

УДК 550.42

DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5067

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Научная статья

Оценка потоков депонирования ^{137}Cs в донных отложениях реки Енисей на основе современных методов расчёта

В.И. Вахрушев^{1,2✉}, А.Я. Болсуновский¹

¹ Институт биофизики Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской Академии наук», Россия, г. Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

✉ vavadbka@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Многолетняя работа реакторного и радиохимического предприятий Горно-химического комбината привела к масштабному накоплению радионуклидов в донных отложениях реки Енисей. Для восстановления хронологии и интенсивности поступления радионуклидов в донные отложения р. Енисей необходима информация о параметрах осадкообразования. Для озерных систем используются общепринятые методы CRS и АМДО расчета массовых скоростей осадконакопления и потоков вещества, которые при определенных допущениях могут быть применимы для изучения осадкообразования реки Енисей. **Цель.** Оценка вертикальных потоков депонирования ^{137}Cs в донных отложениях на протяжённом участке р. Енисей с использованием комплекса методов расчёта скорости осадконакопления. **Объект.** Керны донных отложений, отобранные в пойме р. Енисей на протяжённом участке по течению реки от г. Красноярска, включая зону влияния деятельности Горно-химического комбината. **Методы.** Удельную активность радионуклидов определяли на полупроводниковом гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором (Canberra, США). Расчёт скоростей осадконакопления проводился с помощью стандартного метода на основе неравновесного ^{210}Pb метода CRS и по отношению радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. Расчёт вертикальных потоков проводился методами CRS и АМДО. **Результаты.** Интервалы скоростей осадконакопления, полученные методами АМДО и CRS, для донных отложений контрольных районов р. Енисей и ближней зоны влияния Горно-химического комбината совпадают. Для контрольного района отбора донных отложений вблизи с. Шивера отмечены более высокие значения вертикальных потоков ^{137}Cs в донных отложениях, по сравнению с потоками ^{137}Cs для других контрольных районов (Красноярск и Есаулово). Известно, что с. Шивера расположено в 30-км зоне Горно-химического комбината и возможно аэрозольное поступление ^{137}Cs с Горно-химического комбината на пойму реки. Для двух участков отбора донных отложений вблизи Горно-химического комбината использовали разные методы расчета скорости осадконакопления, но при этом значения максимальных потоков ^{137}Cs в донных отложениях (60000 и 74000 Бк/(м²·год)) существенно не отличались друг от друга. Для отдельных участков поймы реки вблизи Горно-химического комбината обнаружены слои донных отложений с высокой активностью ^{137}Cs , что приводит к увеличению максимального потока ^{137}Cs до 254000–680000 Бк/(м²·год). Полученные данные потоков ^{137}Cs в донных отложениях р. Енисей позволят оценить радиационную нагрузку на исследуемых участках поймы в свете продолжающейся деятельности Горно-химического комбината.

Ключевые слова: донные отложения, река Енисей, ^{137}Cs , скорость осадконакопления, неравновесный ^{210}Pb , отношения техногенных радионуклидов, вертикальные потоки

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024). Авторы благодарят старшего научного сотрудника лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН Дмитрия Владимировича Дементьева за помощь в исследовании донных отложений.

Для цитирования: Вахрушев В.И., Болсуновский А.Я. Оценка потоков депонирования ^{137}Cs в донных отложениях реки Енисей на основе современных методов расчёта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 207–226. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5067

UDC: 550.42

DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5067

Scientific paper

^{137}Cs deposition fluxes in bottom sediments of the Yenisei River calculated using modern methods

V.I. Vakhrushev^{1,2✉}, A.Ya. Bolsunovsky¹

¹ Institute of Biophysics, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Krasnoyarsk, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉vavadbka@yandex.ru

Abstract. Relevance. The long-term operation of the reactors and radiochemical plant of the Mining-and-Chemical Combine have resulted in large-scale accumulation of radionuclides in bottom sediments of the Yenisei River. To reconstruct the chronology and the rates of deposition of radionuclides in the Yenisei bottom sediments, data on sediment formation parameters are needed. For lake systems, the mass rates of sedimentation and the flow of matter are calculated using the generally accepted methods: CRS and AMDO. Under certain assumptions, these methods can be used to study sediment formation in the Yenisei River. **Aim.** To estimate the vertical fluxes of ^{137}Cs deposition in bottom sediments over an extended stretch of the Yenisei River using a set of methods for calculating sedimentation rates. **Material.** Bottom sediments cores collected from the Yenisei River floodplain over an extended stretch of the river downstream of Krasnoyarsk, including the area affected by the Mining-and-Chemical Combine operation. **Methods.** Activity concentrations of radionuclides in the bottom sediments were determined using a semiconductor gamma-spectrometer coupled to a hyper-pure germanium detector (Canberra, U.S.) Sedimentation rates were determined using the standard ^{210}Pb dating, the CRS method, and the ratio of the radionuclides, $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. The vertical fluxes were calculated using the CRS method and the AMDO. **Results.** The ranges of sedimentation rates in the reference areas of the Yenisei River and the Mining-and-Chemical Combine affected near zone obtained using the AMDO and the CRS method were similar. For the reference area at the village of Shivera, the values of the ^{137}Cs vertical fluxes in the bottom sediments determined using the CRS method and the AMDO were higher than the ^{137}Cs fluxes in the reference areas Krasnoyarsk and Esaulovo. As the village of Shivera is located in the Mining-and-Chemical Combine 30-km zone, ^{137}Cs could be deposited in the Yenisei floodplain in the aerosol form. For two bottom sediments collection positions close to the Mining-and-Chemical Combine, sedimentation rates were calculated using different methods, but the values of the maximal ^{137}Cs fluxes in the bottom sediments did not differ substantially from each other (60000 and 74000 Bq/(m²·yr)). Bottom sediments layers with high activity concentrations of ^{137}Cs were detected at some positions of the floodplain, which increased the maximal ^{137}Cs flux to 254000–680000 Bq/(m²·yr). The data obtained on the ^{137}Cs fluxes in the Yenisei bottom sediments can be used to estimate the radiation load on the study floodplain areas in the context of the ongoing operation of the Mining-and-Chemical Combine.

Keywords: bottom sediments, the Yenisei River, ^{137}Cs , sedimentation rate, ^{210}Pb unsupported, artificial radionuclide ratios, vertical fluxes

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project no. FWES-2024-0024). The authors are grateful to Dmitry V. Dementyev, Senior Researcher of the Radioecology Laboratory at the Institute of Biophysics SB RAS, for his help in studying bottom sediments.

For citation: Vakhrushev V.I., Bolsunovsky A.Ya. ^{137}Cs deposition fluxes in bottom sediments of the Yenisei River calculated using modern methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 207–226. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5067

Введение

Развитие атомной энергетики, испытания ядерного оружия и аварии на АЭС привели к глобальному радиоактивному загрязнению окружающей среды. Кроме глобальных источников, существуют и региональные источники поступления техногенных радионуклидов в окружающую среду. Среди таких источников на территории Сибири известен Горно-химический комбинат (ГХК) «Росатома»,

располагающийся на восточном берегу р. Енисей вблизи г. Железногорск в Красноярском крае. Более чем 60-летняя деятельность реакторного и радиохимического производств комбината привела к радиоактивному загрязнению поймы р. Енисей на большие расстояния по течению реки от комбината. В научных публикациях и ежегодных государственных докладах «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае» отмечается

[1–3], что в границах 1000-километрового участка поймы р. Енисей в зоне наблюдения ГХК имеются участки повышенной аккумуляции техногенных радионуклидов, присутствовавших в штатных и аварийных сбросах комбината. В настоящее время в донных отложениях регистрируется широкий перечень техногенных радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , изотопы европия и др.), в том числе трансурановые элементы [1, 4–7]. Среди техногенных радионуклидов наиболее распространенным и представляющим потенциальную опасность для человека и биоты является ^{137}Cs . Изотоп ^{137}Cs имеет период полураспада $T_{1/2}=30,2$ лет. В фоновых районах поймы р. Енисей выше по течению от ГХК содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs отмечено на уровне 20 Бк/кг [8], в донных отложениях (ДО) реки после сбросов ГХК содержание ^{137}Cs достигает нескольких тысяч Бк/кг [1, 5]. Ежегодный мониторинг содержания радионуклидов в слоях донных отложений р. Енисей показал, что вертикальные профили радионуклидов, включая ^{137}Cs , имеют ряд максимумов, обусловленных как гидрологическим режимом реки, так и уровнем штатных сбросов комбината. В работах [1, 6] показано, что одним из факторов, оказавших влияние на возникновение максимумов ^{137}Cs высокой активности на разных глубинах кернов ДО р. Енисей, был экстремальный паводок 1966 г. Этот паводок привел к затоплению береговой зоны ГХК, смыву с территории взвешенных частиц и переносу взвеси с радионуклидами на большие расстояния [1, 2, 5, 6]. Характер поступлений радионуклидов в воду штатных сбросов ГХК, а также гидрологический режим реки сформировали радиоэкологическую обстановку поймы р. Енисей. Поступающие в пойму р. Томи аэрозольные и водные поступления техногенных радионуклидов Сибирского химического комбината «Росатома» (г. Северск Томской области) также определили радиоэкологическую обстановку региона [9].

Восстановление хронологии поступления радионуклидов в ДО р. Енисей требует информированности о параметрах осадкообразования в местах повышенной аккумуляции наносов. Поэтому большое внимание уделяется такому параметру, как скорость осадконакопления. Ранее в работах [6, 7, 10] были приведены результаты расчёта скоростей осадконакопления р. Енисей на основе разных радиоизотопных методов: неравновесного ^{210}Pb , изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ и маркерного ^{137}Cs . Полученные нами скорости осадконакопления ДО р. Енисей соответствуют диапазону скоростей для других рек [11–14]. Датировка слоев максимального содержания ^{137}Cs в ДО выявила связь максимумов с периодами крупных паводков на р. Енисей, а также с другими непаводковыми

событиями [6, 7, 10]. В современной седиментологии одним из важных параметров является массовая скорость осадконакопления [15, 16], которая отражает количество взвешенного вещества, поступающего вертикально в осадки за промежуток времени. Массовая скорость оценивается для озёрных систем по одной из основных стандартных моделей – модели постоянного потока CRS [17, 18]. Однако оценка массовой скорости для речных систем в условиях динамической изменчивости вертикального осаждения является сложной задачей. Вместе с тем в литературе встречаются примеры анализа массовых скоростей при изменяющихся речных условиях осадконакопления [19–21].

При изучении техногенного загрязнения ДО такой крупной реки, как Енисей, необходимо знать не только общее количество взвешенного вещества, поступающего в осадки, но и количество конкретного поллютанта (радионуклида, тяжелого металла и др.). Для этого оценивают вертикальный поток вещества за определенный период времени с использованием расчетных методов CRS и АМДО [22–24]. Для озёрных систем вертикальный поток определённого загрязнителя в ДО оценивается на основе известных данных о массовых скоростях поступления ^{210}Pb в осадки озёр [15, 25]. В работах [23, 26] приведены данные по вертикальным потокам трансуранового элемента плутония и ^{137}Cs для ряда районов Черного моря. Для водоёмов Северного полушария опубликованы данные по потокам ^{210}Pb [27]. Наши исследования ДО р. Енисей направлены на изучение осадков заводей, проток и стариц в русле реки. На этих участках возможен переход ламинарного речного потока в турбулентный поток при столкновении его с краями объёма илового резервуара (в литературе используется также понятие «иловая банка» или «седиментационная ловушка») [28, 29]. При этом скорость в потоках неравномерна, что вместе с другими факторами затрудняет точное математическое описание поведения потоков осадочного вещества в пойменных заводях. Применяемые авторами методы CRS и АМДО для расчета потоков в озерных системах с учетом некоторых допущений могут быть использованы для расчета массовых скоростей осадконакопления и потоков, например, радионуклидов в речных системах. Необходимость расчета этих параметров вызвана продолжающейся деятельностью в бассейне р. Енисей крупного источника техногенеза (ГХК) и радиоэкологической целесообразностью оценки потоков ^{137}Cs в ДО. Поэтому целью настоящей работы является оценка вертикальных потоков депонирования ^{137}Cs в ДО на протяжённом участке р. Енисей с использованием комплекса методов расчёта скорости осадконакопления.

Объекты и методы исследования

Районы отбора проб и аналитические методы исследований донных отложений

В работе исследовали керны донных отложений, отобранные в пойме р. Енисей на участке протяжённостью 98 км по течению реки от г. Красноярск до с. Большой Балчуг (далее с. Балчуг) (рис. 1). Данный участок включает в себя контрольные районы отбора кернов в окрестностях г. Красноярск (0–16 км) и вблизи сёл Есаулово и Шивера (45 и 72 км по течению реки от Красноярска, соответственно). Эти районы расположены выше по течению реки от ГХК. Район отбора вблизи с. Балчуг расположен на расстоянии 98 км по течению реки от г. Красноярск (ниже от ГХК) и в 30-км зоне влияния ГХК. Пробоотбор кернов ДО в указанных районах р. Енисей проводился в период с 2002 по 2022 гг. Всего был отобран и проанализирован 21 керн.



