

УДК 504.422

РАДИАЦИОННО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДОННЫХ ОСАДКОВ В ЭСТУАРИЯХ ОБИ И ЕНИСЕЯ И НА ПРИЛЕГАЮЩЕМ МЕЛКОВОДЬЕ КАРСКОГО МОРЯ

© 2020 г. А. Ю. Мирошников¹, *, М. В. Флинт², Э. Э. Асадулин¹, В. Б. Комаров¹

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

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

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

Поступила в редакцию 03.06.2020 г.

После доработки 30.06.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

В статье представлены результаты исследований изменений радиационно-экологического состояния донных отложений Обь-Енисейского мелководья и эстуариев Оби и Енисея. Материалы получены в два этапа: 1995–2001 и 2014–2019 гг. в семи экспедициях на НИС “Академик Борис Петров”, “Профессор Штокман” и “Академик Мстислав Келдыш”. Повторный отбор колонок донных осадков в ключевых точках зон повышенной активности радиоцезия и последующий анализ распределения радионуклидов позволил установить положительные тенденции в изменении радиационного состояния региональной экосистемы. Установлена полная деградация Обской зоны повышенной активности радиоцезия и весьма существенная – Енисейской, которая первоначально была наиболее загрязненной. Сопоставление положения максимумов удельной активности в вертикальном распределении ¹³⁷Cs в колонках донных отложений позволило оценить скорости седиментации в дистальной и проксимальной фазах эстуариев Енисейского залива на уровне 4.7–5.8 и 3.2–3.7 мм/год соответственно. Установленные изменения, произошедшие за период около 20 лет, доказывают способность экосистемы Карского к самоочищению. Существенную роль в самовосстановлении экосистемы играют процессы диффузии и ассимиляции загрязнителей донными отложениями, что наиболее интенсивно проявляется в зонах влияния геохимического барьера “река–море”.

Ключевые слова: Карское море, Обь-Енисейское мелководье, эстуарий, Обь, Енисей, радиоактивность, радиоцезий, геохимическая барьерная зона, донные осадки, ¹³⁷Cs, седиментация, самоочищение, экосистема

DOI: 10.31857/S0030157420060088

ВВЕДЕНИЕ

Понимание механизмов, определяющих способность компонентов морских экосистем к ассимиляции определенного количества различных загрязнителей, в том числе и техногенных радионуклидов, имеет не только экологическое, но и социально-экономическое значение и лежит в основе оценки накопленных экологических рисков. Отсутствие достаточных знаний в этой области определяли некоторый перекося в области обоснования и обеспечения безопасной эксплуатации объектов атомной отрасли в сторону неоправданного ужесточения экологических требований, что приводит, в том числе, и к дополнительным экономическим затратам [6].

В ходе реализации советского атомного проекта во второй половине XX века были созданы основные радиохимические предприятия – ПО “Маяк”, Сибирский химический комбинат (СХК) и Крас-

ноярский горно-химический комбинат (КГХК) – расположенные в водосборных бассейнах Оби и Енисея на широте 55–56° с.ш. В результате их работы часть жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с различными уровнями активности попадала в гидрографические сети, что допускалось существовавшим в то время регламентом. В итоге радиоактивное загрязнение в составе пресноводного стока из водосборных бассейнов Обской губы и Енисейского залива поступало в область смешения с водами Карского моря [12, 18, 27]. При этом часть глобальных выпадений радиоактивности, осаждающаяся на соответствующих водосборных площадях в 6.1 млн км², также вступала в процессы миграции в виде твердого и жидкого стока.

Геохимическая барьерная зона (ГБЗ) “река–море” [4], южная граница которой в нашем случае расположена в эстуариях Оби и Енисея, играет ключевую роль в предотвращении свободного

продвижения радионуклидов в морские экосистемы и их дальнейшего широкого распространения с морскими течениями.

В целом механизм работы такой ГБЗ определяется влиянием целого ряда внутренних геохимических барьеров. Резкое замедление скорости речного потока приводит к интенсивному осаждению частиц крупнее “стоксовской” величины (5–10 мкм). При смешении с морской водой, являющейся электролитом, частицы размером менее 2–5 мкм сорбируют органические кислоты. Начинается процесс смены заряда с отрицательного на положительный или нейтральный [3, 11]. Происходит слипание диспергированных частиц (коагуляция), увеличение их размера и ускорение осаждения. При увеличении солености флокуляция приводит к выпадению в осадок хлопьями и части того материала, который поступает в область ГБЗ в растворенных формах. Все перечисленные обстоятельства определили то, что эстуарии и примыкающие к ним участки моря являются областями лавинной седиментации [3, 10]. Происходит осаждение огромных масс взвешенного вещества, вместе с которым переходят в осадок и радиоактивные загрязнители [2, 31].

Несмотря на то, что в эстуарии Оби и Енисея поступило рекордное для любого арктического моря количество радионуклидов, катастрофы не случилось, т.к. установленные уровни активности хотя и вызывали тревогу, но, как оказалось, не представляли серьезной опасности [13, 28, 31].

Устойчивость экосистем в условиях постоянного действия природных и антропогенных факторов определяется их способностью к самоочищению. Оно связано с разрушением или нейтрализацией загрязнителей в результате естественных природных процессов: физических, химических и биологических. Не менее важной составляющей, повышающей долговременную устойчивость экосистемы к радиационному или иному загрязнению, являются ее транзитные свойства, благодаря которым поллютанты естественным путем могут перемещаться за ее пределы или “консервироваться” без контакта с подвижными компонентами среды и биотой. Такая комплексная оценка воздействия загрязнителей на экосистемы называется биосферным подходом [6].

Применение биосферного принципа при оценке уязвимости и радиационной защите водных объектов позволяет разрешить большинство противоречий между антропоцентрическими и экологическими подходами [6], а оценка радиологической емкости отождествляется с ассимиляционной емкостью и способностью экосистем к самоочищению [5, 7, 15].

Донные осадки в ГБЗ “река–море” формируются в результате совмещения целого ряда относительно независимых процессов, связанных с

изменением гидродинамики и гидрохимической структуры водной толщи, глубиной дна, удаленностью от основных областей сноса, различиями питающих провинций и т.д. [9]. Анализ фациальной изменчивости поверхностного слоя донных отложений Обь–Енисейского мелководья и эстуариев обеих рек показал, что современные литофафии района, характерные и для Обской губы, и для Енисейского залива, указывают на сходство седиментационных процессов [8]. Литологические исследования, проведенные в изучаемом районе, показали, что в донных осадках присутствует весь спектр гранулометрических фракций от пелитов до песков [8, 29], что в существенной степени влияет на способность донных осадков аккумулировать радиоактивные загрязнители.

Целью настоящей работы была оценка механизмов и скорости самоочищения экосистем крупнейших арктических эстуариев рек Оби и Енисея и прилегающего шельфа Карского моря от радиоактивного загрязнения, поступающего с континентальным стоком.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу исследований положены материалы по двум районам Карского моря, собранные в ходе двух этапов работ, разделенных во времени интервалами около 17 лет и 21 года соответственно. Область исследований охватывала северные части эстуариев Оби и Енисея и южную часть Обь–Енисейского мелководья (рис. 1).

Первый этап включал в себя четыре экспедиции, выполненные в период с 1995 по 2001 гг. на НИС “Академик Борис Петров” (код станций – ВР) в ходе совместных работ с Институтом геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ) и Институтом морских полярных исследований им. Альфреда Вегенера (AWI). Работы второго этапа были проведены в трех экспедициях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН на НИС “Профессор Штокман” (код станций – PS) в 2014 г. (128-й рейс) и на НИС “Академик Мстислав Келдыш” (код станций – АМК) в 2016 и 2019 г. (66-й и 76-й рейсы).

Одним из основных результатов работ первого этапа стала схема “Распределение радиоцезия в верхнем слое донных осадков Карского моря”, построенная нами на основе материалов, полученных на 160-ти морских станциях [13]. На большей части обследованной донной поверхности моря активность ^{137}Cs составляла 0–5(10) Бк/кг, что было принято нами за условно-фоновый диапазон. На этом фоне выделялись четыре аномальных участка, в которых активность ^{137}Cs превышала 15 Бк/кг. Два из них с активностью до 30–35 Бк/кг находились в восточной части Карского моря: Вайгачская зона повышенной активности

