

УДК 550.42:556.523(282.256.3)(045)

*В.И. Вахрушев, А.Я. Болсуновский, Д.В. Дементьев***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ХРОНОЛОГИИ ПОСТУПЛЕНИЯ ^{137}Cs В ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ РЕКИ ЕНИСЕЙ¹**

Многолетнее исследование проб донных отложений (ДО) реки Енисей выявило наличие уникального ряда техногенных радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu), позволяющего комбинированно использовать разные методы расчета скоростей осадконакопления для их ретроспективной оценки. Проведены исследования по определению скоростей осадконакопления методами природного неравновесного ^{210}Pb , по отношениям техногенных изотопов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ и маркерного ^{60}Co на нескольких участках реки Енисей – ниже по течению радиоактивных сбросов Горно-химического комбината (ГХК) Росатома вблизи сел Б. Балчуг и Атаманово, а также выше сбросов ГХК в фоновых районах вблизи сел Есаулово и Шивера. Оценка скоростей осадконакопления методами неравновесного ^{210}Pb , изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ и маркерного ^{60}Co для фоновых районов и района вблизи сел, расположенных ниже от ГХК, показала, что их значения лежат в интервале 0,5–1,3 см/год. Построена хронология поступления ^{137}Cs в ДО с использованием разных радиоизотопных методов, продемонстрировавшая, что максимальное поступление ^{137}Cs в ДО в фоновых районах с. Есаулово, Шивера и на участках с. Балчуг было отмечено во время экстремального паводка 1966 года. Также обнаружены максимумы ^{137}Cs в слоях ДО реки, датировка которых совпала с паводками 1988 и 1995–1997 годов.

Ключевые слова: донные отложения, река Енисей, скорость осадконакопления, неравновесный ^{210}Pb , изотопное отношение техногенных радионуклидов, хронология.

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-2-178-190

Важной экологической проблемой с середины 20 века остается масштабное загрязнение поймы реки Енисей различными поллютантами. Наряду с химическими веществами в реку поступают техногенные радионуклиды, подвергая пойму реки радиоактивному загрязнению. Попав в водный поток, радионуклиды фиксируются на взвешенных частицах и оседают в зонах разгрузки, образуя донные отложения (ДО). В результате работы ядерных реакторов и радиохимического завода Горно-химического комбината (ГХК) «Росатома» (г. Железногорск), расположенного ниже по течению реки от г. Красноярск, в ДО р. Енисей регистрируются разнообразные техногенные радионуклиды, в том числе трансурановые [1–7]. Помимо радиоактивных сбросов ГХК в р. Енисей поступают в незначительных количествах радионуклиды от глобальных выпадений. Наряду с радиоактивным загрязнением территорий от глобальных выпадений ^{137}Cs в результате атмосферных ядерных испытаний с начала 1950-х гг. и до 1963 г., также сопоставимый вклад в загрязнение ^{137}Cs внесла Чернобыльская авария 1986 года [8]. Согласно работе [9], удельная активность ^{137}Cs в почвах тундры района Якутии из-за аэрозольных «чернобыльских» выпадений варьирует в интервале от 2 до 100 Бк/кг. При этом минимальное количество ^{137}Cs (0,5–3,0 Бк/кг) фиксируется в надпойменной почве, постоянно омываемой речными водами и выносящими из нее ^{137}Cs в период паводков [9]. Радиоцезий является одним из основных депонирующих радионуклидов при переносе атмосферных осадков в результате торфяных и лесных пожаров [10]. Этот радионуклид может представлять потенциальную опасность во время паводков, при которых происходит горизонтальная миграция ^{137}Cs в форме почвенных частиц с поверхностными водами [11].

Ежегодный мониторинг содержания радионуклидов в слоях ДО р. Енисей показал, что вертикальные профили радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu имеют неоднородный характер, обусловленный как гидрологическим режимом реки, зависящим от работы Красноярской ГЭС, так и гидродинамическими условиями, связанными с неравномерностью течения и, как следствие, с динамически меняющейся скоростью осадконакопления. Указанные факторы влияют на скорости поступления и формирование профилей распределения перечисленных радионуклидов в ДО. В предыдущей работе [4; 12] было показано, что одним из факторов, оказавших влияние на возникновение максимумов ^{137}Cs , зарегистрированных на разных глубинах в ДО р. Енисей, является экстремальный паводок 1966

¹ Работа выполнена частично за счет средств гранта Российского научного фонда №22-27-20001, Красноярского краевого научного фонда.