Рис. 1. Карта-схема районов отбора кернов донных отложений реки Енисей

Fig. 1. Diagrammatic map of the areas where cores of bottom sediments of the Yenisei River were collected

При отборе кернов учитывалась структура поймы реки. Пробоотбор осуществлялся в заводях прирусловой поймы, в протоках и в ежегодно подтапливаемых старицах нижней поймы р. Енисей вдали от склонов. Пробы кернов извлекали с помощью стальных цилиндрических пробоотборников длиной до 1 м с диаметрами 9 и 11 см и с лепестковыми затворами. В лабораторных условиях керны донных отложений делились на слои (в среднем по 3 см). В дальнейшем пробы сушили до постоянной массы при температуре 65 °С в течение нескольких дней, после чего их гомогенизировали путём измельчения до однородного состояния и взвешивали. Для контрольных районов выше ГХК определена средняя плотность сухих донных отложений – $1,29 \pm 0,08$ г/см³. В районе с. Балчуг средняя плотность составила $1,23 \pm 0,13$ г/см³. В поверхностных и в некоторых приповерхностных слоях кернов

наблюдались наименьшие средние плотности по сравнению со всем керном на уровне 0,7–0,8 г/см³, что связано с присутствием растительности или органических веществ в верхнем слое. В связи с этим при дальнейших расчётах, за некоторыми исключениями, верхний слой не учитывался. Самый нижний слой керна исключался из расчётов, так как представлял собой остаточную часть керна, извлекаемую из лепестка, которая увеличивала ошибку расчёта плотностей.

Для установления элементного состава образцов ДО были измерены концентрации (%) основных элементов методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе VRA-20R Carl Zeiss (Йена, Германия) в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований СО РАН в г. Новосибирске (Россия). Ожидается, ДО рек содержали большое количество SiO₂ и Al₂O₃. Концентрации SiO₂ в отложениях с нескольких позиций в контрольных районах и вблизи с. Балчуг варьировали от 56 до 68 мас. %. Диапазон концентраций Al₂O₃ в отложениях с позиций с. Балчуг и контрольных районов составлял 11,9–13,1 мас. %. Концентрации Fe₂O₃ в образцах, отобранных с нескольких позиций с. Балчуг и контрольных районов, варьировали от 4,5 до 6,0 мас. %. В пробах ДО также содержались MgO, CaO, Na₂O, K₂O и TiO₂, которые не превышали 1–3 мас. % и существенно не различались между районами отбора проб. Пределы обнаружения большинства осадкообразующих компонентов составили 0,02–0,005 %; MgO и Na₂O имели пределы обнаружения 0,05 и 0,1 % соответственно. Таким образом, концентрации основных элементов в ДО существенно не различались между позициями в одном районе отбора проб, а также между районами отбора проб выше и ниже ГХК.

После сушки образцы ДО помещали в пластиковые контейнеры для измерения удельной активности радионуклидов на полупроводниковом гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором, который мог регистрировать γ -кванты с энергией от 30 кэВ (Canberra, США). Анализ спектров проводился с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США). Удельная активность радионуклидов в ДО (Бк/кг) рассчитывалась на сухую массу.

Численные методы определения осадкообразующих параметров

В данной работе для определения скоростей осадконакопления (V, см/год) ДО используются результаты анализа вертикальных распределений техногенных радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs и природных ^{210}Pb и ^{214}Pb . Расчёт скоростей осадконакопления проводился с помощью стандартного метода на основе неравновесного ^{210}Pb , на основе метода постоянного потока (Constant Rate of Supply – CRS), и

по отношению техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ [6, 7, 10]. Впервые расчёт массовых скоростей осадконакопления и вертикальных потоков для реки Енисей проводился методом CRS и методом абсолютных масс донных отложений (АМДО). В дальнейших расчётах массовой скорости осадконакопления и вертикальных потоков ^{137}Cs с помощью АМДО используются скорости осадконакопления, полученные с помощью неравновесного ^{210}Pb и отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$.

Модели на основе неравновесного ^{210}Pb

Скорость осадконакопления была рассчитана нами с помощью стандартной модели неравновесного ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$) и CRS.

Для количественного определения неравновесного ^{210}Pb в слоях ДО были измерены изотопы ^{210}Pb и ^{214}Pb , так как радионуклиды в ряду распада $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ находятся в состоянии векового равновесия, и $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ рассчитывается по формуле:

$$A(^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}) = A(^{210}\text{Pb}) - A(^{214}\text{Pb}).$$

Период полураспада ^{210}Pb составляет 22,2 года, а изотопа ^{214}Pb – 26,8 минут.

Тогда скорость осадконакопления рассчитывается как отношение постоянной распада $\lambda(^{210}\text{Pb})$ к показателю экспоненты (ϵ), полученное по результатам аппроксимации распределения активности $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ в керне ДО:

$$V = \lambda/\epsilon.$$

Из литературы известно, что существующие тематические модели расчёта скорости осадконакопления на основе $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и, в частности, CRS в основном применяются при работе с озёрными донными отложениями [30, 31]. Как уже было отмечено ранее, речные системы имеют динамически меняющиеся условия осадкообразования, что затрудняет условия использования моделей с $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$. Для расчётов принято допущение, что в «седиментационной ловушке» реки преобладает вертикальная составляющая скорости накопления осадков и это, соответственно, приводит к увеличению вертикального осаднения. Поэтому для общего представления об аккумуляции ^{137}Cs в нижней пойме р. Енисей и оценки его потоков в ДО нами сделана попытка использования модели CRS в условиях речной системы.

Модель CRS основана на предположении, что осаднение избыточного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ в ДО постоянно во времени, а вертикальное распределение неравновесного ^{210}Pb отражает изменчивость скорости осадконакопления и начальной концентрации ^{210}Pb в ДО. Модель позволяет рассчитать скорость осадконакопления из массовой скорости осадконакопления (V_r), которая показывает плотностную характеристику осадка на определённой глубине. Ис-

пользуя модель CRS и закон радиоактивного распада, можно рассчитать скорость осадконакопления в слое керна ДО на глубине x по формуле:

$$V = \frac{V_r}{\rho},$$

где V_r – массовая скорость накопления осадочного материала ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$), зависящая от мощности слоя и удельной активности $A(^{210}\text{Pb}_{\text{нр}})$ с ее изменениями в профиле керна, учитывающей радиоактивный распад ^{210}Pb ; ρ – плотность пробы на глубине x ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Модель на основе отношений техногенных радионуклидов

В данной модели для ДО района реки ниже по течению от ГХК скорости осадконакопления были рассчитаны по известным отношениям активностей $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. Для этого строятся функциональные зависимости для отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ от глубины нахождения слоя ДО. Далее проводится экспоненциальная аппроксимация полученных зависимостей для определения постоянной показателя экспоненты и последующего расчёта скорости (V , см/год) по $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. Во внимание принимаются периоды полураспада ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,2$ л.) и ^{60}Co ($T_{1/2}=5,3$ л.). Если скорость осадконакопления (V) постоянна и нет перемешивания, можно представить время t осаднения седимента на глубине x как $x=V \cdot t$. Проведя замену и представив в ином виде закон радиоактивного распада, определяется удельная активность, после чего можно определить скорость осадконакопления из отношений активностей i -го изотопа на глубине x и на поверхности соответственно. При этом учитывается постоянная распада, характеризующая i -й изотоп (λ_i). Упростив выражение, можно рассчитать скорость осадконакопления для любого отношения изотопов по формуле [7]:

$$V = \Delta\lambda/\epsilon,$$

где $\Delta\lambda$ – полученное значение разностей постоянных распада при показателе экспоненты без учёта скорости осадконакопления; ϵ – значение показателя экспоненты на основе аппроксимации распределения отношений измеренных удельных активностей радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в керне ДО.

Модели для расчёта вертикального потока ^{137}Cs в ДО

Как уже отмечали, при изучении техногенного загрязнения ДО такой крупной реки, как Енисей, необходимо знать не только общее количество взвешенного вещества, поступающего в осадки, но и количество конкретного поллютанта, в частности радионуклида. Для этого оценивают вертикальный поток вещества за определённый период времени на основе расчетных методов CRS или АМДО [23, 32]. В стандартных условиях осадкообразова-

ния озерных систем поступление ^{210}Pb и ^{214}Pb проходит монотонно. Поэтому метод CRS требует точно определенного и равномерно поступающего ^{210}Pb и ^{214}Pb в осадки с глубиной, что в условиях речных ДО не всегда достижимо. Ранее используемые авторами расчетные методы CRS и АМДО для озер с учетом допущений, сделанных нами выше, могут быть использованы для расчета массовых скоростей осадконакопления и потоков радионуклидов речной системы.

Вертикальный поток ^{137}Cs в ДО был рассчитан с использованием массовой скорости осадконакопления по методу АМДО. Массовая скорость осадконакопления (V_r) связана с постоянным параметром осадконакопления (V), рассчитанным по стандартной модели ^{210}Pb и отношению $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ с учетом периодов полураспада, и скорость оценена по следующей формуле [23, 33]:

$$V_r = \frac{m \cdot V}{S \cdot h} \quad \text{или} \quad V_r = \rho \cdot V,$$

где m – масса слоя керна ДО на глубине x (кг); V – скорость осадконакопления (м/год); S – площадь поперечного сечения пробоотборника (м^2); h – высота слоя керна ДО (м); ρ – плотность слоя керна ДО на глубине x ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Тогда вертикальный поток ^{137}Cs (P_{Cs}) ($\text{Бк}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$) будет рассчитан по формуле:

$$P_{\text{Cs}} = A_{\text{Cs}} \cdot V_r,$$

где A_{Cs} – удельная активность ^{137}Cs в слое керна ДО на глубине x ($\text{Бк}/\text{кг}$), приведена на дату отбора.

Вертикальный поток ^{137}Cs в ДО по методу постоянного потока CRS был рассчитан по формуле [32]:

$$P = \lambda \cdot \int_0^{\infty} A(m) dm = \lambda \cdot \int_0^{\infty} A(x) \cdot \rho dx,$$

где $A(m)$ – удельная активность радионуклида ($\text{Бк}/\text{кг}$) в слое керна ДО на глубине массой m , приведённая на дату отбора; m – мощность слоя керна ДО на глубине массой m_i ($\text{кг}/\text{м}^2$); ρ – плотность сухого слоя на глубине x ($\text{кг}/\text{м}^3$). Оценка вертикального потока ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-CRS}}$) была произведена интегрально для всего керна.

Результаты и обсуждение

В данной работе для оценки вертикальных потоков ^{137}Cs исследовали керны ДО, отобранные в пойме р. Енисей на участке протяжённостью 98 км вниз по течению реки от г. Красноярск до с. Балчуг. Этот участок включает в себя контрольные районы отбора ДО в окрестностях г. Красноярск, вблизи сёл Есаулово и Шивера (районы расположены выше по течению реки от ГХК), и район отбора ниже ГХК, вблизи с. Балчуг. Для контрольных

районов реки выше по течению от ГХК содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs находится на уровне глобального фона и не превышает 25 ± 5 Бк/кг [8]. В качестве примера на рис. 2, А, Б приведены типичные вертикальные распределения радионуклидов ^{137}Cs и неравновесного ^{210}Pb в ДО контрольных районов реки. Эти распределения характеризуются присутствием одного или двух максимумов ^{137}Cs , расположенных на разных глубинах. Содержание ^{210}Pb в этих и других кернах ДО характеризуется максимальным значением в верхней части и снижением с глубиной. На основе анализа вертикальных распределений ^{210}Pb для ДО контрольных районов реки выше по течению от ГХК в [7, 10] и в настоящей работе были получены скорости осадконакопления стандартным методом $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ (рис. 2, Б).

Отбор ДО в районах реки ближней и дальней зоны влияния деятельности ГХК показал присутствие в ДО широкого перечня радионуклидов, среди которых доминировал ^{137}Cs [1, 2, 8]. На рис. 2, В, Г в качестве примера показаны вертикальные распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu в кернах ДО, отобранные вблизи с. Балчуг. Аналогично контрольным районам, распределения ^{137}Cs и других радионуклидов в кернах характеризуются одним или двумя максимумами ^{137}Cs , расположенными на разных глубинах. Однако удельные активности ^{137}Cs в этих кернах ДО достигают 1000 Бк/кг для Балчуг-1 и 8800 Бк/кг для Балчуг-2 (рис. 2, В, Г). Эти удельные активности ^{137}Cs многократно превышают максимальные содержания ^{137}Cs для ДО контрольных районов. Ранее, используя отношения радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, рассчитывали скорость осадконакопления для районов зоны влияния ГХК [7, 10].

Использование стандартного метода $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ для расчета скорости осадконакопления позиции Балчуг-1 невозможно из-за присутствия в ДО ^{152}Eu , который мешает определению активности ^{210}Pb . Для позиции отбора Балчуг-2 были отобраны керны ДО, в верхних слоях которого отмечено высокое содержание ^{137}Cs , а также присутствовали другие техногенные радионуклиды (рис. 2, Г). В нижних слоях этого керна содержание ^{137}Cs резко уменьшалось и другие техногенные радионуклиды, включая ^{152}Eu , почти не регистрировались. Отсутствие ^{152}Eu в нижней части керна ДО позволило для этой области определить ^{210}Pb в слоях ДО и рассчитать скорость осадконакопления стандартным методом $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ (рис. 2, Г). Для верхней части керна позиции Балчуг-2 скорость осадконакопления была рассчитана с использованием отношения радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. На рис. 2, Г приведены примеры расчета скоростей осадконакопления для керна Балчуг-2 с использованием разных методов (неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$).