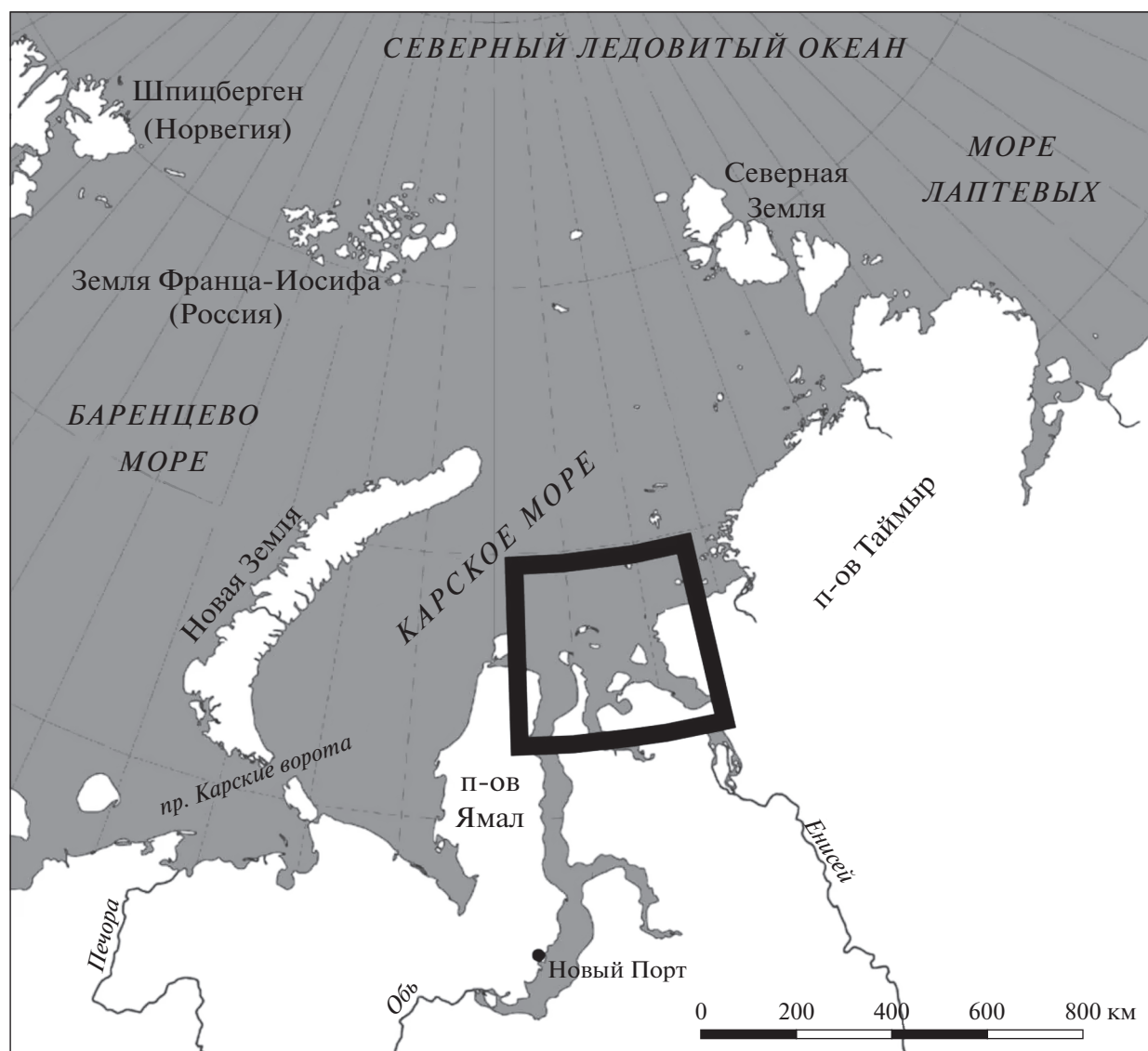


Рис. 1. Положение района исследований в Карском море (прямоугольник в центре рисунка).

(ЗПА) восточнее пролива Карские Ворота и Новоземельская ЗПА у берегов о. Северного от залива Цивольки до залива Благополучия. Аномалии с активностью до 80 Бк/кг в верхнем слое осадков были обнаружены во внешних частях эстуариев Оби и Енисея и распространялись на южную часть Обь-Енисейского мелководья. На основании полученных материалов в донных отложениях этой области были установлены Обская и Енисейская ЗПА радиоцезия с внешней границей в 15 Бк/кг (рис. 2).

Протяженность Енисейской ЗПА составляла 340 км вдоль западного берега п-ова Таймыр при ширине в 40–60 км. Обская ЗПА имела такую же ширину и протяженность с юга на север 320 км. Внутреннее строение обеих ЗПА определялось влиянием морфологии донной поверхности и

структурой фронтов в ГБЗ, что в результате привело к формированию в обеих ЗПА трех последовательно расположенных загрязненных участков, имеющих свои отдельные максимумы не только в верхнем слое, но и в вертикальных разрезах (рис. 2).

При выполнении исследований второго этапа в пределах южной и центральной частей Енисейской ЗПА в 2014 и 2016 гг. были отобраны колонки донных отложений на 11 станциях. При этом 8 станций для обеспечения повторных наблюдений были выполнены в тех же координатах, что и станции первого этапа, на которых были установлены наиболее высокие уровни удельной активности ^{137}Cs , а одна (АМК-5344), контрольная — за пределами Енисейской ЗПА (рис. 2, табл. 1).

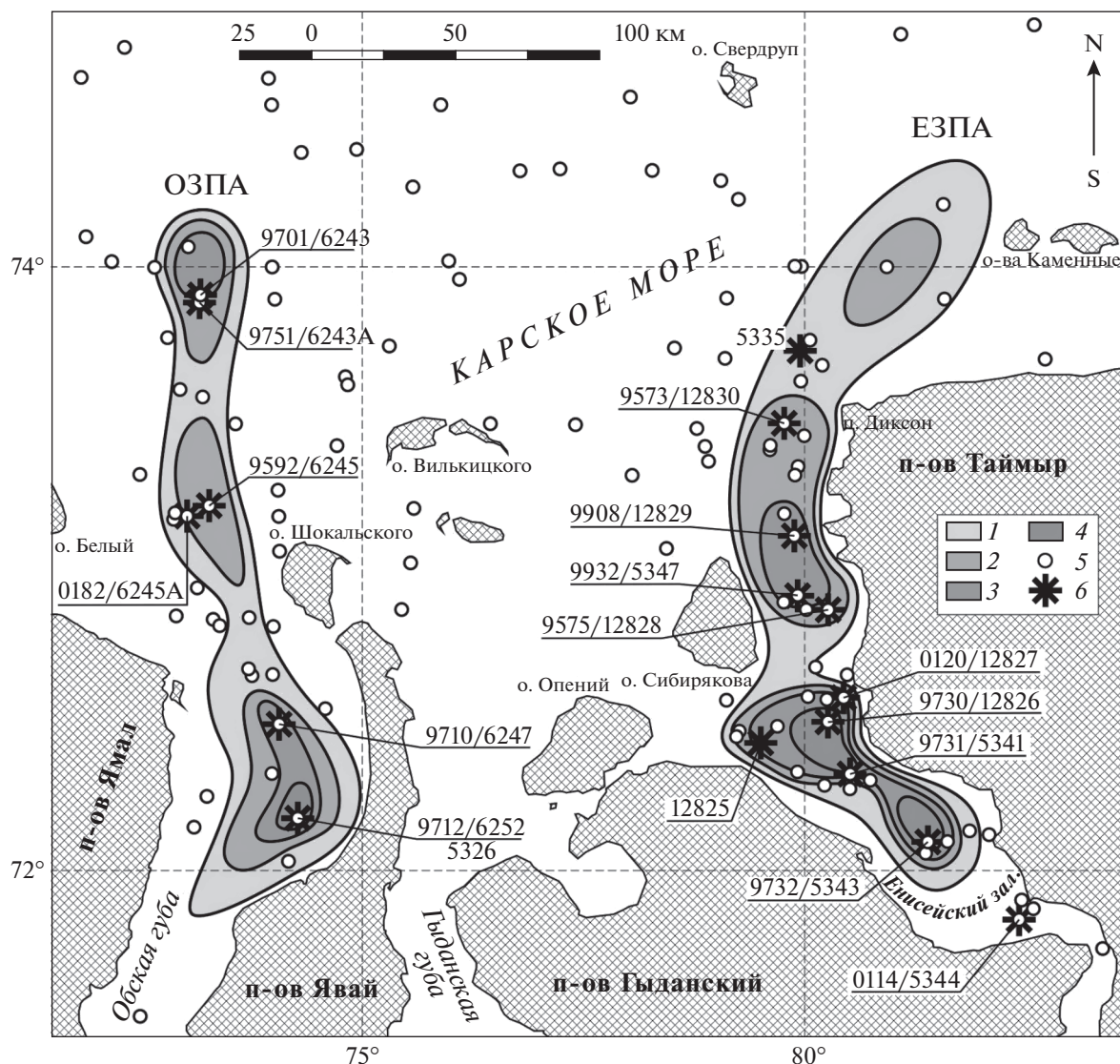


Рис. 2. Расположение Обской (ОЗПА) и Енисейской (ЕЗПА) зон повышенной активности и точек отбора проб донных отложений. 1 – 15–20 Бк/кг; 2 – 20–25 Бк/кг; 3 – 25–30 Бк/кг; 4 – 30–80 Бк/кг; 5 – станции первого этапа; 6 – станции второго этапа.

В контуре Обской ЗПА повторный отбор колонок был проведен в 2019 г. на шести станциях: по две в северной, центральной и южной частях. Здесь также все колонки были получены в точках с координатами станций первого этапа, в которых отмечались максимальные уровни активности радиоцезия как в верхнем слое осадков, так и ниже по кернам (рис. 2, табл. 1). Одна колонка, седьмая, была отобрана в 2016 г. в точке станции АМК-5326 в 580 м южнее станций ВР-9712/АМК-6252.