года. Стоит отметить, что паводок 1966 года привел к частичному затоплению береговой промышленной зоны ГХК, смыву с ее территории взвешенных частиц с радионуклидами и перенос взвеси на большие расстояния, вплоть до Енисейского залива Карского моря [1; 2; 4; 7; 13]. В результате паводка 1966 года и переноса взвешенных радиоактивных частиц в островных системах поймы ниже по течению реки от ГХК были сформированы слои аллювиальных почв с аномальным содержанием ^{137}Cs [4; 12]. Перенос техногенных радионуклидов происходил и во время других крупных паводков 1988, 2006 и 2021 годов, однако слои ДО с наибольшим максимумом ^{137}Cs (до 26000 Бк/кг) были датированы именно периодом экстремального паводка 1966 года [12]. О подвижности радионуклидов в ДО и возможности их переноса со взвешенными частицами ранее сообщалось в работах [5; 14–16], в которых рассматривается как мониторинг техногенных радионуклидов в р. Енисей, так и вопросы моделирования миграции радионуклидов в реках.

Для корректного ретроспективного анализа обнаруженных слоев ДО с максимумами ^{137}Cs необходимо рассчитать скорости осадконакопления. Для непростых гидродинамических и гидрологических условий реки требуется использовать верифицирующие друг друга методы расчета скоростей осадконакопления для достоверности хронологии поступления ^{137}Cs в речные ДО. Ранее были опубликованы расчеты скоростей осадконакопления с использованием метода неравновесного ^{210}Pb и изотопных отношений техногенных радионуклидов [6; 17], однако эти данные были фрагментарны и рассмотрены только единичные случаи хронологии поступления ^{137}Cs в ДО р. Енисей. Также эти расчеты скоростей осадконакопления были проведены более 10 лет назад.

Целью настоящей работы является комплексное использование методов датировки по природному ^{210}Pb , по изотопным отношениям техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$, а также маркерному ^{60}Co для построения хронологии поступления ^{137}Cs в ДО р. Енисей.

Объект и методы исследований

Пробы донных отложений были отобраны на участке р. Енисей протяженностью 50 км вниз по течению реки от с. Есаулово до с. Б. Балчуг (рис. 1) в период с 2016 по 2022 гг. Для сравнения использовали пробы ДО, отобранные ранее до 2016 года. Данный участок включает в себя ближнюю зону отбора проб, ниже по течению реки от ГХК, в районе сел Атаманово и Большой Балчуг (далее Балчуг), а также выше по течению реки от ГХК вблизи с. Есаулово и с. Шивера вне зоны влияния радиоактивных сбросов (рис. 1, табл. 1).



Рис. 1. Карта-схема районов отбора проб донных отложений р. Енисей

Отбор проб донных отложений (ДО) проводили в ежегодно-затапливаемых заводах поймы р. Енисей и в излучинах вблизи берега. Для отбора проб кернов использовали стальной цилиндрический пробоотборник (длиной до 1 м и диаметром 11 см) с лепестковым затвором. После отбора кернов ДО происходило их деление на слои (в среднем по 3 см). В лаборатории происходило высушивание проб до постоянной массы при температуре 65 °С, после чего их гомогенизировали. Удельную

активность радионуклидов в ДО измеряли на гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором (Canberra, США). Спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США). Удельная активность радионуклидов (Бк/кг) рассчитывалась на сухую массу.

Таблица 1

Районы отбора проб кернов донных отложений

Населённый пункт	Расстояние от г.Красноярска, км*	Координаты мест отбора	Период отбора
с. Есаулово (фоновый)	45	N 56°08'43" E 93°16'51"	2002–2019
с. Шивера (фоновый)	72	N 56°18'43" E 93°30'30"	2011–2022
с. Атаманово	88	N 56°23'47" E 93°39'03"	2019
с. Б. Балчуг	98	N 56°27'59" E 93°41'55"	2016–2022