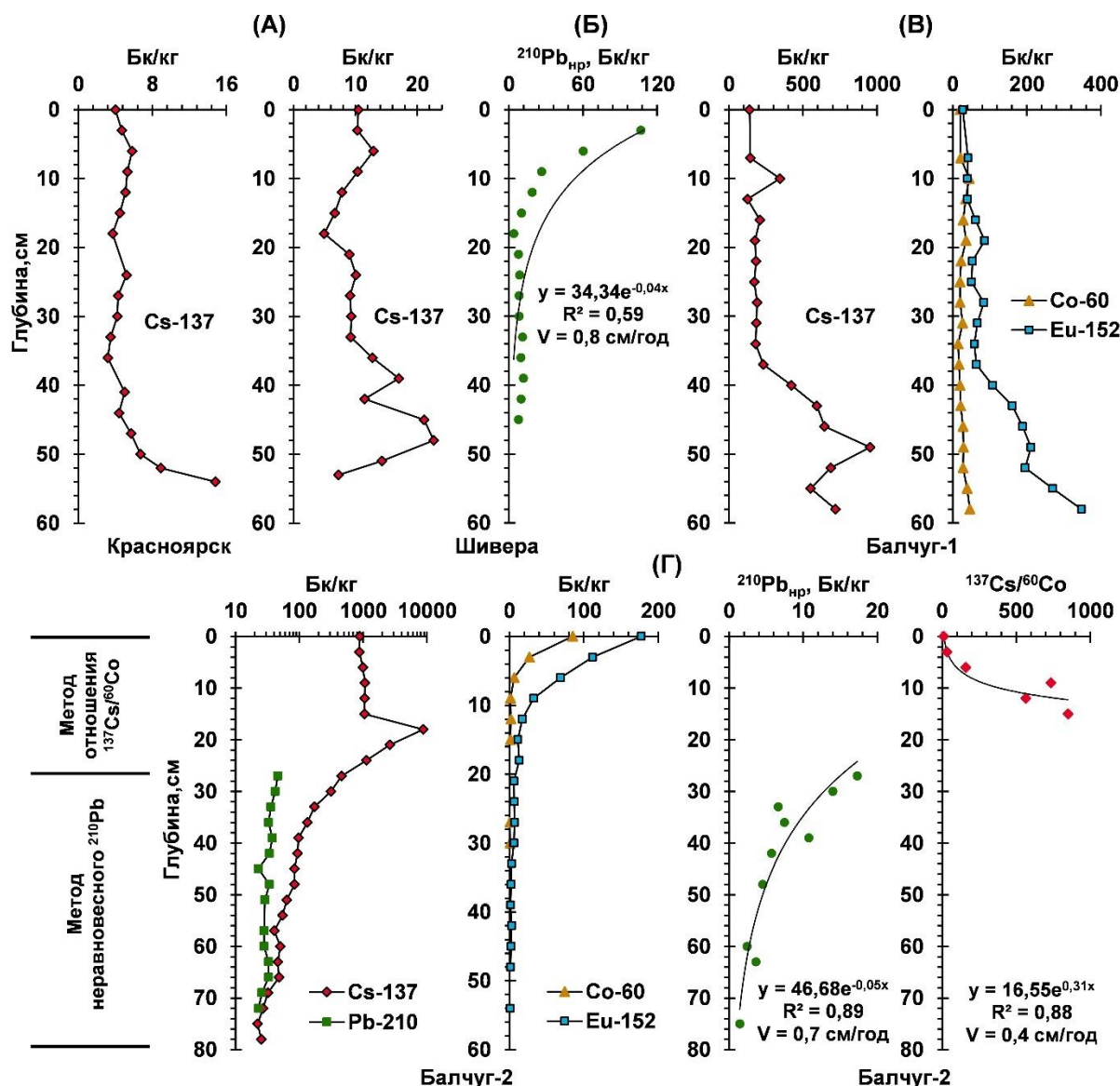


Рис. 2. Примеры вертикального распределения техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co) и неравновесного ^{210}Pb в ДО на участке по течению реки Енисей от г. Красноярск до с. Балчуг (А–Г). Примеры расчёта скорости осадконакопления стандартным методом с помощью неравновесного ^{210}Pb (Б) и комплексного расчёта скорости осадконакопления разными методами (Г)

Fig. 2. Examples of the vertical distribution of artificial radionuclides (^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co) and ^{210}Pb in the bottom sediment (BS) downstream of the Yenisei River, from Krasnoyarsk to the village of Balchug (A–Г). Examples of the calculation of sedimentation rate using the standard ^{210}Pb dating (B) and the complex calculation of sedimentation rate using different methods (Г)

Для расчёта вертикальных потоков ^{137}Cs исследовали многие керны ДО, отобранные как в контрольных районах реки Енисей (вне сбросов ГХК), так и в зоне влияния сбросов ГХК (с. Балчуг). Используя вертикальные распределения неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$, отношений техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и их аппроксимации в кернах ДО были рассчитаны следующие параметры: скорости осадконакопления (V , см/год), массовые скорости осадконакопления ($V_{\text{г}}$, кг/(м²·год)) и вертикальные потоки ^{137}Cs (P_{Cs} , Бк/(м²·год)). В качестве основно-

го метода расчёта потока ^{137}Cs в ДО был использован метод АМДО. Для кернов ДО из контрольных районов выше по течению реки от ГХК («Красноярск», «Есаулово» и «Шивера») скорости осадконакопления $V_{\text{АМДО}}$, рассчитанные стандартным методом на основе $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$, были использованы для расчёта скоростей $V_{\text{г-АМДО}}$ и $P_{\text{Cs-АМДО}}$. Для кернов ДО из района «Балчуг», подверженного влиянию ГХК, для расчёта скоростей $V_{\text{г-АМДО}}$ и $P_{\text{Cs-АМДО}}$ использовали скорости $V_{\text{АМДО}}$, полученные только по отношению $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (район «Балчуг-1»), а также

использовали расчет скорости $V_{\text{АМДО}}$ двумя методами (на основе неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$) для района «Балчуг-2».

В табл. 1 приведены результаты расчёта скоростей осадконакопления ($V_{\text{АМДО}}$), массовых скоростей осадконакопления ($V_{\text{Г-АМДО}}$) и вертикальных потоков ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-АМДО}}$) с помощью метода АМДО для контрольных районов р. Енисей и ближней зоны влияния ГХК. Здесь же приведены данные по удельным активностям ^{137}Cs (Бк/кг) в ДО на дату пробоотбора для исследуемых в этой работе районов. Для кернов ДО, отобранных в районе г. Красноярска, получен интервал скоростей осадконакопления $V_{\text{АМДО}}=0,7\text{--}0,8$ см/год, на основе которого был рассчитан интервал массовой скорости осадконакопления $V_{\text{Г-АМДО}}$ ($8\text{--}12$ кг/(м²·год)). Активность ^{137}Cs в использованных для расчета кернов ДО варьировала в интервале $2\text{--}15$ Бк/кг. Имея вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs и интервал $V_{\text{Г-АМДО}}$ для ДО района г. Красноярска был определен диапазон потоков $P_{\text{Cs-АМДО}}$ ($38\text{--}74$ Бк/(м²·год)) со средним значением потока $P_{\text{Cs-АМДО}}=51\pm 9$ Бк/(м²·год) (табл. 1).

Для кернов ДО, отобранных в районе с. Есаулово, также был получен интервал скоростей осадконакопления $V_{\text{АМДО}}=0,7\text{--}1,1$ см/год, при использовании которого были рассчитаны массовые скорости осадконакопления $V_{\text{Г-АМДО}}=9\text{--}15$ кг/(м²·год). Распределение удельной активности ^{137}Cs в использованных для расчета кернов ДО менялось в интервале $2\text{--}11$ Бк/кг. На основе вертикального распределения удельной активности ^{137}Cs и интервала $V_{\text{Г-АМДО}}$ для района с. Есаулово были получены потоки $P_{\text{Cs-АМДО}}$ в диапазоне $11\text{--}110$ Бк/(м²·год) со средним значением $P_{\text{Cs-АМДО}}=49\pm 21$ Бк/(м²·год) (табл. 1). При сравнении полученных результатов скоростей осадконакопления и потоков $P_{\text{Cs-АМДО}}$ для ДО района вблизи с. Есаулово с результатами, полученными для кернов ДО из района г. Красноярска, особых отличий (с учётом ошибки) не наблюдается (табл. 1).

Для кернов ДО, отобранных в районе с. Шивера, рассчитанная скорость осадконакопления $V_{\text{АМДО}}$ была в интервале $0,6\text{--}1,1$ см/год, при использовании которого получены массовые скорости осадконакопления $V_{\text{Г-АМДО}}$ в интервале $9\text{--}15$ кг/(м²·год). Удельная активность ^{137}Cs в использованных для расчета кернов ДО варьировала в интервале $2\text{--}23$ Бк/кг. На основе вертикального распределения удельной активности ^{137}Cs и интервала $V_{\text{Г-АМДО}}$ для района с. Шивера были получены потоки $P_{\text{Cs-АМДО}}$ в диапазоне $31\text{--}260$ Бк/(м²·год) со средним значением $P_{\text{Cs-АМДО}}=96\pm 51$ Бк/(м²·год) (табл. 1).

Как следует из приведенных в табл. 1 данных, получены близкие результаты по средним параметрам стандартной скорости $V_{\text{АМДО}}$ и массовой ско-

рости осадконакопления $V_{\text{Г-АМДО}}$ для ДО района с. Шивера в сравнении с этими же параметрами районов ДО вблизи г. Красноярска и с. Есаулово.

Таблица 1. Результаты расчёта скоростей осадконакопления ($V_{\text{АМДО}}$, $V_{\text{Г-АМДО}}$) и вертикальных потоков ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-АМДО}}$) с помощью метода АМДО для контрольных районов р. Енисей и ближней зоны влияния ГХК

Table 1. Sedimentation rates ($V_{\text{АМДО}}$, $V_{\text{Г-АМДО}}$) and ^{137}Cs vertical fluxes ($P_{\text{Cs-АМДО}}$) calculated using the АМДО for the reference areas and the MCC-affected near zone of the Yenisei River

Параметр Parameter	$V_{\text{АМДО}}$, см/год cm/year	$V_{\text{Г-АМДО}}$, кг/(м ² ·год) kg/(m ² ·year) min-max	^{137}Cs , Бк/кг Bq/kg min-max	$P_{\text{Cs-АМДО}}$, Бк/(м ² ·год) Bq/(m ² ·year) min-max
Район Area				
«Красноярск-1»	0,8	8–12	3–15	39–54
«Красноярск-2»	0,7	9–12	2–11	38–57
«Красноярск-3»	0,7	8–10	2–9	48–74
«Krasnoyarsk-1/-2/-3»				
Среднее Average±SD	0,8±0,1	10±1	–	51±9
«Есаулово-1»	1,0	9–15	3–11	39–110
«Есаулово-2»	0,9–1,1	10–15	2–7	11–80
«Есаулово-3»	0,7	10–11	2–8	22–65
«Esaulovo-1/-2/-3»				
Среднее Average±SD	0,9±0,2	12±1	–	49±21
«Шивера-1»	1,1	12–15	2–19	31–260
«Шивера-2»	0,8	9–12	6–23	64–240
«Шивера-3»	0,6	7–9	5–23	46–180
«Shivera-1/-2/-3»				
Среднее Average±SD	0,9±0,2	11±1	–	96±51
«Балчуг-1»*				
«Balchug-1»*	0,6–1,7	7–20	40–4700	420–60000
Среднее Average±SD	1,1±0,2	14±2	–	–
«Балчуг-2»**				
«Balchug-2»**	0,5–0,7	6–9	25–8800	145–74000
Среднее Average±SD	0,6±0,1	8±1	–	–
«Балчуг-аномалия»*				
«Balchug-anomaly»*	0,8	8–10	15–26000 (70000)***	140–254000 (680000)***
Среднее Average±SD	–	9±1	–	–

* – расчет скорости осадконакопления по отношению техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$; ** – расчет скорости осадконакопления двумя методами (неравновесный $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$); *** – максимальная удельная активность ^{137}Cs и его поток осаднения ($P_{\text{Cs-АМДО}}$) в ДО с учётом коррекции распада ^{137}Cs на дату паводка 1966 г.

* – sedimentation rate calculated from the ratio of the artificial radionuclides, $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$; ** – sedimentation rate calculated using two methods (^{210}Pb dating and the $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ ratio); *** – maximal specific activity of ^{137}Cs and its deposition flux ($P_{\text{Cs-АМДО}}$) in BS taking into account the correction of ^{137}Cs decay on the date of the 1966 flood.

Однако полученные в районе с. Шивера результаты по максимальным и средним значениям вертикальных потоков ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-AMDO}}$) оказались выше по сравнению с данными по потокам ^{137}Cs для районов вблизи г. Красноярск и с. Есаулово примерно в 2–3 раза (табл. 1). Следует отметить, что с. Шивера расположено в 30-км зоне ГХК и возможно аэрозольное поступление ^{137}Cs с ГХК на пойму реки Енисей.