В целом по двум зонам повышенной активности радиоцезия был получен материал в основном из одних и тех же точек наблюдения. Средние значения временного интервала между отборами колонок донных отложений для Енисейской и

Обской ЗПА составили 16.7 и 20.8 лет соответственно, что превышает половину периода полураспада ^{137}Cs ($T = 30.17$).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Забортные работы с отбором образцов донных отложений при проведении работ как первого, так и второго этапов проводились с применением коробчатых пробоотборников (бокскореров), а также ковшовых пробоотборников грейферного типа Океан-0.25 или Van Veen при отборе только верхнего слоя.

Используя один сборно-разборный сабкорер и второй цельный из прозрачного поликарбоната

Таблица 1. Координаты станций I-го и II-го этапов, на которых проводился повторный отбор колонок донных осадков, их глубина и разница лет в отборе

№ п/п	Станции I-го этап	Станции II-го этапа	Широта (°)	Долгота (°)	Глубина (м)	Разница (лет)	ЗПА
1	BP-9573	PS-12830	73.5733	79.7817	38.0	19	Енисейская
2	BP-9908	PS-12829	73.1350	79.9533	26.5	15	
3	BP-9932	AMK-5347	72.9367	80.0000	22.0	17	
4	BP-9575	PS-12828	73.9178	79.9967	21.5	19	
5	BP-0120	PS-12827	72.6335	80.6875	17.8	13	
6	BP-9730	PS-12826	72.5052	80.3352	14.0	17	
7	BP-9731	AMK-5341	72.3650	80.2067	9.0	19	
8	BP-9732	AMK-5343	72.0933	81.4817	11.0	19	
9	BP-9701	AMK-6243	73.9107	73.1838	32.0	22	Обская
10	BP-9751	AMK-6243A	73.8881	73.1730	31.0	22	
11	BP-9592	AMK-6245	73.2452	73.2949	22.0	24	
12	BP-0182	AMK-6245A	73.1968	73.0272	28.0	18	
13	BP-9710	AMK-6247	72.5027	74.0803	15.0	22	
14	BP-9712	AMK-6252	72.1702	74.2935	13.5	22	
15	BP-9712*	AMK-5326*	72.1650	74.2950	13.0	19	

* Расстояние между BP-9712 и AMK-5326 составляет 580 м.

или полипропилена, из каждой пробы боксорера получали две колонки осадка глубиной до 550 мм и диаметром 100 мм. Первая разрезалась вертикально на две половины для дальнейших литологических исследований, включая описание и опробование. Вторая колонка секционировалась горизонтально на слои по 10 мм. Каждый слой отделялся от колонки предварительным рассечением капроновой леской и срезался пластиковым резаком. При этом периферийная часть каждой полученной пробы обязательно удалялась по всей окружности пробы на расстоянии 5–8 мм от внешней кромки, чтобы предотвратить попадание материала из вышележащих горизонтов, происходящее при вертикальном движении пластикового ядра вдоль стенок трубы боксорера. Каждая проба, полученная таким образом, помещалась в чистую герметично закрывающуюся пластиковую банку. Перед отбором следующей пробы все инструменты тщательно промывались и вытирались сухой салфеткой. Далее пробы сушились при температуре 60°C до воздушно-сухого состояния.

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 (аналитики А.Л. Керзин и Р.В. Соломенников). Измерения воздушно-сухих проб проводили на сцинтилляционном γ -спектрометрическом комплексе, оснащенный двумя низкофоновыми NaI(Tl)-детекторами размером 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 H_pGe детектором GEM-4519 и амплитудным анализатором 919 EG&G ORTEC с последующей обработкой информации специальными программными средствами. Длительность экспозиций составляла 28800 с.

Для каждой из 47-ми колонок, отобранных в ходе первого этапа исследований, и для 15 колонок второго этапа были построены диаграммы вертикального распределения ^{137}Cs по слоям с шагом 10 мм, отражающие удельную активность радиоцезия в каждом слое.

С целью проявления закономерной составляющей распределения ^{137}Cs относительно менее упорядоченных флуктуаций в вертикальном разрезе осадков применялся метод сглаживания полученных данных – аппроксимация, то есть эмпирический подбор функции $y = \varphi(x)$, наилучшим образом показывающей тренд неслучайной изменчивости зависимой переменной y во временном ряду. В нашем случае независимой переменной x является отметка глубины пробы донного осадка, а зависимой переменной y – удельная активность радиоцезия.

При работе с экспериментальными данными или с результатами химических анализов компонентов природной среды подбор вида функции не имеет строгого решения. Как правило, решение этой задачи опирается на опыт и интуицию

исследователя, но возможен и “слепой” перебор из конечного числа функций и выбор лучшей из них [17]. Расчет параметров функций и построение линий трендов производилось программными средствами пакета Microsoft Excel с одновременным вычислением коэффициента детерминации (R^2), который позволяет оценить качество смоделированного тренда. В диапазоне значений от 0 до 1 он отражает величину корреляции между наблюдаемыми значениями и полученными в результате аппроксимации. При выборе вида функциональной зависимости $\varphi(x)$ мы остановились на полиномиальной аппроксимации шестой степени ($y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$), для лучшего моделирования нелинейных трендов вертикальной изменчивости активности ^{137}Cs в большинстве рассмотренных колонок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в распределении радиоцезия в осадках Обской и Енисейской ЗПА, выявленные нами в ходе работ первого этапа, оказались явными и достаточно контрастными [12]. Ниже мы рассмотрим те изменения, которые произошли в донных осадках обеих зон за период между первым и вторым этапами исследований.

Енисейская ЗПА. Вертикальное распределение ^{137}Cs в Енисейской ЗПА сначала изучалось по 27 колонкам донных отложений. Глубина колонок составляла от 15 до 43 см. Максимальная активность ^{137}Cs , составляющая 263 Бк/кг, была установлена в горизонте осадка на глубине 5 см в точке расположения станции ВР-9732 (рис. 2). Интервал средних значений удельной активности ^{137}Cs по горизонтам всех 27 колонок составлял 1.18–57.68 Бк/кг, а значения полиномиальной кривой находились в диапазоне от 10 до 52 Бк/кг (рис. 3-I). В диапазоне глубины осадка от 43 до 20 см аппроксимированная кривая активности радионуклидов колебалась около значений 10–12 Бк/кг. Выше горизонта 20 см она плавно возрастала до максимальных значений функции около 52 Бк/кг на отметке 7–6 см и затем равномерно убывала до 20 Бк/кг на поверхности.

Анализ вертикального распределения радиоцезия по данным второго этапа исследований был основан на изучении 8 колонок с вертикальной мощностью осадка от 17 до 45 см, отобранных на станциях внутри Енисейской ЗПА в пределах дистальной (внешней) и проксимальной (внутренней) частей фации эстуариев. Линия полинома, построенная по графику усредненных значений активности ^{137}Cs для каждого 10 мм слоя, показывает, что от самых нижних горизонтов до уровня 25 см активность варьировала в диапазоне 0–5 Бк/кг, плавно возрастая до максимума в 32 Бк/кг

на отметке 11–12 см, и убывала к поверхности осадка до 12 Бк/кг (рис. 3-II).

Величина коэффициента детерминации выделенных линий тренда для данных первого и второго этапов достаточно высокая ($R^2 > 0.9$).

Отчетливое смещение зоны максимальной активности радиоцезия примерно на 6 см в глубину осадка иллюстрирует тот факт, что поступление радионуклидов в Енисейскую ЗПА существенно снизилось, и горизонт их максимальной концентрации постепенно перекрывается новообразованным осадочным материалом. Снижение и выравнивание активности ^{137}Cs ниже глубины 20 см объясняется, по-видимому, не только радиоактивным распадом, но и процессами диагенеза, диффузии радионуклидов и биотурбации.

Особенно ярко проявились изменения, произошедшие за период 17–19 лет в двух точках наблюдения ВР-9732/АМК-5343 и ВР-9932/АМК-5347 (рис. 2), где в одних и тех же координатах был сделан повторный отбор колонок осадка. Эти изменения иллюстрируют графики, представленные на рис. 4 и 5.

Максимальная измеренная активность радиоцезия в донных осадках Енисейской ЗПА в точке ст. ВР-9732, где была отобрана колонка в 1997 г., составляла 263 Бк/кг. Этот пик располагался в глубине осадка на горизонте 5 см (рис. 4). Значение КД (R^2) было 0.762. В этих же координатах была отобрана колонка в 2016 г. (ст. АМК-5343), что позволило зафиксировать снижение максимальной активности ^{137}Cs ровно в два раза до 130 Бк/кг (рис. 4). За 19 лет, разделяющие эти два пробоотбора, произошло погружение горизонтов с наибольшей удельной активностью на 6 см, а по максимуму линии полинома на 7 см. Полученные результаты позволяют оценить скорость осадконакопления в этой точке, находящейся в проксимальной части фации эстуариев, величинами от 3.16 до 3.68 мм/год.