Примечание: * – расстояние приведено по логии судоходных путей

В качестве примера на рис. 2 приведены вертикальные распределения техногенных радионуклидов по слоям ДО, характерные для фонового района (распределение ^{137}Cs на рис. 2А), и для районов после сбросов ГХК (распределения ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{152}Eu на рис. 2Б). Из распределения по глубине видно (рис. 2А), что в фоновом районе отбора проб ДО регистрируется только один техногенный ^{137}Cs , тогда как в районе ниже по течению от ГХК регистрируется несколько техногенных радионуклидов (рис. 2Б). Распределению радионуклидов в ДО вблизи сбросов ГХК и ниже от ГХК по течению реки свойственно наличие двух максимумов радионуклидов (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu) в верхней и нижней частях керна (рис. 2А, Б). Эти максимумы могут указывать на масштабное поступление радионуклидов в результате паводковых событий или интенсивных сбросов ГХК. Для установления времени события необходимо определить один из таких гидродинамических параметров, как скорость осадконакопления.

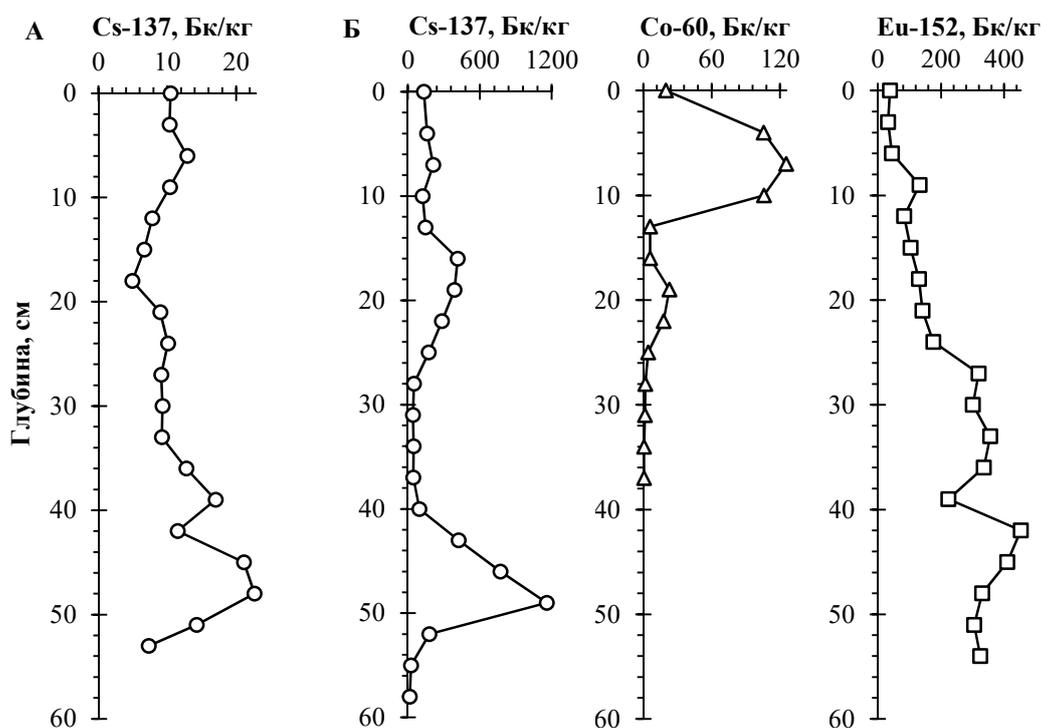


Рис. 2. Примеры вертикальных распределений радионуклидов в ДО р. Енисей, отобранных в фоновом районе (А) и в районах ниже по течению от сбросов ГХК (Б)

Для определения скоростей осадконакопления (V) и построения хронологии поступления радионуклидов в ДО нами используются результаты анализа вертикальных распределений ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu и природного ^{210}Pb в кернах ДО.

Метод неравновесного ^{210}Pb . Для расчета скоростей осадконакопления в фоновом районе вблизи сел Есаулово и Шивера нами использовался стандартный метод неравновесного ^{210}Pb [18]. Метод неравновесного ^{210}Pb состоит в следующем: в цепочке распада ^{226}Ra происходит нарушение векового равновесия при эманации ^{222}Rn из жидких и твердых осадков, содержащих изотопы ^{226}Ra . Далее ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ сут.) превращается в атмосфере в изотоп ^{210}Pb , который попадает в водоёмы с глобальными выпадениями и накапливается в речных ДО. В воде изотоп ^{210}Pb находится около 2 лет и попадает в осадки. Такой ^{210}Pb является избыточным или неравновесным ($^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}$), и количественно вычисляется по формуле:

$$A(^{210}\text{Pb}_{\text{нр}}) = A(^{210}\text{Pb}) - A(^{214}\text{Pb}), \quad (1)$$