Ранее отмечали, что для большинства кернов ДО в зоне влияния ГХК, включая позицию Балчуг-1, использование стандартного метода $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ для расчета скорости осадконакопления невозможно из-за присутствия в ДО ^{152}Eu . И только для отдельных кернов этой зоны в позиции Балчуг-2 возможен расчет скорости осадконакопления двумя методами (на основе неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$). Для кернов ДО, отобранных в районе с. Балчуг в позиции Балчуг-2, был получен интервал скоростей осадконакопления $V_{\text{AMDO}}=0,5\text{--}0,7$ см/год (табл. 1), которые были рассчитаны методом неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$. На основе скоростей V_{AMDO} были рассчитаны массовые скорости осадконакопления $V_{\text{г-AMDO}}$ в интервале $6\text{--}9$ кг/(м²·год). Полученные интервалы параметров V_{AMDO} и $V_{\text{г-AMDO}}$ для района Балчуг в позиции Балчуг-2 пересекаются с интервалами этих параметров для контрольных районов (табл. 1). Это свидетельствует о близких гидрологических условиях отбора кернов ДО на всем протяженном исследуемом участке реки от г. Красноярск до с. Балчуг. Но при этом удельная активность ^{137}Cs в кернах ДО вблизи с. Балчуг (Балчуг-2) может варьировать в широком диапазоне от 25 до 8800 Бк/кг, что многократно превышает активность ^{137}Cs в ДО из контрольных районов ($2\text{--}23$ Бк/кг). Используя вертикальное распределение ^{137}Cs и интервал $V_{\text{г-AMDO}}$, был определен диапазон вертикальных потоков ^{137}Cs $P_{\text{Cs-AMDO}}$ равный $145\text{--}74000$ Бк/(м²·год) (табл. 1). Полученное значение максимального потока ^{137}Cs (74000 Бк/(м²·год)), как и удельная активность ^{137}Cs в ДО, на многие порядки превышает максимальный вертикальный поток ^{137}Cs для контрольных районов (260 Бк/(м²·год)). Расчет скорости осадконакопления методом отношения радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ для позиции Балчуг-2 дает интервал значений, совпадающий со скоростями, рассчитанными методом неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ (табл. 1). И поэтому для всего района с. Балчуг в ближней зоне влияния ГХК можно использовать для расчета вертикальных потоков ^{137}Cs не только скорости осадконакопления, полученные методом неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$, но и метод отношения радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$.

Для кернов ДО, отобранных в позиции Балчуг-1, был получен интервал скоростей осадконакопления $V_{\text{AMDO}}=0,6\text{--}1,7$ см/год методом отноше-

ния радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (табл. 1). На основе скоростей V_{AMDO} были рассчитаны массовые скорости осадконакопления $V_{\text{г-AMDO}}$ в интервале $7\text{--}20$ кг/(м²·год). Распределение удельной активности ^{137}Cs в использованных для расчета кернах ДО менялось в широком диапазоне $40\text{--}4700$ Бк/кг, аналогично кернам ДО позиции Балчуг-2. Используя вертикальное распределение ^{137}Cs и интервал $V_{\text{г-AMDO}}$, был определен диапазон вертикальных потоков ^{137}Cs $P_{\text{Cs-AMDO}}$ равный $420\text{--}60000$ Бк/(м²·год) (табл. 1). При сравнении между собой позиций отбора ДО Балчуг-1 и Балчуг-2 можно отметить перекрывающиеся интервалы скоростей V_{AMDO} и $V_{\text{г-AMDO}}$ (табл. 1), однако, как уже было ранее указано, при расчетах V_{AMDO} для двух этих позиций использовали разные методы расчета скоростей. Значения потоков ^{137}Cs в ДО ($P_{\text{Cs-AMDO}}$) с учетом массовых скоростей $V_{\text{г-AMDO}}$ пересекаются в своих диапазонах для двух позиций отбора, и максимальные значения потоков позиций Балчуг-1 (60000 Бк/(м²·год)) и Балчуг-2 (74000 Бк/(м²·год)) существенно не отличаются друг от друга. При сравнении скоростей осадконакопления V_{AMDO} контрольных районов отбора ДО со скоростями, полученными для ДО района с. Балчуг, существенных различий не обнаружено. Так, интервал V_{AMDO} для всех контрольных участков составил $0,6\text{--}1,1$ см/год, что пересекается с интервалом скоростей $0,5\text{--}1,7$ см/год для ДО района с. Балчуг. Средние значения V_{AMDO} для контрольных районов и участков вблизи с. Балчуг, полученные как стандартным методом $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$, так и по отношению $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, в пределах ошибки близки. Схожий результат получен и по массовой скорости $V_{\text{г-AMDO}}$. Так, для контрольных районов отбора интервал значений массовой скорости $V_{\text{г-AMDO}}=7\text{--}15$ кг/(м²·год), для ДО вблизи с. Балчуг $V_{\text{г-AMDO}}=6\text{--}20$ кг/(м²·год) (табл. 1). Однако для района отбора ДО в ближней зоне влияния ГХК (Балчуг) полученные значения максимальных потоков ^{137}Cs ($60000\text{--}74000$ Бк/(м²·год)), как и удельная активность ^{137}Cs в ДО, на многие порядки превышает максимальный вертикальный поток ^{137}Cs для контрольных районов реки (260 Бк/(м²·год)).

Следует заметить, что значения максимальных вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО могут возрасти при увеличении удельной активности ^{137}Cs в использованных для расчета кернах ДО. Ранее отмечали [6], что в ДО зоны вблизи с. Балчуг зарегистрированы слои с аномальной активностью ^{137}Cs до 26000 Бк/кг на момент отбора (2009 г). Используя параметры этого керна для расчета скоростей осадконакопления (табл. 1, значения керна ДО позиции «Балчуг-аномалия»), был получен более широкий интервал вертикальных потоков $P_{\text{Cs-AMDO}}=140\text{--}254000$ Бк/(м²·год). Для аномальных слоев максимальный поток ^{137}Cs в ДО составил

254000, что в 4 раза превышает максимальный вертикальный поток ^{137}Cs для позиций отбора Балчуг-1 и Балчуг-2, а также в 1000 раз выше значений потоков для контрольных районов. В табл. 1 дополнительно приведены новые данные расчета аномальной удельной активности ^{137}Cs в слоях керна ДО позиции «Балчуг-аномалия» с учетом доказанного образования во время экстремального паводка 1966 г. [6]. На дату пробоотбора (2009 г.) максимальная удельная активность ^{137}Cs в слоях ДО керна (Балчуг-аномалия) была 26000 Бк/кг, но при учете распада ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,2$ л.) на дату паводка (1966 г.) максимальная активность ^{137}Cs составит 70000 Бк/кг. Следовательно, максимальный поток осаждения ^{137}Cs вблизи с. Балчуг в период крупного паводка 1966 г. для аномального участка мог составить 680000 Бк/м²·год. Остальные параметры ($V_{\text{АМДО}}$ и $V_{\text{Г-АМДО}}$) для аномальных слоев кернов ДО вблизи с. Балчуг лежат в интервале значений, полученных для контрольных районов и всего района вблизи с. Балчуг (табл. 1). Для участков отбора в ближней зоне (Балчуг-1 и Балчуг-2) максимальная удельная активность ^{137}Cs для разных участков варьировала от 4700 до 8800 Бк/кг на даты отбора и при этом могла относиться к слоям ДО, датированных как 1966, так и 1988 гг. Поэтому коррекция удельной активности ^{137}Cs на даты этих двух паводков не скажется существенно на увеличении активности ^{137}Cs , по сравнению с вариантом аномального содержания ^{137}Cs только в период паводка 1966 г.

Для альтернативной оценки вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО р. Енисей в зависимости от характера накопления $^{210}\text{Pb}_{\text{пр}}$ в ДО при известной изменчивости темпа вертикального накопления пойменного аллювия нами впервые применён метод CRS. На основе вертикальных распределений $^{210}\text{Pb}_{\text{пр}}$ для каждого слоя кернов ДО рассчитаны скорости осадконакопления (V_{CRS} , см/год) и соответствующие им массовые скорости осадконакопления ($V_{\text{Г-CRS}}$, кг/(м²·год)) методом CRS. Вертикальные потоки ^{137}Cs в ДО ($P_{\text{Cs-CRS}}$, Бк/(м²·год)) были определены интегрально для каждого керна с учетом особенности модели и поведения начальной концентрации ^{210}Pb . Все параметры $V_{\text{Г-CRS}}$, $V_{\text{Г-CRS}}$ и $P_{\text{Cs-CRS}}$ для сопоставления результатов были рассчитаны по кернам ДО из контрольных районов («Красноярск», «Есаулово» и «Шивера»), которые были использованы ранее (табл. 1) для расчётов параметров по методу АМДО. В табл. 2 приведены значения скоростей осадконакопления (V_{CRS} и $V_{\text{Г-CRS}}$) и вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО $P_{\text{Cs-CRS}}$, рассчитанные методом CRS для контрольных районов р. Енисей.

Для кернов ДО, отобранных в районе г. Красноярск (использованных ранее для расчёта параметров методом АМДО), получен интервал скоростей

осадконакопления $V_{\text{CRS}}=0,5-0,9$ см/год, на основе которого был рассчитан интервал массовой скорости осадконакопления $V_{\text{Г-CRS}}=3-23$ кг/(м²·год). Имея вертикальное распределение активности ^{137}Cs в кернах ДО (в интервале 2–15 Бк/кг) и интервал $V_{\text{Г-CRS}}$, для ДО района г. Красноярск был определен диапазон потоков ^{137}Cs $P_{\text{Cs-CRS}}$ (39–85 Бк/(м²·год)) со средним значением $P_{\text{Cs-CRS}}=50\pm 18$ Бк/(м²·год) (табл. 2). Сравнение параметров расчета осадконакопления для района г. Красноярск, полученных методом CRS, с параметрами, рассчитанными на базе АМДО для этого района, показывает близость значений.

Таблица 2. Результаты расчёта скоростей осадконакопления и вертикальных потоков ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-CRS}}$) с помощью метода CRS для ДО контрольных районов р. Енисей

Table 2. Sedimentation rates and ^{137}Cs vertical fluxes ($P_{\text{Cs-CRS}}$) calculated using the CRS method for the BS of the reference areas of the Yenisei River

Параметр Parameter	V_{CRS} , см/год (cm/year)	$V_{\text{Г-CRS}}$, кг/(м ² ·год) (kg/m ² ·year)	^{137}Cs , Бк/кг (Bq/kg)	$P_{\text{Cs-CRS}}$, Бк/(м ² ·год) (Bq/(m ² ·year))
Район/Area		min-max	min-max	
«Красноярск-1»	0,5	3–6	3–15	39
«Красноярск-2»	0,6	4–23	2–11	27
«Красноярск-3»	0,9	5–19	2–9	85
«Krasnoyarsk-1/-2/-3»				
Среднее Average±SD	0,7±0,3	8±4	–	50±18
«Есаулово-1»	0,5	2–7	3–11	51
«Есаулово-2»	0,6	3–11	2–7	56
«Есаулово-3»	0,5	4–7	2–8	48
«Esaulovo-1/-2/-3»				
Среднее Average±SD	0,5±0,2	5±2	–	52±16
«Шивера-1»	0,6	2–27	2–19	90
«Шивера-2»	0,8	4–32	6–23	190
«Шивера-3»	0,9	4–37	5–23	210
«Shivera-1/-2/-3»				
Среднее Average±SD	0,8±0,4	10±8	–	170±50

Для кернов ДО, отобранных в районе с. Есаулово, рассчитаны интервалы скорости осадконакопления $V_{\text{CRS}}=0,5-0,6$ см/год и массовой скорости осадконакопления $V_{\text{Г-CRS}}=2-11$ кг/(м²·год). С учетом изменения вертикальной активности ^{137}Cs в кернах ДО (от 2 до 11 Бк/кг) и изменения скорости $V_{\text{Г-CRS}}$ для ДО района с. Есаулово был определен диапазон вертикальных потоков ^{137}Cs $P_{\text{Cs-CRS}}=48-56$ Бк/(м²·год) со средним значением $P_{\text{Cs-CRS}}=52\pm 16$ Бк/(м²·год). Полученные результаты скоростей и максимальных вертикальных потоков ^{137}Cs для района с. Есаулово, рассчитанные методом CRS (табл. 2), несколько ниже по сравнению с результатами, полученными для кернов из этого района на базе АМДО (табл. 1).

Однако среднее значение потока ^{137}Cs $P_{\text{Cs-CRS}}$ для района Есаулово совпадает со средним значением $P_{\text{Cs-CRS}}$ для района г. Красноярск (табл. 2).

Для кернов ДО, отобранных в районе с. Шивера, рассчитаны интервалы скорости осадконакопления $V_{\text{CRS}}=0,6\text{--}0,9$ см/год и массовой скорости осадконакопления $V_{\text{Г-CRS}}=2\text{--}27$ кг/(м²·год). С учетом изменений вертикальной активности ^{137}Cs в кернах ДО (от 2 до 23 Бк/кг) и скорости $V_{\text{Г-CRS}}$ для ДО района с. Шивера был определен диапазон вертикальных потоков ^{137}Cs $P_{\text{Cs-CRS}}=90\text{--}210$ Бк/(м²·год) со средним значением $P_{\text{Cs-CRS}}=170\pm 50$ Бк/(м²·год) (табл. 2). Массовая скорость осадконакопления $V_{\text{Г-CRS}}$ для ДО района с. Шивера, по сравнению со значениями этой скорости для ДО из районов вблизи г. Красноярск и с. Есаулово, имеет более высокие значения. Также наблюдается возрастание максимальных вертикальных потоков ^{137}Cs $P_{\text{Cs-CRS}}$ для района Шивера в 3–4 раза по сравнению с потоками $P_{\text{Cs-CRS}}$ в ДО из районов г. Красноярск и с. Есаулово. Сопоставление потоков ^{137}Cs , рассчитанных методом CRS и на базе АМДО ($P_{\text{Cs-CRS}}$ и $P_{\text{Cs-АМДО}}$) для района ДО с. Шивера, показало близость их интервалов и максимальных значений (табл. 1, 2). Эти данные дополнительно свидетельствуют о более высоких вертикальных потоках ^{137}Cs в ДО контрольного района с. Шивера, по сравнению с ДО других контрольных районов.