Следует отметить, что наши данные по колонке, отобранной на станции АМК-5343, существенно отличаются от данных наблюдений ГЕОХИ (2016 г.), как по измеренным значениям удельной активности ^{137}Cs , так и по полученной скорости седиментации [16]. Причина этих расхождений очевидна и имеет простое методическое объяснение. Как было отмечено выше, в процессе секционирования колонок крайне важно соблюдать два простых правила: удалять периферийное кольцо пробы и тщательно мыть используемые инструменты, что позволяет уверенно избежать попадания материала из вышележащих проб (горизонтов) в нижележащие. Перемешивание осадков при несоблюдении этого методического правила приводит к частичному смещению вещества вниз и “размазыванию” более активных горизонтов и, помимо этого, снижению показателя

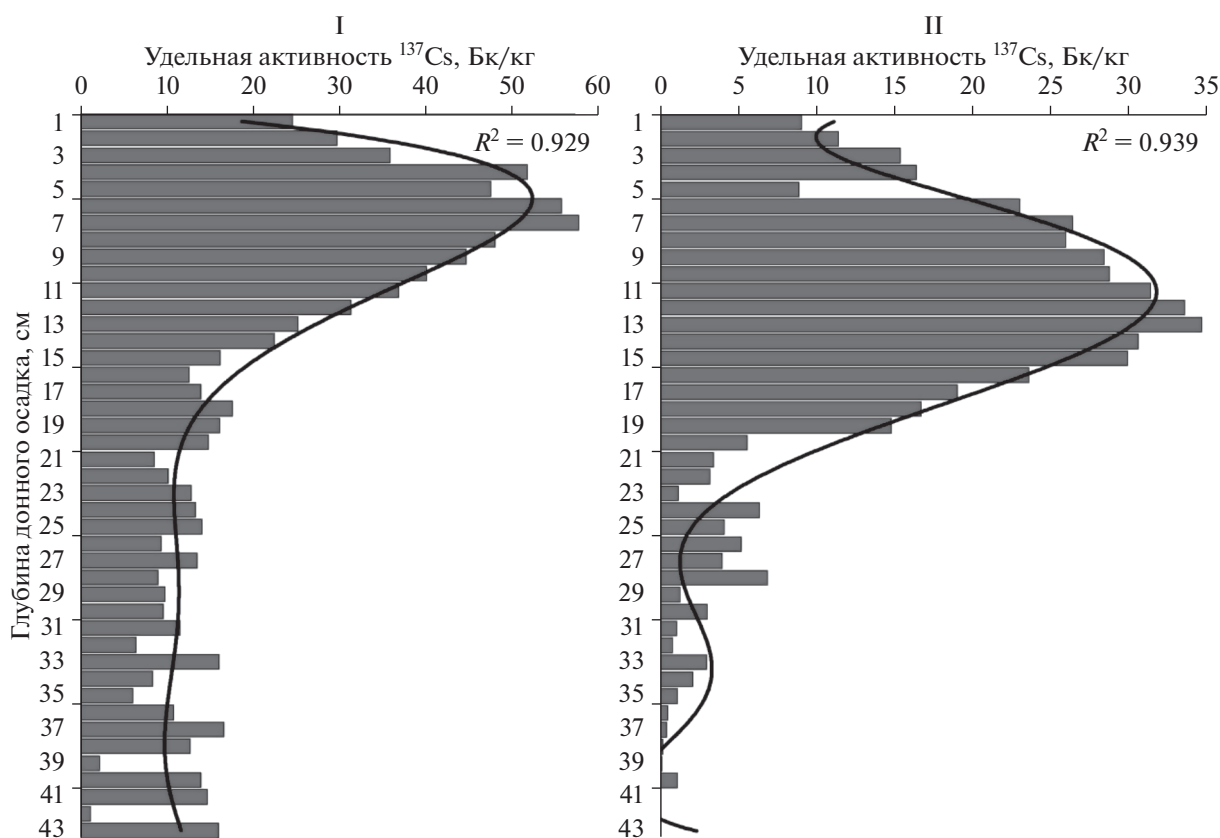


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs (по средним значениям) в Енисейской ЗПА в различные периоды наблюдений. I – первый этап (1995–2001); II – второй этап (2014–2016).

телей удельной активности в определениях. В целом положение горизонтов повышенных значений активности радиоцезия, установленное нами в интервале 10–14 см по глубине колонки, совпадает с интервалом 10–19 см, приведенным в работе [16]. При этом в силу методических причин интервал горизонтов колонки с высокими значениями удельной радиоактивности, определенный в указанной работе, получился “размазанным” вниз на 5 см, т.е. более протяженным по вертикали и соответственно “менее активным”. Как следствие, методическая ошибка проецировалась и на расчеты скоростей осадконакопления [16], которые дали результаты существенно завышенные по сравнению с опубликованными ранее [14, 19, 20].

Анализ изменений радиоактивности осадков был выполнен и по материалам, полученным во второй точке с максимальными активностями ^{137}Cs в центральной части Енисейской ЗПА. Основой послужили колонки, отобранные на ст. ВР-9932 в 1999 г. и ст. АМК-5347 в 2016 г. (рис. 2). Изменения в распределении ^{137}Cs по вертикали, произошедшие в этой точке за 17 лет, также указывают на погружение в осадок уровней пиковой активности с горизонта 5 до 15 см по абсолютным значениям и с 4 до 12 см по максимумам линии

полиномиального тренда (рис. 5). При этом активность в максимуме снизилась с 48 до 25 Бк/кг, т.е. также практически в два раза. Таким образом, за прошедшие 17 лет в этой точке, находящейся в дистальной части фации эстуариев, накопился слой донных отложений мощностью 8–10 см, а скорость осадконакопления может быть оценена величиной от 4.70 до 5.88 мм/год.

Полученные в настоящей работе на основании распределения радиоцезия оценки скорости седиментации в Енисейском эстуарии составляют от 3.16 до 5.88 мм в год и согласуются с данными, полученными другими методами. Например, оценки скорости осадконакопления, полученные датированием осадков по ^{210}Pb , составляют 4.2–4.5 мм в год для эстуариев Оби и Енисея [19]. Эти оценки по ^{210}Pb можно считать достаточно корректными, поскольку свинец-210, поступающий из атмосферы с постоянной скоростью, неустойчив в природных водах и легко переходит в донные отложения [21, 22].

Обская ЗПА. На первом этапе исследований анализ вертикального распределения средних значений активности ^{137}Cs был выполнен по материалам 20-ти колонок, глубина которых состав-

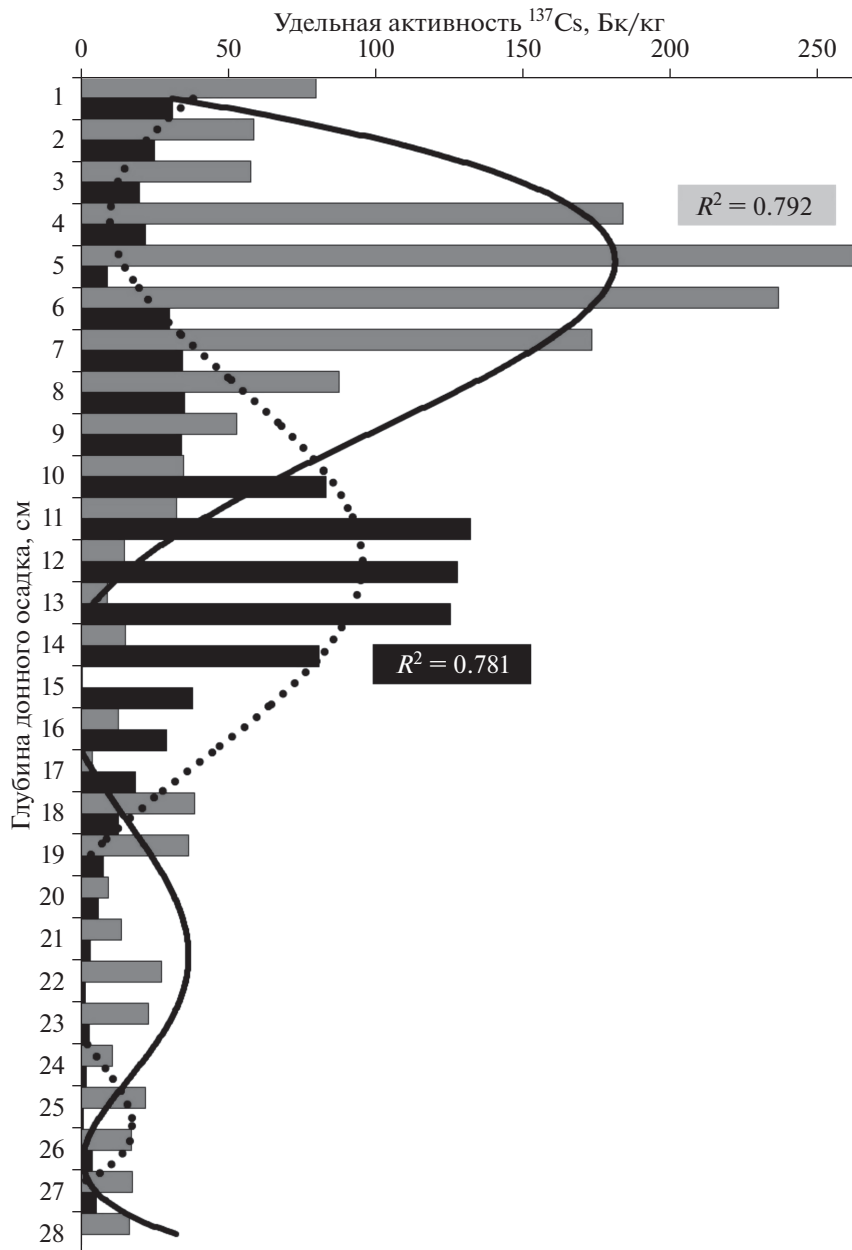


Рис. 4. Вертикальное распределение ^{137}Cs в осадках проксимальной части фации эстуариев в точке расположения станций ВР-9732 (серое + сплошная линия) и АМК-5343 (черное + пунктирная линия).