для которых периоды полураспада $T_{1/2} (^{210}\text{Pb}) = 22,2$ года, $T_{1/2} (^{214}\text{Pb}) = 26,8$ минут. Исходя из закона радиоактивного распада, а также получив зависимость активности неравновесного ^{210}Pb от глубины керна ДО, аппроксимируем эту зависимость с целью определения показателя при экспоненте [18]. Затем рассчитываем скорость осадконакопления (V) как отношение постоянной распада $\lambda(^{210}\text{Pb})$ к показателю экспоненты (ε):

$$V = \lambda/\varepsilon \quad (2)$$

Используемый нами метод (2) предполагает как постоянство скорости осадконакопления, так и потока радионуклидов в ДО с глубиной при допущении, что миграция радионуклидов в слоях ДО отсутствует. В публикациях также встречаются и другие методы расчета скоростей осадконакопления, основанные на неравновесном ^{210}Pb , такие как метод CRS (Constant Rate of Supply) [19–21]. Однако не все методы корректно применять для расчета скоростей осадконакопления в ДО рек с изменяющимися гидродинамическими условиями. Расчет скорости методом неравновесного ^{210}Pb иногда используется в качестве верификации скоростей, полученных другими методами [22; 23].

Метод изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$. Для расчета скоростей осадконакопления, кроме неравновесного ^{210}Pb , в нашей работе использованы отношения техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ [6; 17]. Методы изотопных отношений радионуклидов, как и методы на основе неравновесного ^{210}Pb , строятся на гипотезе об отсутствии миграции радионуклидов в слоях ДО и постоянстве во времени потока радионуклидов в ДО и скорости осадконакопления. Физическая основа методов неравновесного ^{210}Pb и изотопных отношений одинакова, однако, в отличие от метода неравновесного ^{210}Pb , в рассматриваемом методе определяем зависимости известных изотопных отношений от глубины керна ДО, аппроксимируем экспоненциально полученные кривые отношений и определяем постоянные при показателе экспоненты. Рассчитываем скорость осадконакопления по $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ или $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$, с учетом периода полураспада радионуклидов ^{152}Eu ($T_{1/2} = 13,5$ л.), ^{154}Eu ($T_{1/2} = 8,6$ л.), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,2$ л.) и ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,3$ л.), по формуле:

$$V = \Delta\lambda/\varepsilon \quad (3)$$

где $\Delta\lambda$ – разность постоянных распада радионуклидов, ε – значение показателя экспоненты, полученное ранее по результатам аппроксимации.

В зависимости от наличия и источника техногенных радионуклидов, и задач исследования используются методы изотопных отношений не только с техногенными, но и природными радионуклидами [23–25].

Датирование слоев ДО. Попадая из атмосферы на поверхность аллювиальных почв, ^{210}Pb прочно сорбируется глинистой фракцией и органикой. В результате своей миграции и накопления в ДО этот неравновесный ^{210}Pb и другие радионуклиды (например, ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu), поступающие в ДО техногенным путем, служат временными маркерами. Для датирования поступления ^{137}Cs в i -е слои керна ДО в нашей работе, принимая скорости осадконакопления по формулам (2) или (3), используется отношение:

$$t_i = \frac{t_0 - x_i}{V}, \quad (4)$$

где t_i – искомое время отложения осадка в кернах, t_0 – время на момент отбора керна ДО, x_i – глубина залегания i -го слоя. Датирование слоев речных ДО базируется на основе скоростей осадконакопления, рассчитанных как методами неравновесного ^{210}Pb [20; 26], так и методами изотопных отношений

[6; 23; 27]. Датирование слоев ДО также применяется с целью определения времени поступления известных поллютантов, например, тяжелых металлов [28].

Все статистические расчеты выполнены в пакете программ STATISTICA 7.0. Сбор, коррекция, систематизация, а также статистический анализ экспериментальных данных совместно с графической визуализацией полученных результатов осуществлялись с помощью программ Microsoft Office Excel 2013.