Результаты проведенного в данной работе расчета скоростей осадконакопления методами АМДО и CRS для кернов ДО из контрольных районов р. Енисей демонстрируют перекрывающиеся интервалы относительно друг друга ($V_{\text{АМДО}}=0,6\text{--}1,1$ и $V_{\text{CRS}}=0,5\text{--}0,9$ см/год). Скорость осадконакопления для района ДО в ближней зоне влияния ГХК изменяется в интервале $V_{\text{АМДО}}=0,5\text{--}1,7$ см/год, который совпадает со скоростями контрольных районов (табл. 1, 2). Совпадающие интервалы скоростей осадконакопления предполагает схожие условия образования наносов с учетом их морфологии в местах отбора ДО на протяженном участке р. Енисей. Ранее в работах [7, 10] были приведены близкие скорости осадконакопления для контрольных районов р. Енисей с использованием метода неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ (0,5–1,0 см/год) и зоны влияния ГХК по отношению техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (0,7–1,3 см/год). Для реки Плавы (бассейна реки Оки) скорости осадконакопления для низкой постоянно затопляемой поймы, рассчитанные по реперному пику ^{137}Cs (1986 г.), варьировали от 0,6 до 1,4 см/год [34]. В этой работе скорости осадконакопления для высокой поймы реки были в несколько раз меньше – 0,1–0,5 см/год. В работе [14] показано на примере реки Миссисипи, что разные методы расчета дают широкий диапазон скоростей осадконакопления: 0,2–0,5 см/год

по стандартному методу $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и 0,1–1,9 см/год по методу реперного ^{137}Cs . В большинстве исследований для расчета скорости осадконакопления используют широко распространенный метод CRS и при этом получают довольно высокие скорости осадконакопления. Так, для одной из альпийских рек максимальные скорости осадконакопления по методу CRS достигают 4,0–5,2 см/год [35], а для эстуария реки Янцзы – 4,5 см/год [36]. Скорости осадконакопления для озер и водохранилищ, как правило, более низкие – 0,01–0,3 см/год [37, 38]. В современных исследованиях метод CRS применяют при незначительных вариациях поступления ^{210}Pb и ^{214}Pb в осадки с глубиной, что в условиях речных ДО не всегда достижимо [32, 39]. Метод АМДО чаще используется для оценки массового накопления морских осадков в многовековой истории [40]. В работе [41] приведены скорости осадконакопления по методу АМДО для отдельных прибрежных участков Черного моря. В этой работе скорости варьировали в диапазоне от 0,1 до 0,4 см/год, и максимальные значения были отмечены в приустьевых районах рек и в районах бухт. Для реки Св. Лаврентий скорости осадконакопления по методу АМДО были в диапазоне от 0,2 до 1,4 см/год, который совпадал со скоростями, рассчитанными по методу реперного ^{137}Cs (0,2–1,8 см/год) [42]. Полученный в данной работе диапазон скоростей осадконакопления для протяженного участка р. Енисей с использованием разных методов расчета (0,5–1,7 см/год) в основном соответствует диапазону скоростей для рек и прибрежных участков морей, отмеченных авторами выше.

В проводимых многими авторами исследованиях недостаточно внимания уделяется массовой скорости осадконакопления. По аналогии с опубликованной вариативностью данных для стандартной скорости осадконакопления разных водоемов можно ожидать и значительный разброс значений для массовой скорости осадконакопления. Так, для донных отложений устья реки Рокан с небольшим расходом воды массовые скорости осадконакопления по методу CRS варьируют в интервале от 0,1 до 0,9 кг/(м²·год) [43]. В условиях больших расходов воды очевидны и более высокие значения массовых скоростей осадконакопления: для заливов Карачи – до 3,4 кг/(м²·год) [44], для реки Рейн – до 7,7 кг/(м²·год) [45]. Для реки Пардо (Бразилия) отмечены очень высокие массовые скорости осадконакопления: в среднем до 72 кг/(м²·год), а для отдельных участков – до 180 кг/(м²·год) [21]. В этой работе выявлена положительная корреляция между скоростью осадконакопления (см/год) и массовой скоростью осадконакопления (кг/(м²·год)). Как уже отмечали, метод АМДО чаще используется для оценки годового интегрального накопления рассе-

янного осадочного вещества в морские осадки [40]. При этом метод АМДО требует корректно определённой скорости осадконакопления и поэтому он логично рассматривается совместно с другими методами. Для ряда участков Черного моря массовые скорости осадконакопления по методу АМДО варьировали от 0,04 до 3,9 кг/(м²·год) [41] и максимальные значения регистрировали вблизи устья реки Дунай. Для реки Св. Лаврентий с довольно высокими расходами воды (до 12000 м³/с) массовые скорости по методу АМДО варьировали в диапазоне 1–9 кг/(м²·год) [42]. Расчет массовой скорости осадконакопления для реки Св. Лаврентий с использованием скорости осадконакопления, полученной по методу реперного ^{137}Cs , дает более широкий интервал – 1,2–17 кг/(м²·год) [42]. Для реки Енисей в настоящей работе получен широкий диапазон количества вещества, поступающего в осадки, – от 2 до 37 кг/(м²·год), при расчете разными методами (АМДО и CRS). Полученный нами разброс данных находится в интервале значений, полученных другими авторами для рек с высокими расходами воды. Имеющиеся отличия скоростей отражают различия в математическом подходе описания динамики формирования наносов на основе неравновесного ^{210}Pb . При этом средние значения массовых скоростей осадконакопления по методу АМДО варьируют для контрольных районов р. Енисей от 10 до 12 кг/(м²·год), а по методу CRS – от 5 до 10 кг/(м²·год) (табл. 1, 2). Полученные нами средние значения массовых скоростей осадконакопления для разных районов реки Енисей (5–12 кг/(м²·год)) близки к максимальным значениям этой скорости для реки Св. Лаврентий с высокими расходами воды – (9–17 кг/(м²·год)) [42], но существенно уступают значениям средних массовых скоростей для бразильской р. Пардо (72 кг/(м²·год)) [21].

Однако для решения наших задач, в том числе оценки масштаба радиоактивного поступления ^{137}Cs в пойму р. Енисей, необходимо перейти от максимальных скоростей осадконакопления к вертикальным потокам ^{137}Cs из воды в отложения. В табл. 1, 2 приведены результаты расчета вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО с использованием разных методов. Имеющиеся различия массовой скорости осадконакопления и удельной активности ^{137}Cs в кернах ДО обусловили вариации значений вертикальных потоков ^{137}Cs для контрольных районов отбора ДО (табл. 1, 2). На рис. 3 приведены максимальные значения вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО контрольных районов р. Енисей, рассчитанных методами CRS и АМДО. При сопоставлении максимальных значений потоков ^{137}Cs в ДО (рис. 3) для района вблизи г. Красноярска видно их соответствие ($P_{\text{Cs-CRS}}=85$ Бк/(м²·год) и $P_{\text{Cs-AMDO}}=74$ Бк/(м²·год)).

Для района вблизи с. Есаулово максимальное значение потока ^{137}Cs в ДО по методу CRS (56 Бк/(м²·год)) меньше величины потока по методу АМДО (110 Бк/(м²·год)). Однако значения максимальных потоков ^{137}Cs в ДО двух контрольных районов (Красноярск и Есаулово) близки, несмотря на разные методы расчета (рис. 3).

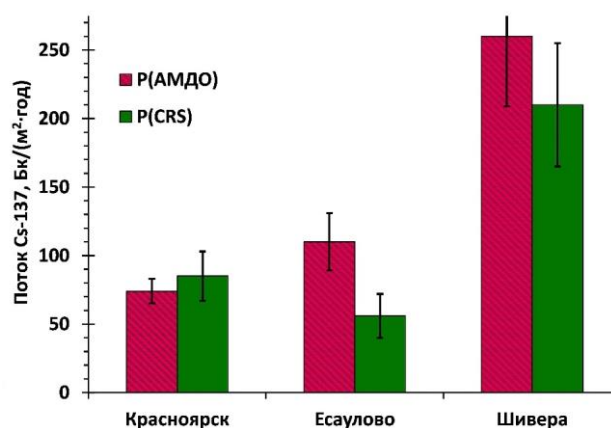


Рис. 3. Максимальные значения вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО контрольных районов р. Енисей, рассчитанные методами CRS и АМДО

Fig. 3. Maximal values of the ^{137}Cs vertical fluxes in the BS of the reference areas in the Yenisei River calculated using the CRS and the AMDO methods

Для района отбора ДО вблизи с. Шивера отмечены более высокие максимальные значения потоков ^{137}Cs , по сравнению с другими контрольными районами. Так, максимальные значения потоков ^{137}Cs в ДО с. Шивера по методу CRS (210 Бк/(м²·год)) и по методу АМДО (260 Бк/(м²·год)) в несколько раз превышают максимальные значения потоков для районов г. Красноярска и с. Есаулово (рис. 3). Относительно высокие значения потоков ^{137}Cs в ДО района Шивера в первую очередь обусловлены более высокими значениями удельной активности ^{137}Cs в слоях ДО и также некоторым превышением массовой скорости осадконакопления (метод CRS) по сравнению с другими районами (табл. 1, 2). Как отмечали ранее, с. Шивера расположено в 30-км зоне ГХК и поэтому возможно аэрозольное поступление ^{137}Cs с ГХК на пойму реки Енисей.

Анализируемые керны ДО отбирали в заводях, старицах и протоках реки Енисей. Для таких мест отбора с близкими условиями осадконакопления в межень вертикальная составляющая потока ^{137}Cs может доминировать над основной горизонтальной составляющей потока. Однако в период половодья и паводка условия меняются на противоположные.

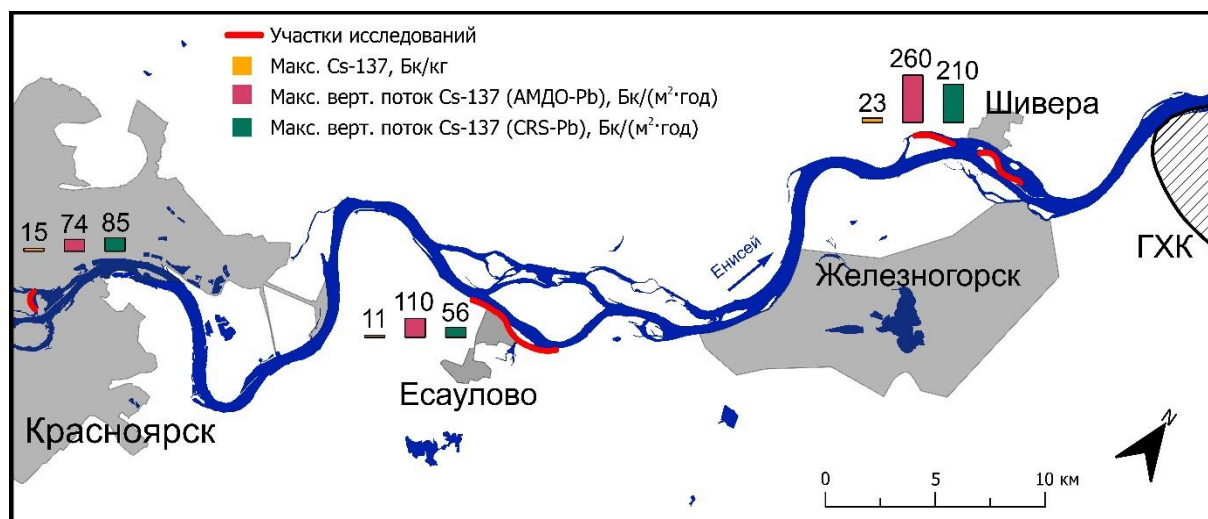


Рис. 4. Контрольные районы р. Енисей выше по течению от ГХК с выделением участков максимального вертикального потока ^{137}Cs в ДО на основе расчетов разными методами осадконакопления

Fig. 4. Reference areas of the Yenisei River upstream of the MCC with the marked sites of the maximal vertical fluxes of ^{137}Cs in the BS based on calculations of sedimentation rates performed using different methods

Можно предположить, что во время крупных паводков ДО могли испытывать повышенную нагрузку вертикального осаждения именно в отмеченных нами местах отбора, т. е. в «седиментационных ловушках». На рис. 4 приведён контрольный район р. Енисей выше по течению реки от ГХК с выделением участков максимального вертикального потока ^{137}Cs в аллювий. Рассматриваемый район р. Енисей по структуре относится к равнинным рекам. Участки исследования лежат как в местах заливающихся затонов и прирусловых отмелей р. Енисей вблизи г. Красноярска, так и в местах заводей в излучине правого берега у с. Есаулово и в небольших рукавах русла реки в районе с. Шивера.

