоко”. 259 с.
20. Левитан М.А., Васнер М., Нюрнберг Д., Шелехова Е.С. Средний состав ассоциаций глинистых минералов в поверхностном слое донных осадков Северного Ледовитого океана // Докл. РАН. 1995. Т. 344. № 3. С. 364–366.
21. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в морях и океанах. М.: Наука, 1994. 448 с.
22. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Дубинина Е.О. и др. Изменения радиационного состояния донных отложений Енисейского залива // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 6. С. 673–676.
23. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
24. Никифоров С.Л. Подводные аккумулятивные формы на шельфе Восточно-Сибирского моря // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. М.: Наука, 1985. С. 96–101.
25. Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Щербаков Ф.А. и др. Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М.: ГЕОС, 1998. 187 с.
26. Панова Е.В., Рубан А.С., Дударев О.В. и др. Литологические особенности донных осадков и их влияние на распределение органического материала на территории восточно-сибирского шельфа // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 8. С. 94–105.
27. Польшов Б.Б. Руководящие идеи современного учения об образовании и развитии почв // Почвоведение. 1948. № 1. С. 3–13.
28. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под ред. Г. Брауна. М.: Мир, 1965. 599 с.
29. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
30. Росэнергоатом: плавучий энергоблок “Академик Ломоносов” готов к началу эксплуатации // www.rosatom.ru, 24.04.2019.
31. Серова В.В., Горбунова З.Н. Минеральный состав почв, аэрозолей, взвешенного вещества и донных осадков устьевой части реки Лены и моря Лаптевых // Океанология. 1997. Т. 37. № 1. С. 131–135.
32. Серышев В.А. О классификации и номенклатуре подводных почв // Почвоведение. 1986. № 5. С. 27–34.
33. Степанец О.В., Борисов А.П., Лигаев А.Н., Галимов Э.М. Оценка скорости седиментации современных осадков Карского моря с использованием радиоактивных трассеров // Геохимия. 2001. № 7. С. 752–761.
34. Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А. и др. Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. М.: АПР, 2018. 232 с.
35. Чаркин А.Н. Особенности современного осадкообразования в Восточно-Сибирском море // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Владивосток. 2012. 26 с.
36. Ядерные испытания СССР. Том 4. Использование ядерных взрывов для решения народно-хозяйственных задач и научных исследований. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 119–125.
37. Jonson-Pyrtle A., Scott M.R. Distribution of ¹³⁷Cs in the Lena River Estuary – Laptev Sea System // Marine Pollution Bulletin. 2001. V. 42. № 10. P. 912–926.
38. Munsell soil-color charts with genuine Munsell® color chips 2009 year revised, 2012.
39. Naugler F.P., Silverberg N., Creager J.S. Recent Sediments of the East Siberian Sea // Herman Y. (eds.) Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas. Springer, Berlin: Heidelberg, 1974. P. 191–210.
40. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 3. The Crust. Elsevier Sci. P. 1–64.
41. Salvadó J.A., Tesi T., Sundbom M. et al. Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon-pools on the outer East Siberian Arctic Shelf // Biogeosciences. 2016. V. 13. P. 6121–6138.
42. Semiletov I., Dudarev O., Luchin V. et al. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL022490>
43. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: UN. 2010. V. I. 463 p.
44. Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al. Arctic (paleo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. № 11–13. P. 1487–1511.
45. Viscosi-Shirley C., Mammone K., Piasias N., Djmond J. Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic shelf: implications for sediment provenance and grain size sorting // Continental Shelf Research. 2003. V. 23. P. 1175–1200.

Ecological State and Mineral-Geochemical Characteristics of the Bottom Sediments of the East Siberian Sea

A. Yu. Miroshnikov^{a, #}, M. V. Flint^b, En. E. Asadulin^a, M. D. Kravchishina^b, V.L. Luksha^c,
A. A. Usacheva^a, D. V. Ryabchuk^d, Vl. B. Komarov^a

^a*Institute of Geology of Ore Deposits Petrography Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia*

^b*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

^c*Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology, Moscow, Russia*

^d*Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: alexey-miroshnikov@yandex.ru*

This paper reports the results of the investigations of September 2017 on the radioecological state of the bottom sediments of the East Siberian Sea during the complex research of the Siberian Arctic seas within the 69-th Cruise of R/V Academician Mstislav Keldysh. The evaluation of the results of γ -spectrometric analysis found that current specific activity of artificial cesium-137 in sediments is two orders of magnitude below the acceptable level and reflects the influence of global fallout from atmosphere only. Sediments are not contaminated with heavy metals also. Bottom sediments are represented by silts: pelitic, aleurite-pelitic and fine aleuritic with content of pelite (<0.01 mm) fractions of 40–80%. The western and eastern parts of the East Siberian Sea have differences in distribution and composition of mineral components and elemental composition, due to the influence of the catchments of the Indigirka and Kolyma rivers, respectively.

Keywords: bottom sediments, radiation condition, ^{137}Cs , heavy metals, East Siberian Sea