Результаты и их обсуждение

Оценка скоростей осадконакопления с использованием ^{210}Pb и хронология поступления ^{137}Cs в ДО. Для того, чтобы достоверно определить к каким паводкам или сбросам ГХК относятся обнаруженные максимумы ^{137}Cs , необходимо построить хронологию поступления ^{137}Cs в ДО р. Енисей. Для расчета скорости осадконакопления традиционно используется метод неравновесного ^{210}Pb для тех районов ДО р. Енисей, где отсутствует техногенный изотоп ^{152}Eu из сбросов ГХК, препятствующий достоверному определению ^{210}Pb в низкоэнергетической области спектра при проведении гамма-спектрометрических работ с пробами ДО. На основе анализа вертикальных распределений природного ^{210}Pb для ДО фонового района реки выше ГХК на участках с. Есаулово и с. Шивера нами были рассчитаны скорости осадконакопления методом неравновесного ^{210}Pb . Для этих участков удельное содержание ^{137}Cs находится на уровне глобального фона и не превышает 12 Бк/кг. В качестве примера на рис. 3А приведен расчет скоростей осадконакопления для фоновых районов вблизи участка с. Есаулово и для участков вблизи с. Шивера.

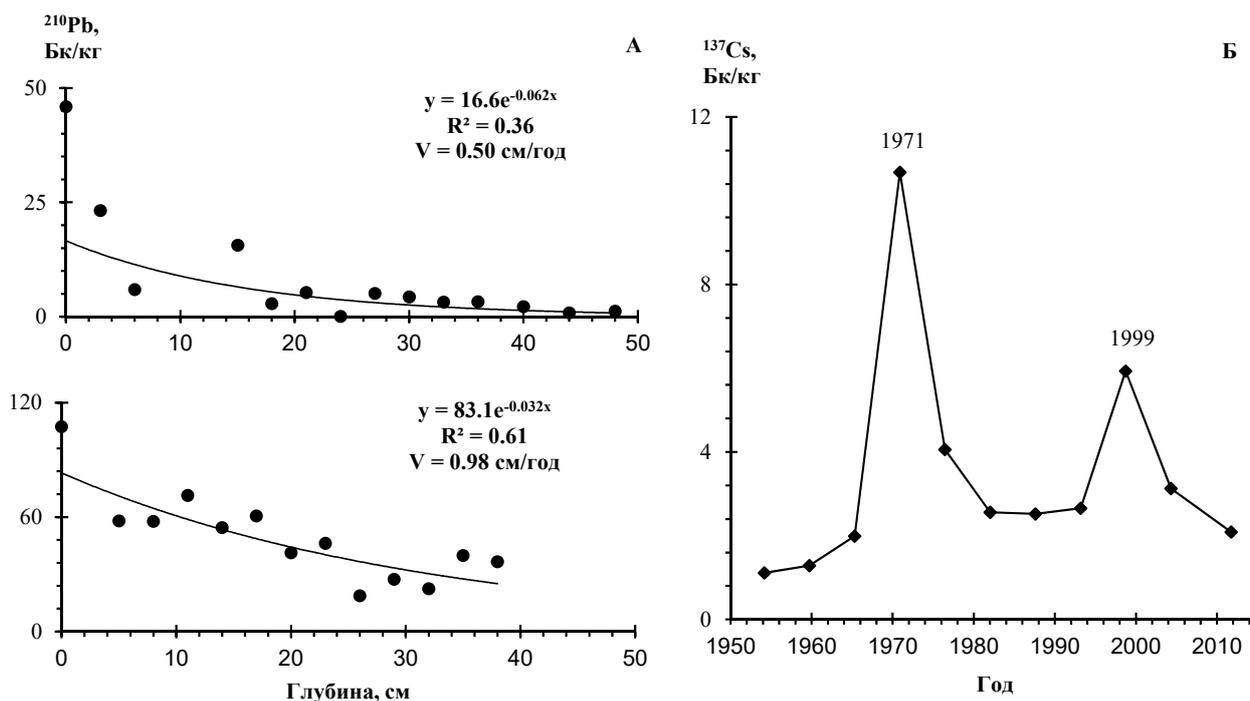


Рис. 3. Примеры расчета скоростей осадконакопления по методу неравновесного ^{210}Pb для фонового района (А) и хронологии поступления ^{137}Cs в ДО фонового района (Б)