Для всех контрольных районов в кернах ДО по глубине характерно наличие одного или нескольких нечетко выраженных максимумов удельного содержания ^{137}Cs до 23 Бк/кг. Максимальные значения потока ^{137}Cs в ДО контрольного района вблизи г. Красноярска и с. Есаулово, рассчитанные на основе методов АМДО и CRS ($P_{\text{Cs-AMDO}}$ и $P_{\text{Cs-CRS}}$), близки и с учётом ошибки не превышают уровня 110 Бк/(м²·год) (рис. 4). В работе [8] приводятся значения удельной активности ^{137}Cs = 20±5 Бк/кг и площадной активности ^{137}Cs (2000 Бк/м²) для фоновых районов выше ГХК. Проведенный пересчет этой площадной активности ^{137}Cs дает значение фонового потока P_{Cs} = 62 Бк/(м²·год), которое соответствует полученным нами данным для контрольных районов р. Енисей (рис. 4). Используя данные по площадной активности ^{137}Cs для поймы двух рек Китая (Лаолай и Яндзы) [46, 47], были получены потоки P_{Cs} в интервале от 43 до 138 Бк/(м²·год) при удельной активности ^{137}Cs до 22 Бк/кг. Эти значения также соответствуют нашим данным потоков ^{137}Cs в ДО для контрольных районов р. Енисей (рис. 4).

В районе отбора ДО возле с. Шивера вертикальные потоки ^{137}Cs в ДО ($P_{\text{Cs-CRS}}$ и $P_{\text{Cs-AMDO}}$) отличаются от потоков для других контрольных районов и достигают 260 Бк/(м²·год). Более высокие значения потоков ^{137}Cs в ДО района Шивера, как уже отмечали, обосновываются близостью ГХК и, возможно, аэрозольным поступлением ^{137}Cs с ГХК на пойму реки Енисей. Помимо отбора в зоне пойменного рукава левого берега реки, керны осадков отбирались в осередке, южнее с. Шивера, где, очевидно, преобладают ускоренные параллельно-струйные потоки воды с отличной от протоки морфологией осадков. Следовательно, более высокие значения потоков ^{137}Cs в ДО района Шивера в первую очередь обусловлены более высокими значениями удельной активности ^{137}Cs в слоях ДО, а также особой структурой русла исследуемого района с некоторым превышением массовой скорости осадконакопления (например, CRS) по сравнению с другими районами (табл. 1, 2). Очевидно, что для районов г. Красноярска и с. Есаулово вклад в загрязнение поймы реки Енисей аэрозольным ^{137}Cs из выбросов ГХК маловероятен, и поэтому для этих районов были получены низкие значения потоков ^{137}Cs в ДО только за счет глобальных выпадений. Следовательно, полученные результаты расчетов потоков ^{137}Cs в ДО объективно подтверждают для р. Енисей источник регионального техногенеза ^{137}Cs (ГХК). В бассейне реки Рейн расположены АЭС и ДО содержат не только радионуклиды в результате глобальных выпадений (ядерные испытания и Чернобыльская авария), но и выбросы АЭС [45]. Из полученных в этой работе данных можно установить, что максимальный поток ^{137}Cs в ДО достигает P_{Cs} = 2700 Бк/(м²·год). Это значение пото-

ка P_{Cs} вследствие нескольких источников поступления ^{137}Cs в ДО более чем на порядок превышает значение потока ^{137}Cs для контрольных районов р. Енисей и других рек при глобальных поступлениях ^{137}Cs .

Исследуемый нами участок р. Енисей от с. Атаманово до с. Балчуг расположен в 30-км зоне влияния ГХК. На этом участке пойма реки подвержена не только аэрозольным выпадениям радионуклидов с ГХК, но и прямым поступлениям радионуклидов с водными сбросами ГХК. Отбор кернов ДО в реке после сбросов ГХК осуществлялся в заводях прирусловой поймы, в протоках и в ежегодно подтапливаемых неизолированных старицах нижней поймы р. Енисей вдали от склонов и притоков малых рек и ручьёв. Морфологические элементы речного русла участка р. Енисей ниже по течению реки от ГХК непосредственно в зонах отбора схожи по сравнению с зонами на участке реки выше комбината до г. Красноярск. На рис. 5 представлен район р. Енисей в ближней зоне влияния ГХК с участками максимального вертикального потока ^{137}Cs в ДО на основе расчетов разными методами осадконакопления.

Структурно-вертикальные распределения ^{137}Cs в ДО для разных участков района с. Балчуг характеризуются присутствием, как правило, одного или нескольких выраженных максимумов, с удельной активностью от 4700 до 8800 Бк/кг на дату пробоотбора. Для кернов осадков, отобранных с участков «Балчуг-1» и «Балчуг-2», применялись разные методы расчёта скоростей осадконакопления потоков: на основе отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ для района «Балчуг-1»; комбинированный метод на основе стандартного $^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$ и отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ для района «Балчуг-2». Ранее отмечали, что значения потоков

^{137}Cs в ДО ($P_{\text{Cs-AMDO}}$) пересекаются в своих диапазонах для двух участков отбора и максимальные значения потоков участков Балчуг-1 (60000 Бк/(м²·год)) и Балчуг-2 (74000 Бк/(м²·год)) существенно не отличаются друг от друга (табл. 1). Полученные значения максимальных потоков ^{137}Cs (60000–74000 Бк/(м²·год)), как и удельной активности ^{137}Cs в ДО зоны влияния ГХК, на многие порядки превышают значение максимального вертикального потока ^{137}Cs для контрольных районов реки (260 Бк/(м²·год)). Значения максимальных потоков ^{137}Cs в ДО района с. Балчуг существенно выросли в аномальных участках отбора до 254000 Бк/(м²·год) (рис. 5). Для этих участков регистрировали слои ДО с удельной активностью ^{137}Cs до 26000 Бк/кг на момент пробоотбора. Максимальный поток ^{137}Cs в ДО для аномальных участков (254000 Бк/(м²·год)) почти в 1000 раз выше значений потоков ^{137}Cs для контрольных районов. На момент крупного паводка 1966 г. и образования аномального участка (Балчуг-аномалия) максимальный поток осаднения ^{137}Cs мог достигать 680000 Бк/(м²·год), что ещё больше отличается от поступления ^{137}Cs в ДО контрольных районов. Но если в одном из контрольных районов вблизи с. Шивера радионуклид ^{137}Cs поступает на пойму реки (и ДО) преимущественно из аэрозольных выпадений ГХК, то в районе с. Балчуг ^{137}Cs переносится от промзоны комбината в воде в виде взвеси до его аккумуляции в осадки. Другие параметры скоростей осадконакопления (V_{AMDO} и $V_{\text{T-AMDO}}$) для аномальных слоев кернов ДО вблизи с. Балчуг лежат в интервале значений, полученных для контрольных районов и всего района вблизи с. Балчуг (табл. 1).

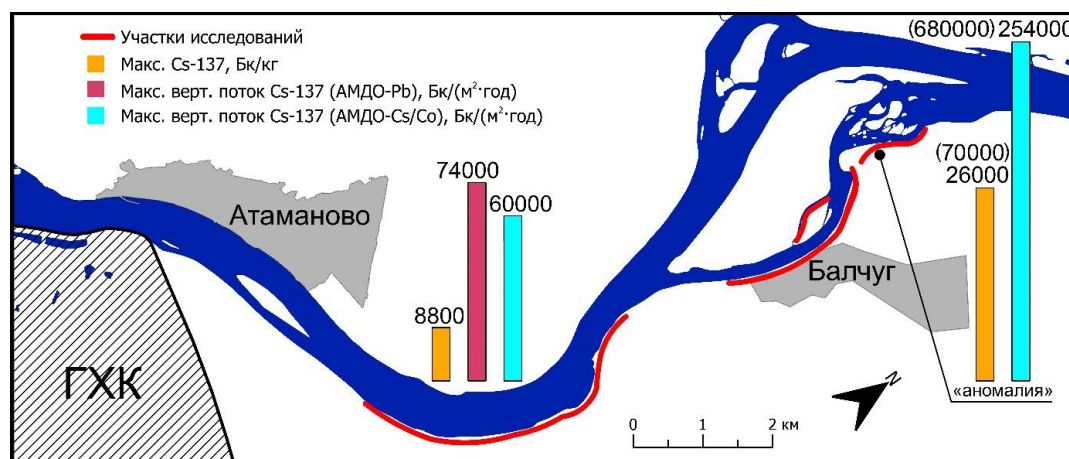


Рис. 5. Район р. Енисей в ближней зоне влияния ГХК с выделением участков-максимального вертикального потока ^{137}Cs в ДО на основе расчетов разными методами осадконакопления (в скобках представлено аномальное содержание ^{137}Cs и его потоков с коррекцией на дату паводка 1966 г.)

Fig. 5. Reference areas of the Yenisei River upstream of the MCC with the marked sites of the maximal vertical fluxes of ^{137}Cs in the BS based on calculations of sedimentation rates performed using different methods (anomalous ^{137}Cs content and vertical fluxes corrected for the 1966 flood date is shown in brackets)

В статье [8] исследовали загрязнение ^{137}Cs поймы р. Енисей в районе с. Балчуг и получили максимальное значение площадной активности ^{137}Cs , равное 663000 Бк/м^2 , для участков постоянно затопляемой поймы реки. Проведенный пересчет этой площадной активности ^{137}Cs дает значение потока $P_{\text{Cs}}=21000 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$, который в три раза меньше наших данных для района с. Балчуг (60000 и $74000 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$). Отмеченная низкая величина потока ^{137}Cs на основе данных статьи [8] может быть связана с более низкой удельной активностью ^{137}Cs в ДО в указанной статье (3600 Бк/кг), по сравнению с активностью ^{137}Cs в нашей работе (8800 Бк/кг). Ландшафтная разнородность и морфологическая индивидуальность структуры поймы реки, по мнению автора [8], также влияет на условия накопления взвесью осадков, загрязненных ^{137}Cs , в отобранных кернax. В наших исследованиях массовые скорости осадконакопления $V_{\text{Г-АМДО}}$ и $V_{\text{Г-CRS}}$ при их сравнении с разных районов выше и ниже ГХК показывают их соответствие друг другу (табл. 1, 2), что свидетельствует о близких условиях накопления речной взвеси в местах локализованной аккумуляции крупных осадков с ослабленным горизонтальным потоком воды.

Анализ вертикальных потоков ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-CRS}}$ и $P_{\text{Cs-АМДО}}$) при сравнении их с профилями ^{137}Cs в кернax ДО показал закономерную связь удельного содержания ^{137}Cs и его потока в определенном слое осадка. Максимальные удельные активности ^{137}Cs в некоторых кернax ДО, датированные ранее крупными паводками 1966 и 1988 гг. [6, 10], могут соотноситься с максимальными потоками ^{137}Cs ($P_{\text{Cs-АМДО}}$) в конкретных слоях для осадков из района с. Балчуг. Имеющиеся расхождения между слоями максимальных потоков ^{137}Cs и его максимальной удельной активностью могут быть связаны с неравномерной вертикальной аккумуляцией взвешенных частиц, что нарушает картину равномерного поступления ^{210}Pb . Все это отражается на точности определения вертикальных потоков взвешенного вещества.

Заключение

Результаты расчёта скоростей осадконакопления методами АМДО и CRS для кернов ДО из контрольных районов р. Енисей и ближней зоны влияния ГХК демонстрируют совпадение интервалов относительно друг друга в диапазоне скоростей $0,5\text{--}1,7 \text{ см/год}$. Этот факт предполагает схожие условия образования наносов с учётом их морфологии в местах отбора ДО на протяженном участке р. Енисей. Для реки Енисей впервые получены массовые скорости осадконакопления, средние значения которых по методу АМДО варьируют от 10 до $12 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{год)}$, а по методу CRS – от 5 до

$10 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{год)}$. Полученные значения массовых скоростей осадконакопления для разных районов реки Енисей близки к данным других авторов для рек с высокими расходами воды.

Расчеты вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО базируются на массовой скорости осадконакопления и удельной активности ^{137}Cs в кернax ДО, вариации которых привели к широкому диапазону значений потоков ^{137}Cs . Для двух контрольных районов отбора ДО (Красноярск и Есаулово) значения максимальных потоков ^{137}Cs в ДО близки, несмотря на разные методы расчета. Для контрольного района отбора ДО вблизи с. Шивера отмечены более высокие значения вертикальных потоков ^{137}Cs в ДО по методу CRS (до $210 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$) и по методу АМДО (до $260 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$), что превышает значения потоков для районов г. Красноярска и с. Есаулово (до $110 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$). Известно, что с. Шивера расположено в 30-км зоне ГХК и поэтому возможно аэрозольное поступление ^{137}Cs с ГХК на пойму реки Енисей. Высокие значения потоков ^{137}Cs в ДО района Шивера, по сравнению с другими контрольными районами, в первую очередь обусловлены более высокими уровнями удельной активности ^{137}Cs в слоях ДО, и также особой структурой русла исследуемого района. Очевидно, что для контрольных районов г. Красноярска и с. Есаулово вклад в загрязнение поймы реки Енисей аэрозольным ^{137}Cs из выбросов ГХК маловероятен, и поэтому для этих районов получены низкие значения потоков ^{137}Cs в ДО только за счет глобальных выпадений. Следовательно, полученные результаты расчетов объективно подтверждают для одного из контрольных районов р. Енисей (с. Шивера) источник регионального техногенеза ^{137}Cs в ДО (ГХК).