ляла от 15 до 40 см. Для Обской ЗПА в основном было характерно существенно более равномерное по сравнению с Енисейской ЗПА распределение радиоцезия в вертикальном разрезе донных осадков при отсутствии ярко выраженных пиковых интервалов. Наибольшая активность ^{137}Cs в 112 Бк/кг была установлена в точке станции ВР-9712 (рис. 2) на глубине 19 см в толще осадка. Величины средних значений удельной активности ^{137}Cs по горизонтам всех 20 колонок находились в диапазоне 0.14–34.93 Бк/кг. Размах “максимум–минимум” аппроксимирующей кривой невелик: от 19 до 24 Бк/кг (рис. 6-1).

Семь колонок донных отложений, отобранных на втором этапе исследований внутри контура Обской ЗПА, позволили проанализировать вертикальное распределение ^{137}Cs по состоянию на 2016–2019 гг. Были получены керны длиной от 22 до 48 см. Максимальная активность радиоцезия в 13.5 Бк/кг была измерена на глубине 9 см в колонке со станции АМК-6245 (рис. 2). Эта точка отбора совпадала по координатам со станцией ВР-9592, на которой в 1995 г. удельная активность

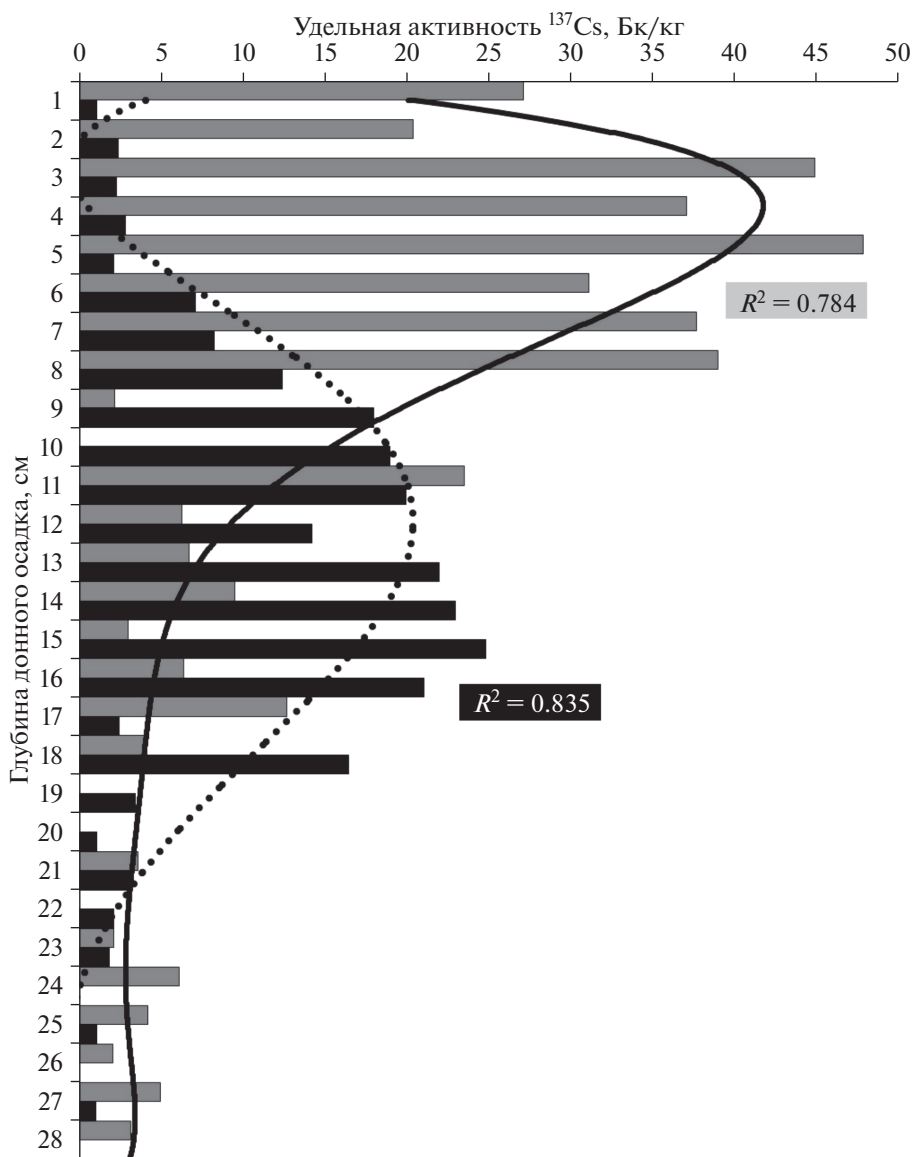


Рис. 5. Вертикальное распределение ^{137}Cs в осадках дистальной части фации эстуариев в точке расположения станций BP-9932 (серое + сплошная линия) и АМК-5347 (черное + пунктирная линия).

^{137}Cs в верхнем слое осадка составляла 22 Бк/кг, но колонка донных отложений не отбиралась.

Линия тренда, построенная по данным средних значений активности ^{137}Cs для каждого слоя по семи колонкам второго этапа, имеет достаточный для ее принятия коэффициент детерминации ($R^2 = 0.782$). В выборке данных первого этапа эта величина была весьма мала ($R^2 = 0.063$), что не позволяет считать линию тренда значимой. При этом размах колебаний был кратен десяткам Бк/кг, в то время как в выборке второго этапа — единицам, не достигая 8 Бк/кг (рис. 6-II). Появление очевидного тренда спустя почти 20 лет в данных второго этапа скорее всего связано с различной интенсивностью перераспределения оса-

дочного вещества в процессе диагенеза. Если бы уменьшение активности ^{137}Cs было обусловлено только естественным радиоактивным распадом, форма распределения величин осталась бы прежней. Нельзя исключить и влияние биотурбации.

Положение южной части Обской ЗПА (рис. 2) пространственно совпадает с фацией донных осадков эстуариев, в проксимальной части которой существует гидродинамический барьер. Именно в этой части, в точках расположения станций BP-9712 и BP-9710, были зафиксированы максимальные для Обской ЗПА уровни активности ^{137}Cs , превышающие 100 Бк/кг. В тех же координатах станций первого этапа были отобраны колонки донных осадков на станциях АМК-6252