При анализе всех кернов, отобранных на рассматриваемых участках в период с 2002 по 2022 гг., скорости осадконакопления для района вблизи с. Есаулово имели значения 0,5–1,0 см/год, а для района вблизи с. Шивера скорость находилась в диапазоне 0,5–0,6 см/год. Поэтому можно принять, что скорости осадконакопления для фонового района выше ГХК лежат в диапазоне от 0,5 до 1,0 см/год. Полученные диапазоны скоростей для фоновых районов с. Есаулово и Шивера пересекаются с учетом погрешности, что подтверждает схожесть гидрологического режима реки на этих участках. Ранее, в работе [6] были приведены скорости осадконакопления на уровне 0,9 см/год для фонового района вблизи с. Есаулово, которые входят в полученный диапазон скоростей, что также подтверждает надежность выполненных расчетов.

На точность полученных скоростей осадконакопления, помимо гидрологических параметров, также влияет изменение количества атмосферных выпадений, поступающих в р. Енисей, которые, в свою очередь, влияют на изменение концентраций неравновесного ^{210}Pb в ДО реки, что не всегда позволяет использовать неравновесный ^{210}Pb в качестве метода расчета скорости осадконакопления. Поэтому для верификации полученных результатов желательно использовать данный метод совместно с другими методами расчета скорости осадконакопления.

На примере керна ДО, отобранного в районе с. Шивера в 2011 году, была построена хронология поступления ^{137}Cs в ДО с использованием скорости 0,5 см/год (рис. 3Б). Из рисунка видно, что из двух максимумов в верхней и нижней части керна – нижний максимум с учетом ошибки расчетов может датироваться 1966 годом – годом крупнейшего паводка [12], а верхний максимум в слоях до 10 см – 1999 годом, который может быть связан с поступлением ^{137}Cs в ДО в другие паводки. Керны ДО, отобранные в другие годы в фоновых районах, также характеризовались одним или двумя максимумами ^{137}Cs , расположенными на разных глубинах.

Оценка скоростей осадконакопления с использованием отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ и хронология поступления ^{137}Cs в ДО. Для установления связи максимумов ^{137}Cs в кернах ДО с фоновыми участками с известными экстремальными паводками 1966 или 1988 года, а также другими паводками, необходимо провести дальнейшую датировку кернов, отобранных на другом участке из ближайшей зоны влияния ГХК вблизи с. Балчуг. Если в ДО в фоновых районах активность ^{137}Cs регистрируется на уровне 12 Бк/кг, то для ДО из районов ниже ГХК характерны активности на уровне 1 кБк/кг и более. Кроме того, для этого района характерно присутствие других радионуклидов, таких как ^{60}Co , с удельным содержанием на уровне 100 Бк/кг, а также ^{152}Eu на уровне 500 Бк/кг. Присутствие такого уникального многообразия техногенных радионуклидов позволяет использовать методы расчета скоростей осадконакопления по изотопным отношениям $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ для осуществления радиоизотопного датирования.

Исходя из полученных функциональных зависимостей отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ от глубины, нами рассчитаны скорости осадконакопления методами отмеченных изотопных отношений для районов вблизи с. Балчуг ниже по течению от ГХК (примеры расчетов приведены на рис. 4А). Анализ кернов, отобранных вблизи с. Балчуг показал, что рассчитанные скорости осадконакопления методом отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ лежат в диапазоне 0,6–1,3 см/год, в то время как скорости, рассчитанные методом отношения $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ для этого же района находятся на уровне 0,5–1,2 см/год. Следовательно, скорости осадконакопления для реки вблизи района с. Балчуг, рассчитанные по двум методам изотопных отношений для всех ДО, отобранных за период с 2007 по 2022 год, близки и пересекаются в интервале скоростей 0,5–1,3 см/год. Скорости осадконакопления, рассчитанные для этого участка реки вблизи ГХК, приведены ранее в работах [6; 12] для кернов ДО, отобранных до 2010 года. Из результатов этих работ следует, что скорости осадконакопления равные 1,1–1,3 см/год также лежат в диапазоне полученных скоростей. В работе [17] З.Г. Гритченко с соавторами использовали отношение $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ для расчета скоростей осадконакопления района с. Атаманово и получили скорость 0,7 см/год, которая также с учетом ошибки попадает в отмеченный выше интервал скоростей для района с. Балчуг. Интервал скоростей осадконакопления для районов вблизи сел Атаманово-Балчуг (0,5–1,3 см/год), рассчитанный по методам изотопных отношений, близок к интервалу скоростей, полученному для фонового района и рассчитанного методом неравновесного ^{210}Pb (0,5–1,0 см/год). Характер полученных скоростей осадконакопления с интервальным разбросом ~0,5–0,7 см/год для р. Енисей на исследуемых участках отбора кернов в речных излучинах и заводях также может изменяться в связи с различными гидрологическими условиями.