Участок поймы р. Енисей вблизи с. Балчуг и ГХК подвержен не только аэрозольным выпадениям радионуклидов с ГХК, но и прямым поступлениям радионуклидов с водными сбросами комбината. Для двух участков отбора ДО района с. Балчуг использовали разные методы расчета скорости осадконакопления, но при этом полученные значения максимальных потоков ^{137}Cs в ДО (60000 и $74000 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$) существенно не отличались друг от друга. Для отдельных участков района с. Балчуг обнаружены слои ДО с аномальной удельной активностью ^{137}Cs до 26000 Бк/кг с учетом распада на дату отбора. Максимальный поток ^{137}Cs в ДО таких аномальных участков существенно увеличился до $254000 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$, что почти в 1000 раз выше значений потоков ^{137}Cs для контрольных районов – $260 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$. Максимальная удельная активность ^{137}Cs с корректировкой на дату экстремального паводка 1966 г. возрастет до 70000 Бк/кг , и это приведет, соответственно, к увеличению максимального потока ^{137}Cs для аномального участка в

период паводка 1966 г. до $680000 \text{ Бк/м}^2\cdot\text{год}$. Значение потока ^{137}Cs в ДО района с. Балчуг на основании данных работы [8] составило $21000 \text{ Бк/(м}^2\cdot\text{год)}$, что меньше наших данных из-за более низких значений удельной активности ^{137}Cs в ДО. Возможно, разнообразность устройства рельефа и морфология структуры поймы реки также влияют на условия накопления взвесью осадков, загрязненных ^{137}Cs , в отобранных разными авторами кервах.

Полученные данные потоков ^{137}Cs в ДО р. Енисей позволят оценить радиационную нагрузку на исследуемых участках поймы и рассмотреть механизм депонирования радионуклидов с речным осадочным материалом в свете продолжающейся деятельности ГХК. Используемый в данной работе метод расчета вертикальных потоков вещества может быть применен не только для выявления уровня радиоактивного загрязнения ДО, но и другого техногенного загрязнения, например, тяжелыми металлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф.В. Сухоруков, А.Г. Дегерменджи, В.М. Белолипецкий, А.Я. Болсуновский, С.И. Ковалёв, Л.Г. Косолапова, М.С. Мельгунов, В.Ф. Рапута. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 286 с.
2. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment / T. Semizhon, S. Röllin, Y. Spasova, E. Klemm // *Journal of environmental radioactivity*. – 2010. – Vol. 101. – № 5. – P. 385–402.
3. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2023 году». Министерство экологии Красноярского края. – Красноярск, 2024. – 386 с.
4. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей / А.Я. Болсуновский, А.И. Ермаков, Б.Ф. Мясоедов, А.П. Новиков, А.И. Соболев // *Доклады Академии наук*. – 2002. – Т. 387. – № 2. – С. 233–236.
5. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River // *Chemistry and Ecology*. – 2010. – Vol. 26. – № 6. – P. 401–409.
6. Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В., Вахрушев В.И. Масштабный перенос техногенных радионуклидов по течению реки Енисей во время экстремального паводка 1966 г. // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2021. – Т. 498. – № 2. – С. 189–194.
7. Вахрушев В.И., Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В. Использование радиоизотопных методов для хронологии поступления ^{137}Cs в донные отложения реки Енисей // *Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле»*. – 2023. – Т. 33. – № 2. – С. 178–190.
8. Investigation of radionuclides in the Yenisey River floodplain systems: Relation of the topsoil radionuclide contamination to landscape features / V.G. Linnik, E.M. Korobova, J. Brown, V.V. Surkov, V.N. Potapov, A.V. Sokolov // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – Vol. 142. – P. 60–68.
9. Берчук В.Ю., Рихванов Л.П., Готье-Ляфай Ф. Уровни накопления и характер распределения лантаноидов и трансурановых элементов в вертикальном разрезе пойменных почв протоки Чернильщикова р. Томи // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 170–178.
10. Bolsunovsky A., Vakhrushev V., Dementyev D. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2024. – Vol. 7. – № 4. – P. 274–279.
11. Cigagna C., Bonotto D.M., Camargo A.F.M. Sedimentation rates by the ^{210}Pb chronological method in Itanhaém river watershed, southeast Brazil // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2021. – Vol. 193. – P. 1–19.
12. Use of ^{210}Pb dating models for estimating sedimentation rate of a typical sediment core taken in the Ba Lat coastal area (Red River) / D.D. Bui, D.T. Duong, V.T. Duong, T.B. Vuong, T.T.H. Nguyen, T.H. Doan, T.O. Nguyen, D.C. Le, H.G. Nguyen, H.T. Nguyen // *Nuclear Science and Technology*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 32–40.
13. Temporal trends of sediment accumulation in the Xuan Thuy Natural Wetland Reserve (Ba Lat coastal area of the Red River, Vietnam) and implications for future coastal wetland development / B. Dung, D. Thang, D. Hau, N. Trang, L. Cuong, N. Khanh, D. Thang, P. Nam, V. Bac, N. Ha // *Wetlands Ecology and Management*. – 2023. – Vol. 31. – № 3. – P. 419–433.
14. Sedimentary processes and instability on the Mississippi River Delta Front near the Shipwreck of the SS Virginia / N. Figueredo, S.J. Bentley, J.D. Chaytor, K. Xu, N. Jafari, I.Y. Georgiou, M. Damour, J. Duxbury, J. Obelcz, J. Maloney // *Water*. – 2024. – Vol. 16. – № 3. – P. 421.
15. Global acceleration of lake sediment accumulation rates associated with recent human population growth and land-use changes / A. Baud, J.P. Jenny, P. Francus, I. // *Gregory-Eaves Journal of Paleolimnology*. – 2021. – Vol. 66. – № 4. – P. 453–467.
16. Abril-Hernández J.-M. ^{210}Pb -based dating of recent sediments with the χ -mapping version of the Constant Sediment Accumulation Rate (CSAR) model // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2023. – Vol. 268. – P. 107247.
17. Anthropogenic and climatic impacts on historic sediment, carbon, and phosphorus accumulation rates using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs in a sub-watershed linked to Zarivar Lake, Iran / M. Khodadadi, M. Gibbs, A. Swales, A. Toloza, W.H. Blake // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Vol. 196. – № 10. – P. 887.
18. Organic matter, eutrophication, and increased mass accumulation rates in the Anthropocene are the main drivers of mercury concentrations and historical enrichment in Canadian lake sediments / M. Beaulieu, M. Amyot, K. Griffiths, A. Dastoor, A. Jeziorski, I. Gregory-Eaves // *Limnology and Oceanography*. – 2024. – Vol. 69. – № 2. – P. 434–448.
19. Temporal scales of mass wasting sedimentation across the Mississippi River Delta Front delineated by $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ Geochronology / J. Duxbury, S.J. Bentley, K. Xu, N.H. Jafari // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – № 9. – P. 1644.
20. Composition of deposited sediment and its temporal variation in a disturbed tropical catchment in the Kelantan river basin, Peninsular Malaysia / D. Sugumaran, W.H. Blake, G.E. Millward, Z. Yusop, Y.A.R. Mohd, N.A. Mohamad, A. Nainar, K.V. Annammala // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 30. – № 28. – P. 71881–71896.

21. Bonotto D.M. Geochemical indices and sedimentation rates in the Pardo River basin, São Paulo State, Brazil // *International Journal of Sediment Research*. – 2024. – Vol. 39. – № 5. – P. 804–824.
22. Natural and anthropogenically driven change of organic carbon burial rate in two alpine lakes from the southeastern margin of the Tibetan Plateau / Y. Zhang, W. Yang, L. Peng, H. Fu, M. Chen // *Catena*. – 2024. – Vol. 247. – P. 108490.
23. Геохронологическая реконструкция седиментационных потоков техногенного плутония на основе радиоизотопного определения скорости седиментации взвешенного вещества в осадки на полувекровом масштабе / Н.Н. Терещенко, С.Б. Гулин, В.Ю. Проскурнин, А.А. Параскив // *Система Черного моря*. – М.: Научный мир, 2018. – С. 641–658.
24. Challenges in measuring fine sediment ingress in gravel-bed rivers using retrievable sediment trap samplers / R. Maltauro, M. Stone, A.L. Collins, B.G. Krishnappan // *River Research and Applications*. – 2024. – Vol. 40. – № 3. – P. 341–352.
25. Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. – 242 с.
26. Кременчуцкий Д.А., Гуров К.И. Распределение Cs и K в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. – 2021. – Т. 37. – № 2 (218). – С. 207–221.
27. A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ / A. Foucher, P.A. Chaboché, P. Sabatier, O. Evrard // *Earth System Science Data Discussions*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–61.
28. 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.
29. Современные седиментационные процессы в Выгозерском водохранилище / Н.А. Белкина, Е.В. Гатальская, Г.Э. Здоровеннова, М.С. Потахин, Р.Э. Здоровеннов, И.В. Морозова // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. – 2024. – Т. 10. – № 1. – С. 139–156.
30. A sedimentary evolution record and its response to anthropogenic-driven pressure in the shallow Honghu Lake over a century / M. Zhang, H. Wang, Y. Wang, J. Wu // *All Earth*. – 2024. – Vol. 36. – № 1. – P. 1–12.
31. Increased black carbon (soot) accumulation during the Anthropocene in a less-developed region of Xinjiang, northwestern China / D. Lei, Y. Han, C. Zhan, C. Wei, Y. Tang, M. Guo, J. Zhang, J. Li // *Anthropocene*. – 2024. – Vol. 45. – P. 100425.
32. Mayo M.P. Comparison and improvement of sediment chronology models using ^{210}Pb and other natural and artificial radioisotopes: Dr. Diss. – Bremen, 2021. – 305 p.
33. Изменение седиментационных потоков плутония в донные отложения бухты Севастопольская в период до и после аварии на ЧАЭС / А.А. Параскив, Н.Н. Терещенко, В.Ю. Проскурнин, О.Д. Чужикова-Проскурнина // *Морской биологический журнал*. – 2021. – Т. 6. – № 2. – С. 69–81.
34. Using Chernobyl-derived ^{137}Cs to document recent sediment deposition rates on the River Plava floodplain (Central European Russia) / V.R. Belyaev, V.N. Golosov, M.V. Markelov, O. Evrard, N.N. Ivanova, T.A. Paramonova, E.N. Shamshurina // *Hydrological processes*. – 2013. – Vol. 27. – P. 807–821.
35. Core-derived historical records of suspended sediment origin in a mesoscale mountainous catchment: the River Bléone, French Alps / O. Navratil, O. Evrard, M. Esteves, S. Ayrault, I. Lefevre, C. Legout, J.-L. Reyss, N. Gratiot, J. Nemery, N. Mathys, A. Poirel, P. Bonte // *Journal of Soils and Sediments*. – 2012. – Vol. 12. – P. 1463–1478.
36. Reconstruction of the historical deposition environment from ^{210}Pb and ^{137}Cs records at two tidal flats in China / Z. Liu, S. Pan, Y. Yin, R. Ma, J. Gao, F. Xia, X. Yang // *Ecological engineering*. – 2013. – Vol. 61. – P. 303–315.
37. Method of ^{210}Pb geochronological to estimate sedimentation rate in water reservoir in the Brazilian semiarid region / C.W.S. Ferreira, M.D.S.B. Araújo, J.A. dos Santos Júnior, V.L.B. de Souza // *Journal of Environmental Analysis and Progress*. – 2023. – Vol. 8. – № 2. – P. 099–109.
38. Пространственно-временное распределение элементов в донных отложениях Онежского озера и малых озер, расположенных на водосборной площади Онежского ледникового озера / В.Д. Страховенко, Н.А. Белкина, Н.А. Ефременко, М.С. Потахин, Д.А. Субетто, В.И. Малов, Е.А. Овдина // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. – 2023. – Т. 68. – № 4. – С. 676–695.
39. Abril-Hernández J.-M. ^{210}Pb -dating of sediments with models assuming a constant flux: CFCS, CRS, PLUM, and the novel χ -mapping. Review, performance tests, and guidelines // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2023. – Vol. 268. – P. 107248.
40. Седиментогенез в Белом море: вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и абсолютные массы донных осадков / А.Н. Новигатский, А.П. Лисицын, В.П. Шевченко, А.А. Ключиткин, М.Д. Кравчишина, Н.В. Политова // *Океанология*. – 2020. – Т. 60. – № 3. – С. 429–441.
41. Терещенко Н.Н., Пархоменко А.В. Особенности формирования скоростей осадконакопления и абсолютных масс донных осадков в западной части Черного моря // *Океанология*. – 2021. – Т. 61. – № 4. – С. 572–584.
42. Carignan R., Lorrain S. Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St. Lawrence River: accumulation rates and characterization of the mixed sediment layer // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 2000. – Vol. 57. – № S1. – P. 63–77.
43. Rifardi M.G. Sedimentation rate and sediment accumulation at the estuary of Rokan River, Indonesia // *ASM Science Journal*. – 2020. – Vol. 13. – P. 1–10.
44. Sediment accumulation rates in Karachi coastal area Pakistan using ^{210}Pb dating method / M.Z. Chaudhary, K. Khan, N. Ahmad, A. Mashiatullah, T. Javed, N. Yaqoob, Um-e-Robab, M.S. Khan, J. Abid // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2021. – Vol. 327. – P. 13–20.
45. Radionuclides in sediments of the Aare and Rhine river system: Fallouts, discharges, depth-age relations, mass accumulation rates and transport along the river / E. Klemm, V. Putyrskaya, S. Röhlén, J.A. Corcho-Alvarado, H. Sahli // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2021. – Vol. 232. – P. 106584.
46. Application of ^{137}Cs tracer technique in floodplain deposition research in mesoscale river basins / B. Liu, Z. Wang, X. Zhang, G. Xie, B. Yin, G. Liu, T. Zhang // *Geoderma*. – 2023. – Vol. 439. – P. 116706.
47. The ^{137}Cs distribution in sediment profiles from the Yangtze River estuary: a comparison of modeling and experimental results / S. Pan, Y. Xu, A. Wang, P. Povinec // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2012. – Vol. 292. – № 3. – P. 1207–1214.