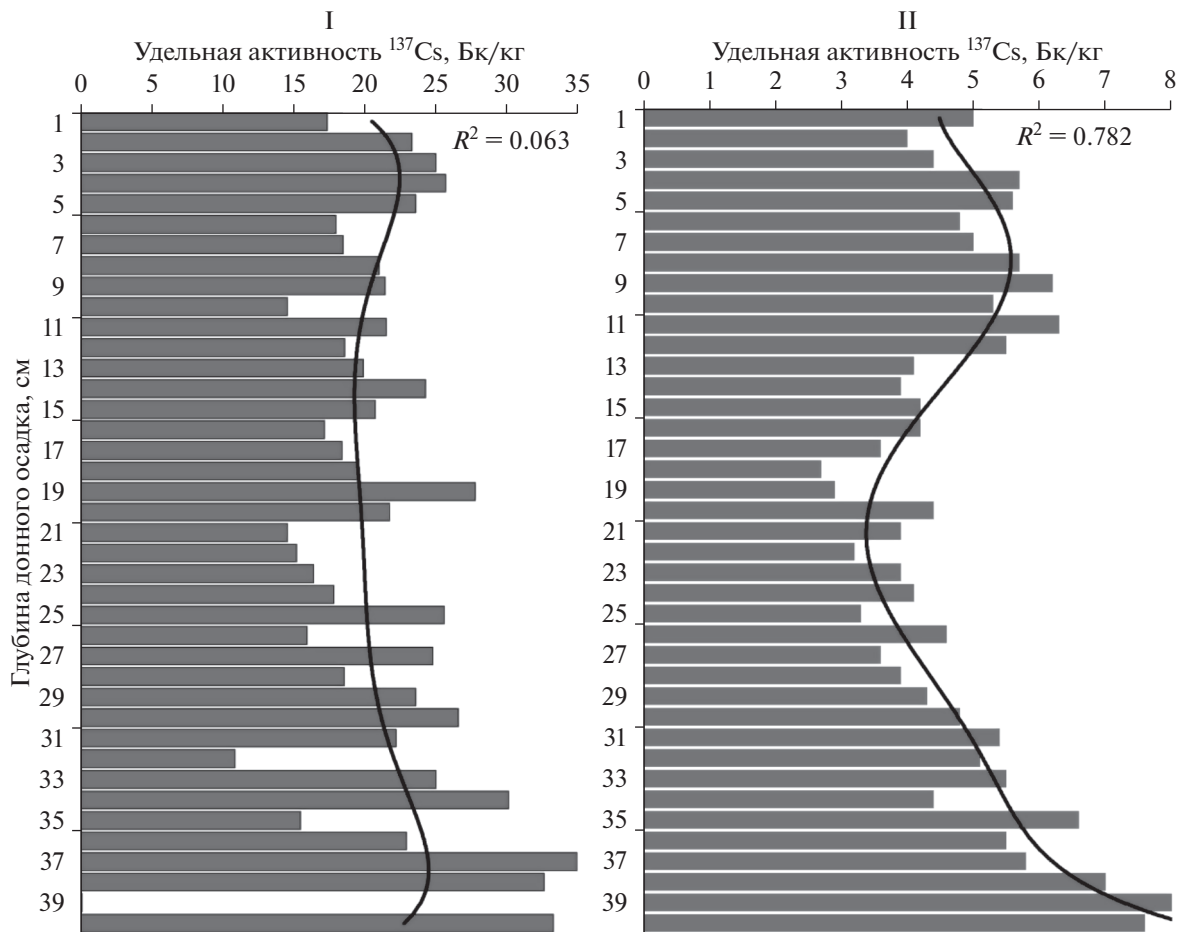


Рис. 6. Вертикальное распределение ^{137}Cs (по средним значениям) в Обской ЗПА в различные периоды наблюдений. I – первый этап (1995–2001); II – второй этап (2019).

и АМК-6247 соответственно. Изменения, произошедшие в южной части Обской ЗПА, отражены в графиках, представленных на рис. 7 и 8.

В точке ВР-9712/АМК-6252 (рис. 7), где активность радиоцезия в поверхностных осадках на первом этапе наблюдений стала самой высокой в верхнем слое для всей Обской ЗПА и составляла 36.5 Бк/кг, она снизилась за 22 года в ~15 раз. В глубине осадка максимальные значения с 60–112 Бк/кг упали до 10–11 Бк/кг. При этом максимум линии полинома в колонке ВР-9712, составлявший в 1997 г. 55 Бк/кг, в колонке АМК-6252 в 2019 г. снизился до 8 Бк/кг, а (R^2) возрос с 0.128 до 0.705. Если рассматривать данные по этой колонке в укрупненном горизонтальном масштабе, почти линейный тренд уменьшения активности радиоцезия снизу вверх будет выражен более отчетливо. Заметим, что плотность осадков в нижних горизонтах в этой точке более высокая, чем в верхних.

В точке наблюдений ВР-9710/АМК-6247 (рис. 8), в которой уровень максимальной активности

^{137}Cs в 1997 г. составлял 102 Бк/кг на горизонте 4 см, наблюдались еще высокие значения на глубинах 8, 14–15 и 19 см. Однако, шестая степень полиномиальной аппроксимации для отражения этих колебаний оказывается недостаточной ($R^2 = 0.413$). В колонке АМК-6247 соответствие модели истинному распределению еще хуже, но, как и в примере АМК-6252 (рис. 7), можно увидеть снижение активности радиоцезия от нижних горизонтов донных осадков к поверхности.

В центральной части Обской ЗПА в области донных отложений дистальной части фации эстуариев повторный отбор донных осадков также проводился в двух точках. Одна из них, станции ВР-9592/АМК-6245, к сожалению, не имеет колонки из первого этапа наблюдений, и здесь уместно говорить об изменениях радиационного состояния только поверхностного слоя. В нем удельная активность ^{137}Cs снизилась за 24 года практически в 5 раз с 25 Бк/кг до фоновых значений около 5–7 Бк/кг. При этом зона максимальной активности в вертикальном профиле колон-

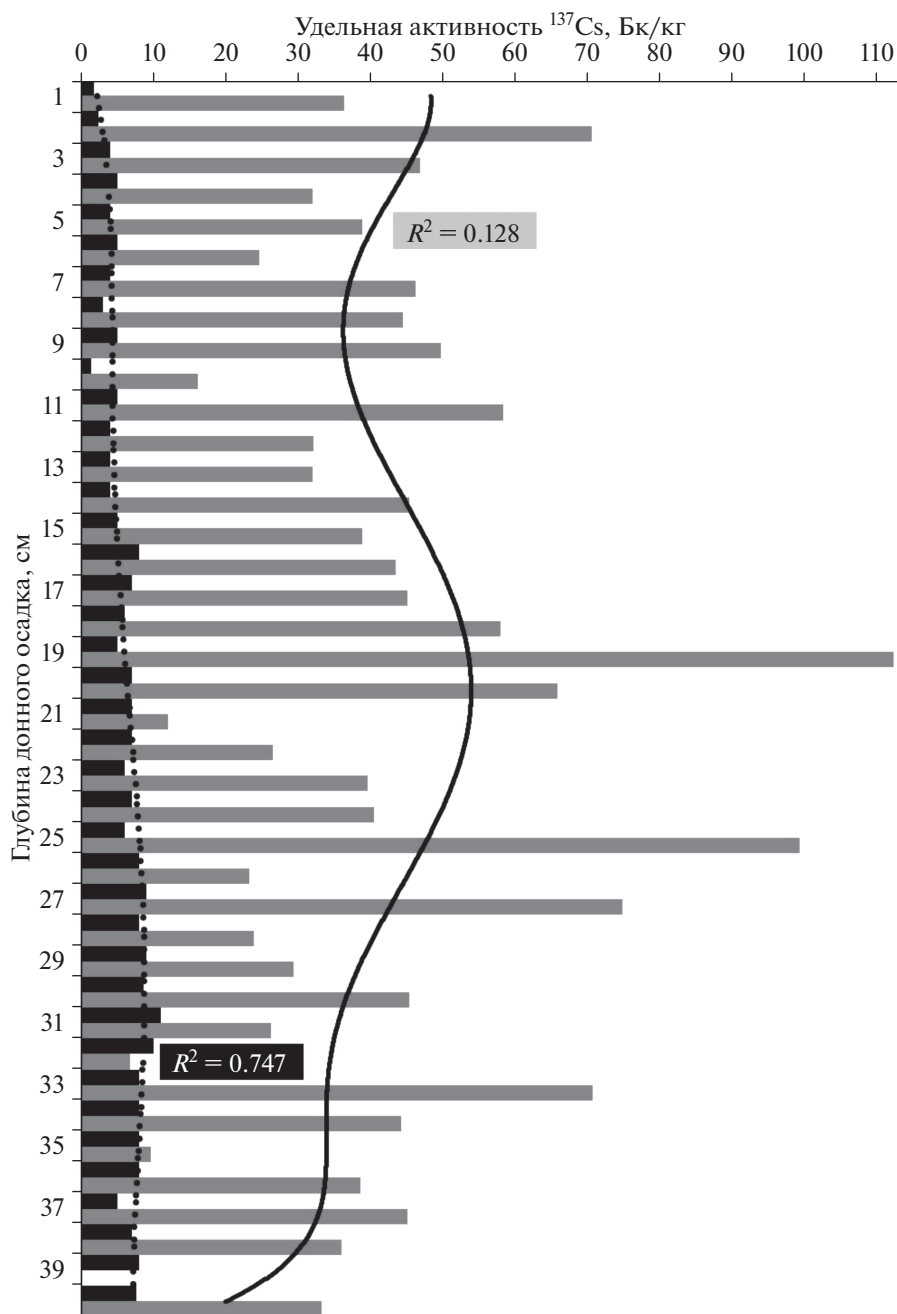


Рис. 7. Вертикальное распределение ^{137}Cs в осадках в точке расположения станций ВР-9712 (серое + сплошная линия) и АМК-6252 (черное + пунктирная линия).

ки, отобранной на станции АМК-6245, располагалась на глубине осадка 9–12.

Вторая точка наблюдений в этой части Обской ЗПА позволяет провести сравнение колонок, отобранных на станциях ВР-0182 и АМК-6245А с интервалом во времени в 18 лет. Если в 2001 г. удельные активности радиоцезия в вертикальном разрезе осадков колебались в диапазоне от 15 до 28 Бк/кг, не проявляя выраженного тренда, то в колонке, отобранной в 2019 г., отмечалось сниже-

ние активности до условно фоновых значений, отмеченных на первом этапе исследований, не только в верхнем слое, но и по глубине осадка. При этом закономерность изменений становится более выраженной: значение R^2 модели аппроксимации изменилось с 0.139 до 0.725.