На рис. 4Б приведены примеры хронологии поступления ^{137}Cs в ДО вблизи с. Балчуг. Датировка слоев ДО, отобранных в 2020 году (левый график), показала, что максимум ^{137}Cs в пределах ошибки расчетов относится к экстремальному паводку 1966 года. Верхняя часть керна (после паводка 1966 года) имеет плато повышенного содержания ^{137}Cs на уровне 350 Бк/кг, что говорит о непрерывном характере поступления радионуклида в ДО после паводка. Нижняя (глубинная) часть керна ДО до максимума содержания ^{137}Cs (2,1 кБк/кг на глубине 33–42 см) обладает нисходящей активностью на уровне глобальных выпадений ниже 100 Бк/кг вследствие испытаний ядерного оружия до 1961 г. Данные ретроспективного анализа проб кернов ДО, отобранных выше по течению реки в фоновом районе вблизи с. Есаулово и Шивера, а также ниже по течению от сбросов ГХК вблизи с. Балчуг,

свидетельствуют об общей истории происхождения в этих районах слоев с максимальным содержанием ^{137}Cs глубже 30 см в период экстремального паводка 1966 г. на р. Енисей.

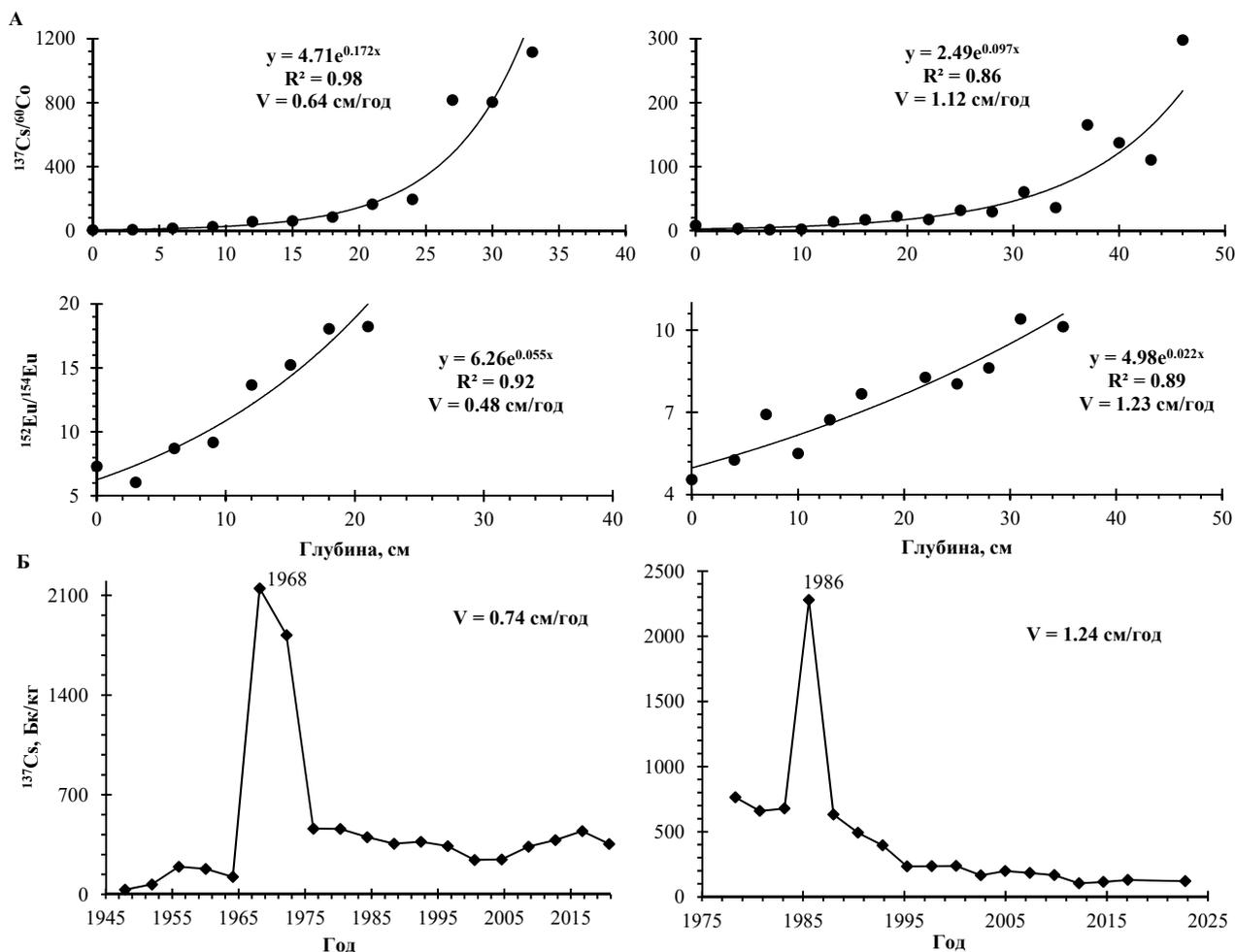


Рис. 4. Примеры расчета скоростей осадконакопления по методу изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ (А), и хронологии поступления ^{137}Cs в ДО вблизи с. Балчуг (Б)

Однако некоторые керны ДО из указанных выше районов имеют максимумы ^{137}Cs , не относящихся к паводку 1966 г. На правом графике (рис. 4Б) изображен пример датировки слоев ДО, отобранных в 2022 г., демонстрирующий, что максимум ^{137}Cs в пределах ошибки расчетов относится к паводку 1988 года – менее крупному, по сравнению с экстремальным паводком 1966 г. Часть представленного на графике керна после паводка 1988 года (до глубины 30 см) характеризуется снижением удельной активности ^{137}Cs до 200 Бк/кг, что указывает на сокращение поступления радионуклида в поверхностные слои ДО с учетом периода полураспада в последние годы. Максимум