Информация об авторах

Вадим Игоревич Вахрушев, аспирант кафедры биофизики Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, Свободный пр., 79; младший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии Института биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 50; vavadbka@yandex.ru

Александр Яковлевич Болсуновский, доктор биологических наук, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиоэкологии Института биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 50; radecol@ibp.ru

Поступила в редакцию: 25.03.2025

Поступила после рецензирования: 28.05.2025

Принята к публикации: 30.06.2025

REFERENCES

1. Sukhorukov F.V., Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M., Bolsunovsky A.Y., Kovalev S.I., Kosolapova L.G., Melgunov M.S., Raputa V.F. *Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River Valley*. Novosibirsk, Publ. House of SB RAS «Geo», 2004. 286 p. (In Russ.)
2. Semizhon T., Röllin S., Spasova Y., Klemm E. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment. *Journal of environmental radioactivity*, 2010, vol. 101, no. 5, pp. 385–402.
3. *State report "On the state and protection of the environment in Krasnoyarsk Krai in 2023"*. Krasnoyarsk, Ministry of Ecology of Krasnoyarsk Krai, 2024. 386 p. (In Russ.)
4. Bolsunovsky A.Ya., Ermakov A.I., Myasoedov B.F., Novikov A.P., Sobolev A.I. New data on the content of transuranic elements in bottom sediments of the Yenisei River. *Doklady Earth Sciences*, 2002, vol. 387, no. 8, pp. 971–974.
5. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River. *Chemistry and Ecology*, 2010, vol. 26, no. 6, pp. 401–409.
6. Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 498, no. 2, pp. 514–518. (In Russ.)
7. Vakhrushev V.I., Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V. Using radioisotope methods to date ^{137}Cs inflow to bottom sediments of the Yenisei river. *Bulletin of Udmurt University Series Biology Earth Sciences*, 2023, vol. 33, no. 2, pp. 178–190. (In Russ.)
8. Linnik V.G., Korobova E.M., Brown J., Surkov V.V., Potapov V.N., Sokolov A.V. Investigation of radionuclides in the Yenisey River floodplain systems: relation of the topsoil radionuclide contamination to landscape features. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 142, pp. 60–68.
9. Berchuk V.Yu., Rikhyanov L.P., Gauthier-Lyafay F. Levels of accumulation and distribution patterns of lanthanides and transuranium elements in a vertical section of floodplain soils of the Chernilshchikovo channel of the Tom River. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 170–178. (In Russ.)
10. Bolsunovsky A., Vakhrushev V., Dementyev D. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River. *Limnology and Freshwater Biology*, 2024, vol. 7, no. 4, pp. 274–279.
11. Cigagna C., Bonotto D.M., Camargo A.F.M. Sedimentation rates by the ^{210}Pb chronological method in Itanhaém river watershed, southeast Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, vol. 193, pp. 1–19.
12. Bui D.D., Duong D.T., Duong V.T., Vuong T.B., Nguyen T.T.H., Doan T.H., Nguyen T.O., Le D.C., Nguyen H.G., Nguyen H.T. Use of ^{210}Pb dating models for estimating sedimentation rate of a typical sediment core taken in the Ba Lat coastal area (Red River). *Nuclear Science and Technology*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 32–40.
13. Dung B., Thang D., Hau D., Trang N., Cuong L., Khanh N., Thang D., Nam P., Bac V., Ha N. Temporal trends of sediment accumulation in the Xuan Thuy Natural Wetland Reserve (Ba Lat coastal area of the Red River, Vietnam) and implications for future coastal wetland development. *Wetlands Ecology and Management*, 2023, vol. 31, no. 3, pp. 419–433.
14. Figueredo N., Bentley S.J., Chaytor J.D., Xu K., Jafari N., Georgiou I.Y., Damour M., Duxbury J., Obelcz J., Maloney J. Sedimentary processes and instability on the Mississippi River Delta Front near the Shipwreck of the SS Virginia. *Water*, 2024, vol. 16, no. 3, 421 p.
15. Baud A., Jenny J.P., Francus P., Gregory-Eaves I. Global acceleration of lake sediment accumulation rates associated with recent human population growth and land-use changes. *Journal of Paleolimnology*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 453–467.
16. Abril-Hernández J.M. ^{210}Pb -based dating of recent sediments with the χ -mapping version of the Constant Sediment Accumulation Rate (CSAR) model. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2023, vol. 268, Paper no. 107247.
17. Khodadadi M., Gibbs M., Swales A., Toloza A., Blake W.H. Anthropogenic and climatic impacts on historic sediment, carbon, and phosphorus accumulation rates using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs in a sub-watershed linked to Zarivar Lake, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, vol. 196, no. 10, 887 p.
18. Beaulieu M., Amyot M., Griffiths K., Dastoor A., Jezierski A., Gregory-Eaves I. Organic matter, eutrophication, and increased mass accumulation rates in the Anthropocene are the main drivers of mercury concentrations and historical enrichment in Canadian lake sediments. *Limnology and Oceanography*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 434–448.
19. Duxbury J., Bentley S.J., Xu K., Jafari N.H. Temporal scales of mass wasting sedimentation across the Mississippi River Delta Front delineated by $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ Geochronology. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 9, 1644 p.
20. Sugumaran D., Blake W.H., Millward G.E., Yusop Z., Mohd Y.A.R., Mohamad N.A., Nainar A., Annammala K.V. Composition of deposited sediment and its temporal variation in a disturbed tropical catchment in the Kelantan river basin, Peninsular Malaysia. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, no. 28, pp. 71881–71896.
21. Bonotto D.M. Geochemical indices and sedimentation rates in the Pardo River basin, São Paulo State, Brazil. *International Journal of Sediment Research*, 2024, vol. 39, no. 5, pp. 804–824.

22. Zhang Y., Yang W., Peng L., Fu H., Chen M. Natural and anthropogenically driven change of organic carbon burial rate in two alpine lakes from the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Catena*, 2024, vol. 247, Paper no. 108490.
23. Tereshchenko N.N., Gulin S.B., Proskurnin V.Yu., Paraskiv A.A. Geochronological reconstruction of sedimentary flows of technogenic plutonium based on radioisotope determination of the rate of sedimentation of suspended matter in sediments on a half-century scale. *The Black Sea System*. Moscow, NauchnyMir Publ., 2018. pp. 641–658. (In Russ.)
24. Maltauro R., Stone M., Collins A.L., Krishnappan B.G. Challenges in measuring fine sediment ingress in gravel-bed rivers using retrievable sediment trap samplers. *River Research and Applications*, 2024, vol. 40, no. 3, pp. 341–352.
25. Dauvalter V.A. *Geoecology of bottom sediments of lakes*. Murmansk, Murmansk State Technical University Publ. House, 2012. 242 p. (In Russ.)
26. Kremenchutsky D.A., Gurov K.I. Distribution of Cs and K in bottom sediments of Balaklava Bay (Black Sea). *Marine Hydrophysical Journal*, 2021, vol. 37, no. 2 (218), pp. 207–221. (In Russ.)
27. Foucher A., Chaboche P.A., Sabatier P., Evrard O. A worldwide meta-analysis (1977–2020) of sediment core dating using fallout radionuclides including ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$. *Earth System Science Data Discussions*, 2021, vol. 2021, pp. 1–61.
28. Rusakov V.Y., Borisov A.P., Solovieva G.Y. Sedimentation rates in different facies–genetic types of bottom sediments in the Kara Sea: evidence from the ^{210}Pb and ^{137}Cs radionuclides. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, pp. 1185–1200. (In Russ.)
29. Belkina N.A., Gatalskaya E.V., Zdorovennova G.E., Potakhin M.S., Zdorovennov R.E., Morozova I.V. Modern sedimentation processes in the Vygozerskoye Reservoir. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 139–156. (In Russ.)
30. Zhang M., Wang H., Wang Y., Wu J. A sedimentary evolution record and its response to anthropogenic-driven pressure in the shallow Honghu Lake over a century. *All Earth*, 2024, vol. 36, no. 1, pp. 1–12.
31. Lei D., Han Y., Zhan C., Wei C., Tang Y., Guo M., Zhang J., Li J. Increased black carbon (soot) accumulation during the Anthropocene in a less-developed region of Xinjiang, northwestern China. *Anthropocene*, 2024, vol. 45, Paper no. 100425.
32. Mayo M.P. *Comparison and improvement of sediment chronology models using ^{210}Pb and other natural and artificial radioisotopes*. Dr. Diss. Bremen, 2021. 305 p.
33. Paraskiv A.A., Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Change in plutonium sedimentation fluxes into the bottom sediments of the Sevastopol bay before and after the Chernobyl NPP accident. *Marine Biological Journal*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 69–81. (In Russ.)
34. Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., O Evrard., Ivanova N.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N. Using Chernobyl-derived ^{137}Cs to document recent sediment deposition rates on the River Plava floodplain (Central European Russia). *Hydrological processes*, 2013, vol. 27, pp. 807–821.
35. Navratil O., Evrard O., Esteves M., Ayrault S., Lefevre I., Legout C., Reyss J.-L., Gratiot N., Nemery J., Mathys N., Poirer A., Bonte P. Core-derived historical records of suspended sediment origin in a mesoscale mountainous catchment: the River Bléone, French Alps. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, vol. 12, pp. 1463–1478.
36. Liu Z., Pan S., Yin Y., Ma R., Gao J., Xia F., Yang X. Reconstruction of the historical deposition environment from ^{210}Pb and ^{137}Cs records at two tidal flats in China. *Ecological engineering*, 2013, vol. 61, pp. 303–315.
37. Ferreira C.W.S., Araújo M.D.S. B., Dos Santos Júnior J.A., De Souza V.L.B. Method of ^{210}Pb geochronological to estimate sedimentation rate in water reservoir in the Brazilian semiarid region. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 099–109.
38. Strakhovenko V.D. The spatio-temporal distribution of elements in the bottom sediments of Lake Onego and small lakes located on the catchment area of Onego Ice Lake. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 676–695. (In Russ.)
39. Abril-Hernández J.M. ^{210}Pb -dating of sediments with models assuming a constant flux: CFCS, CRS, PLUM, and the novel χ -mapping. Review, performance tests, and guidelines. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2023, vol. 268, Paper no. 107248.
40. Novigatsky A.N., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. Sedimentogenesis in the White Sea: vertical flows of dispersed sedimentary matter and absolute masses of bottom sediments. *Oceanology*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 429–441. (In Russ.)
41. Tereshchenko N.N., Parkhomenko A.V. Features of formation of the sedimentation and mass accumulation rate in Western Black Sea bottom sediments. *Oceanology*, 2021, vol. 61, pp. 499–510. (In Russ.)
42. Carignan R., Lorrain S. Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St. Lawrence River: accumulation rates and characterization of the mixed sediment layer. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, vol. 57, no. S1, pp. 63–77.
43. Rifardi M.G. Sedimentation rate and sediment accumulation at the estuary of Rokan River, Indonesia. *ASM Science Journal*, 2020, vol. 13, pp. 1–10.
44. Chaudhary M.Z., Khan K., Ahmad N., Mashiatullah A., Javed T., Yaqoob N., Um-e-Robab, Khan M.S., Abid J. Sediment accumulation rates in Karachi coastal area Pakistan using ^{210}Pb dating method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 327, pp. 13–20.
45. Klemm E., Putyrskaya V., Röhlén S., Corcho-Alvarado J.A., Sahli H. Radionuclides in sediments of the Aare and Rhine river system: fallouts, discharges, depth-age relations, mass accumulation rates and transport along the river. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 232, Paper no. 106584.
46. Liu B., Wang Z., Zhang X., Xie G., Yin B., Liu G., Zhang T. Application of ^{137}Cs tracer technique in floodplain deposition research in mesoscale river basins. *Geoderma*, 2023, vol. 439, Paper no. 116706.
47. Pan S., Xu Y., Wang A., Povinec P. The ^{137}Cs distribution in sediment profiles from the Yangtze River estuary: a comparison of modeling and experimental results. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012, vol. 292, no. 3, pp. 1207–1214.

Information about the authors

Vadim I. Vakhrushev, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; Junior Researcher, Institute of Biophysics SB RAS, 50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; vavadbka@yandex.ru

Alexander Ya. Bolsunovsky, Dr. Sc., Cand. Sc., Head of the Radioecology Laboratory, Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; radecol@ibp.ru

Received: 25.03.2025

Revised: 28.05.2025

Accepted: 30.06.2025