Северная часть Обской ЗПА, в которой повторный отбор колонок донных отложений был сделан в координатах станций ВР-9701/АМК-6243 и ВР-9751/АМК-6243А, расположена в осад-

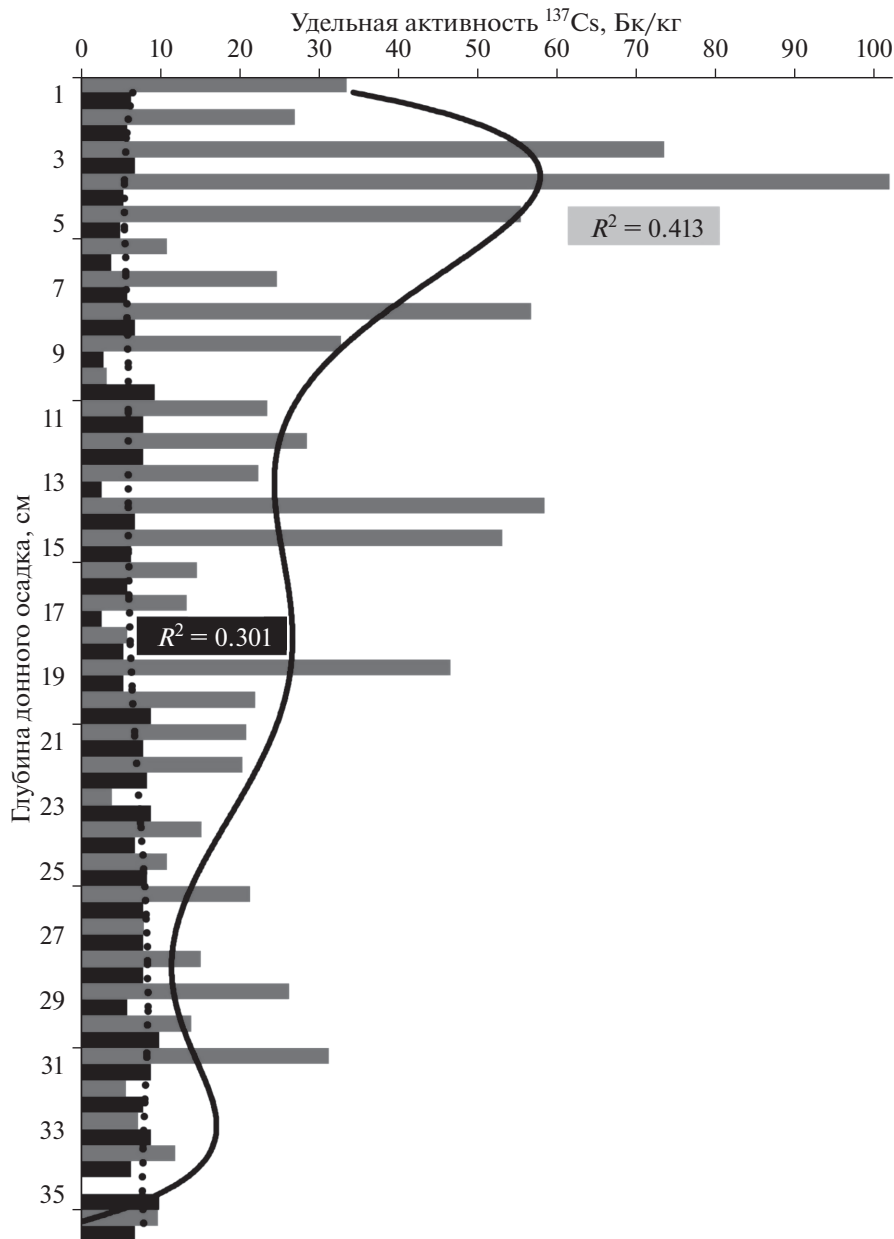


Рис. 8. Вертикальное распределение ^{137}Cs в осадках в точке расположения станций ВР-9710 (серое + сплошная линия) и АМК-6247 (черное + пунктирная линия).

ках палеорусловой части фации внутреннего шельфа. Сравнивая полученные результаты, следует отметить тот факт, что в первой точке (ВР-9701/АМК-6243) также отмечается существенное снижение уровня активности ^{137}Cs . Если в колонке ВР-9701, отобранной на первом этапе исследований, диапазон тренда колебался от 15 до 48 Бк/кг, то в колонке АМК-6243, полученной на втором этапе через 22 года, этот диапазон составляет 0–9 Бк/кг. При этом обе кривые имеют достаточно нетипичную для Обской ЗПА конфигурацию, а именно — выраженные отдельные интервалы повышенных активностей, что более ха-

рактерно для Енисейской ЗПА. Временная разница в расположении зоны максимальной активности в вертикальном профиле отсутствует и в обеих колонках приурочена к горизонту 9 см. Удельная активность ^{137}Cs в верхнем слое снизилась с 38 до 4 Бк/кг, достигнув условного фона. Для второй точки наблюдений (ВР-9751/АМК-6243А) также характерным является снижение удельной активности радиоцезия, причем, по всей длине вертикального профиля, а не только в верхнем слое.

В целом, в вертикальном распределении ^{137}Cs по Обской ЗПА не наблюдается настолько ярко

выраженных максимумов активности, как это выявлено в Енисейской зоне, что заставляет нас быть более сдержанными при попытке интерпретации полученных данных для определения скоростей седиментации. Но по двум точкам из шести, расположенным на станциях ВР-0182/АМК-6245А и ВР-9712/5326, можно с осторожностью предположить, что максимумы активности, отмеченные в верхнем слое осадков (0–2 см), за 18–19 лет переместились вниз на расстояние около 40–50 мм. Это позволяет со всеми сделанными выше оговорками оценить скорость осадконакопления в южной и центральной частях Обской ЗПА величинами в 2.3–2.7 мм в год.

Полученные значения отличаются в 1.7–1.8 раз в меньшую сторону от результатов, приведенных ранее для точек в координатах станций ВР-9710 и ВР-9712 по материалам 1997 г. [19, 30]. Возможно, часть этих расхождений объясняется неучтенным уплотнением осадочных отложений, которое произошло за время в 18–19 лет между наблюдениями. Расхождения полученных нами данных с данными [16] оказались более существенными. Значения скорости седиментации, приведенные в [16] и полученные на материале, отобранном одновременно с нашими наблюдениями в 2016 г. на ст. АМК-5326, в 5 раз превышают наши оценки и почти в 3 раза результаты [19, 30], полученные на основе проб со станции ВР-9712, отличающейся по положению на 3 кабельтовых. Существующее расхождение в важных для региона оценках, вероятнее всего, объясняется методологическими причинами. Авторы цитируемых публикаций, например, в своих построениях опираются на ничем не обоснованное предположение, что в изучаемых колонках они “видят” след чернобыльской катастрофы 1986 г. Однако известно, что измерения плотности выпадений ^{137}Cs непосредственно на акватории арктических морей никем не проводились, а основное количество “чернобыльских” радионуклидов выпало в Европе и лишь около 1% предположительно (!) могло попасть непосредственно во все арктические регионы севернее 70-й широты [18, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обский и Енисейский эстуарии и прилегающий мелководный шельф Карского моря являются важнейшей областью взаимодействия в глобальной системе континент–Северный Ледовитый океан. Изменения радиационного состояния донных отложений в этой области, произошедшие за рассматриваемый период около 20 лет, демонстрируют определенную геохимическую устойчивость экосистемы региона к радиационным нагрузкам и ее способность к самоочищению на многолетнем масштабе.

Наиболее яркой иллюстрацией потенциала самоочищения является практически полное исчезновение Обской ЗПА ^{137}Cs , в области локализации которой активность радионуклидов в донных отложениях в настоящее время находятся на уровне условно-фоновых значений для этого района Арктики, не превышающих 10 Бк/кг. Изначально более загрязненная Енисейская ЗПА “потеряла” за примерно 20 лет не менее 50% аккумулярованного радиоцезия, и в настоящее время максимальные величины удельной активности ^{137}Cs , незначительно превышающие 100 Бк/кг, обнаружены лишь в единственной точке на трех отдельных 10 мм горизонтах осадков. Можно уверенно предположить, что в течение ближайших 15–18 лет уровень загрязнения радиоцезием Енисейской ЗПА также деградирует до уровня фоновых показателей. Это может произойти лишь в том случае, если в бассейне Енисея не возобновятся сбросы ЖРО в гидрографическую сеть.

Основными факторами снижения удельной радиоактивности в осадках являются естественные процессы радиоактивного распада изотопов, диффузии радионуклидов в нижние горизонты и биотурбации осадков богатым бентосным сообществом эстуарных зон. Конкретизация границ экосистемы во многом зависит от цели исследований [25]. В случае исследований судьбы радиоактивного загрязнения нижней границей экосистемы Карского моря и эстуариев Оби и Енисея можно условно считать верхнюю границу зоны диагенеза. Именно в направлении этой границы перемещается остаточное радиоактивное загрязнение вместе с ассимилировавшим его осадком, покидая таким образом саму активно функционирующую экосистему.

В этом процессе ключевую роль играет геохимическая барьерная зона, формирующаяся в области взаимодействия речных и морских вод в эстуариях и на прилежащем морском шельфе. Эта зона на первом этапе происходящих в ней процессов не пропускает загрязнения, приносимые речными водами, осаждая его в своих пределах, а на втором этапе – после ослабления источников радиационного воздействия, обеспечивает мощный постоянный вертикальный поток взвешенного вещества, который надежно перекрывает накопленные в осадках загрязнения. На втором этапе ключевое значение приобретают параметры осадочного потока, которые отражаются в вертикальных профилях осадков.

Одним из таких естественных параметров, влияющих на геохимическую эволюцию радиационного загрязнения, являются многолетние колебания речного стока, прежде всего расходов взвешенных наносов, как главного агента переноса нерастворимых и слаборастворимых форм радиоцезия и формирования осадков в геохими-

ческой барьерной зоне. Сравнение наших графиков вертикального распределения ^{137}Cs в Обской и Енисейской ЗПА с графиками многолетних колебаний среднегодовых расходов взвешенных наносов Оби и Енисея [1] продемонстрировало их отчетливое сходство [13].

Вероятно, свой вклад в формирование относительно выровненного распределения ^{137}Cs в Обской ЗПА по сравнению с ярко выраженными обособленными интервалами его аномальных активностей в Енисейской ЗПА оказали и достаточно сложные аккумулятивно-транзитные характеристики геохимических ландшафтов водосборного бассейна Обской губы [24]. Также вероятно и воздействие ветро-волновых процессов, влияющих на особенности седиментации в пределах Обь-Енисейского мелководья на фоне существенных различий ряда параметров, которыми обусловлено ежегодное формирование Обского и Енисейского плумов [26].

Анализ изменений вертикального распределения радиоцезия во времени позволяет сделать оценки скоростей осадконакопления в различных фациальных обстановках геохимической барьерной зоны “река—море”. Полученные величины скоростей седиментации в Енисейской ЗПА для осадков проксимальной части фации эстуариев составили от 3.16 до 3.68 мм в год, а для осадков дистальной части фации эстуариев — от 4.7 до 5.8 мм/год. В последнем случае нам представляется более достоверными нижние значения интервала, близкие к 4.7 мм/год.

Результаты настоящего исследования впервые иллюстрируют исчезновение одних ранее установленных участков радиоактивного загрязнения донных отложений и устойчивое улучшение радиационного состояния других в ключевом районе Арктики, принимающем крупнейший в регионе пресноводный сток.

Проблема оценки изменений особенностей седиментации во времени с целью датирования конкретных горизонтов донных отложений является принципиально важной при анализе геохимической устойчивости любой морской экосистемы, особенно при оценке ее способности к самовосстановлению при поступлении долгоживущих загрязнений. Получение достоверных и надежных данных позволит более уверенно прогнозировать развитие процессов самоочищения экосистемы, при этом получение таких данных требует тщательного методического подхода.

Благодарности. Авторы благодарят капитана НИС “Академик Мстислав Келдыш” Ю.Н. Горбача и весь экипаж легендарного судна. Мы особенно благодарны Г.И. Надъярных, выполнявшей трудоемкий цикл работ от пробоотбора на борту судна 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, проведении экспедиционных исследований и подготовке настоящей статьи; грант № 18-05-00480 при проведении экспедиционных работ части научной группы ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабич Д.Б., Большианов Д.Ю., Зайцев А.А. и др.* Региональные особенности формирования эстуарно-дельтовых систем Арктического побережья Сибири // Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: Гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития. М.: ГЕОС, 2007. С. 112–240.
2. *Галимов Э.М., Лаверов Н.П., Степанец О.В., Кодина Л.А.* Предварительные результаты эколого-геохимического исследования Арктических морей России (по материалам 22-го рейса НИС “Академик Борис Петров”) // Геохимия. 1996. № 7. С. 579–597.
3. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река—море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
4. *Емельянов Е.М.* Барьерные зоны в океане. Осадко- и рудообразование. Геоэкология. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 410 с.
5. *Казakov С.В.* Управление радиационным состоянием водоемов-охладителей АЭС. Киев: Техника, 1995. 192 с.
6. *Казakov С.В., Уткин С.С.* Подходы и принципы радиационной защиты водных объектов. М.: Наука, 2008. 318 с.
7. *Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.* Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240 с.
8. *Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л. и др.* Фациальная изменчивость поверхностного слоя осадков Обь-Енисейского мелководья и эстуариев Оби и Енисея // Литология и полез. ископаемые. 2005. № 5. С. 472–484.
9. *Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р.* Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
10. *Лисицын А.П.* Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении. М.: Наука, 1988. 309 с.
11. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
12. *Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Кириллова Е.Э.* Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX—XXI веков. Часть 2. Донные отложения // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 4. С. 24–35.
13. *Мирошников А.Ю.* Закономерности распределения радиоцезия в донных отложениях Карского моря // Геоэкология. 2012. № 6. С. 516–526.
14. *Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Дубинина Е.О. и др.* Изменение радиационного состояния донных отложений Енисейского залива // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 6. С. 673–676.

15. Полицартов Г. Г., Егоров В. Н. Морская динамическая радиохемозоология. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.
16. Русаков В.Ю., Борисов А.П., Соловьева Г.Ю. Скорости седиментации (по данным изотопного анализа ^{210}Pb и ^{137}Cs) в разных фациально-генетических типах донных осадков Карского моря // Геохимия. 2019. Т. 64. № 11. С. 1158–1174.
17. Семакин И.Г., Хеннер Е.К. Информационные системы и модели. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2005. 303 с.
18. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря (Белая книга – 2000). М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
19. Степанец О.В., Кремлякова Н.Ю., Лигаев А.Н. Использование нового метода определения ^{210}Pb (^{90}Sr) в пробах донных отложений для оценки скорости осадконакопления в эстуариях сибирских рек // Опыт системных экологических исследований в Арктике. М.: Научный Мир, 2001. С. 425–429.
20. 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.
21. Степанец О.В., Борисов А.П., Травкина А.В. и др. Использование радионуклидов ^{210}Pb и ^{137}Cs для геохронологии современных осадков арктического бассейна в местах захоронения твердых радиоактивных отходов // Геохимия. 2010. № 4. С. 424–429.
22. Aliev R.A., Bobrov V.A., Kalmykov S.N. et al. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2007. V. 274. № 2. P. 315–321.
23. MacDonald R.W., Bewers J.M. Contaminants in the Arctic marine environment: priorities for protection // Journal of Marine Science. 1996. V. 53. № 3. P. 537–563.
24. Miroshnikov A. Yu., Simenkov I.N. Migration of Global Radioactive Fallouts to the Arctic Region (on the example of the Ob River basin) // Radiation Protection Dosimetry. Oxford University Press, 2012. V. 152. № 1–3. P. 89–93.
25. Odum E.P. Fundamentals of Ecology. Philadelphia: Saunders, 1953. 384 p.
26. Osadchiev A.A., Asadulin En.E., Miroshnikov A. Yu. et al. Bottom Sediments Reveal Inter-Annual Variability of Interaction between the Ob and Yenisei Plumes in the Kara Sea // Scientific Reports. 2019. № 9. No 18642.
27. Povinec P.P., Osvath I., Baxter M.S et al. Summary of IAEA-MEL's investigation of Kara Sea radioactivity and radiological assessment // Marine Pollution Bulletin. 1997. V. 37. № 7–12. P. 235–241.
28. Standring W.J.F., Stepanets O.V., Brown J.E. et al. Radionuclide contamination of sediment deposits in the Ob and Yenisei estuaries and areas of the Kara Sea // Journal of Environmental Radioactivity. 2008. V. 99. № 4. P. 665–679.
29. Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al. Arctic (palaeo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. № 11–13. P. 1485–1511.
30. Stepanets O.V., Borisov A.P., Ligaev A.N. et al. Geoecological investigations of artificial radionuclides in the aquatic system of the Ob River and Kara Sea // Radio-protection. 2009. V. 44. № 5. P. 311–314.
31. Stepanets O.V., Borisov A.P., Solov'eva G. Yu. Distribution of anthropogenic radionuclides in the estuaries of Ob and Yenisei rivers and adjacent Kara Sea // Berichte zur Polarforschung. 1999. V. 300. P. 132–140.

Radiation-Geochemical Stability of Bottom Sediments in the Ob and Yenisei Estuaries and in the Adjacent Shoalness of the Kara Sea

A. Yu. Miroshnikov^{a, #}, M. V. Flint^b, E. E. Asadulin^a, V. B. Komarov^a

^aInstitute of Geology of Ore Deposits Petrography Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

^bShirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

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

This paper reports the results of investigations on the radioecological state of the bottom sediments of the Ob-Yenisei shoalness and the Ob and Yenisei estuaries. Materials were obtained in two periods: 1995–2001 and 2014–2019 during seven expeditions on R/V “Akademik Boris Petrov”, “Professor Shtokman” and “Akademik Mstislav Keldysh”. Re-sampling of bottom sediment columns at key-points in areas of increased activity of radiocesium and subsequent analysis of the distribution of radionuclides allowed establishing positive trends in the change of the radiation state of regional ecosystem. The total degradation of the Ob increased radiocesium activity zone and quite significant of the Yenisei zone (primarily most polluted) were detected. Comparison of current specific activity max-positions in vertical distribution of ^{137}Cs in sediment cores allowed determining sedimentation rate in the distal and proximal facies of Yenisei estuary as 4.7–5.8 and 3.2–3.7 mm/yr, respectively. The established changes that have occurred over a period of about 20 years prove the ability of the Kara sea ecosystem to self-purify. Processes of diffusion and assimilation of pollutants by bottom sediments play significant role in self-regeneration of ecosystem. That is most intense in influence zone of the river-sea geochemical barrier.

Keywords: Kara sea, Ob-Yenisei shoalness, estuary, Ob, Yenisei, radioactivity, radiocesium, geochemical barrier zone, bottom sediments, ^{137}Cs , sedimentation, self-regeneration, ecosystem