активности ^{137}Cs со значением 2,3 кБк/кг расположен на глубине 40–50 см. Глубже максимума отмечена активность ^{137}Cs на уровне 750 Бк/кг, что может свидетельствовать об активном поступлении ^{137}Cs в слои ДО до паводка 1988 года (ниже глубины 58 см). Представленные на рис. 3Б, а также на правом графике (рис. 4Б) датировки слоев ДО р. Енисей говорят о том, что помимо зафиксированного экстремального паводка 1966 года в ДО как ниже по течению от ГХК, так и в фоновом районе, нами обнаружены факты поступления ^{137}Cs в слои ДО во время других крупных паводков.

Оценка скоростей осадконакопления с использованием маркерного ^{60}Co и хронология поступления ^{137}Cs в ДО. Помимо упомянутых выше паводков 1966 и 1988 года, на реке Енисей был крупный паводок в 2006 г. По данным анализа вертикальных распределений кернов ДО, отобранных после паводка 2006 года в ближней зоне влияния ГХК на участках с. Атаманово и Балчуг, обнаружены максимумы удельной активности ^{60}Co в верхних слоях.

На рис. 5А представлены распределения ^{60}Co и ^{137}Cs по глубине верхней части аллювия на примере трёх кернов ДО, отобранных в зоне влияния ГХК вблизи с. Атаманово и Балчуг в 2016, 2019 и 2022 годах. На всех приведенных распределениях присутствуют максимумы ^{60}Co . Как следует из данных рис. 5А в 2016 году в кернах ДО участка с. Балчуг максимум удельной активности ^{60}Co находился на глубине 4–10 см, в 2019 году максимум ^{60}Co также обнаружен на глубине 4–10 см в ДО на другом участке вблизи с. Атаманово, а в кернах ДО, отобранных вблизи с. Балчуг в 2022 году (спустя 16 лет после паводка 2006 года), максимум содержания ^{60}Co отмечен на глубине 7–16 см. Из этого следует, что максимум ^{60}Co во всех кернах со временем из-за осадконакопления смещается вглубь, тогда как удельная активность ^{137}Cs существенно не меняется со временем и находится в диапазоне 100–200 Бк/кг.

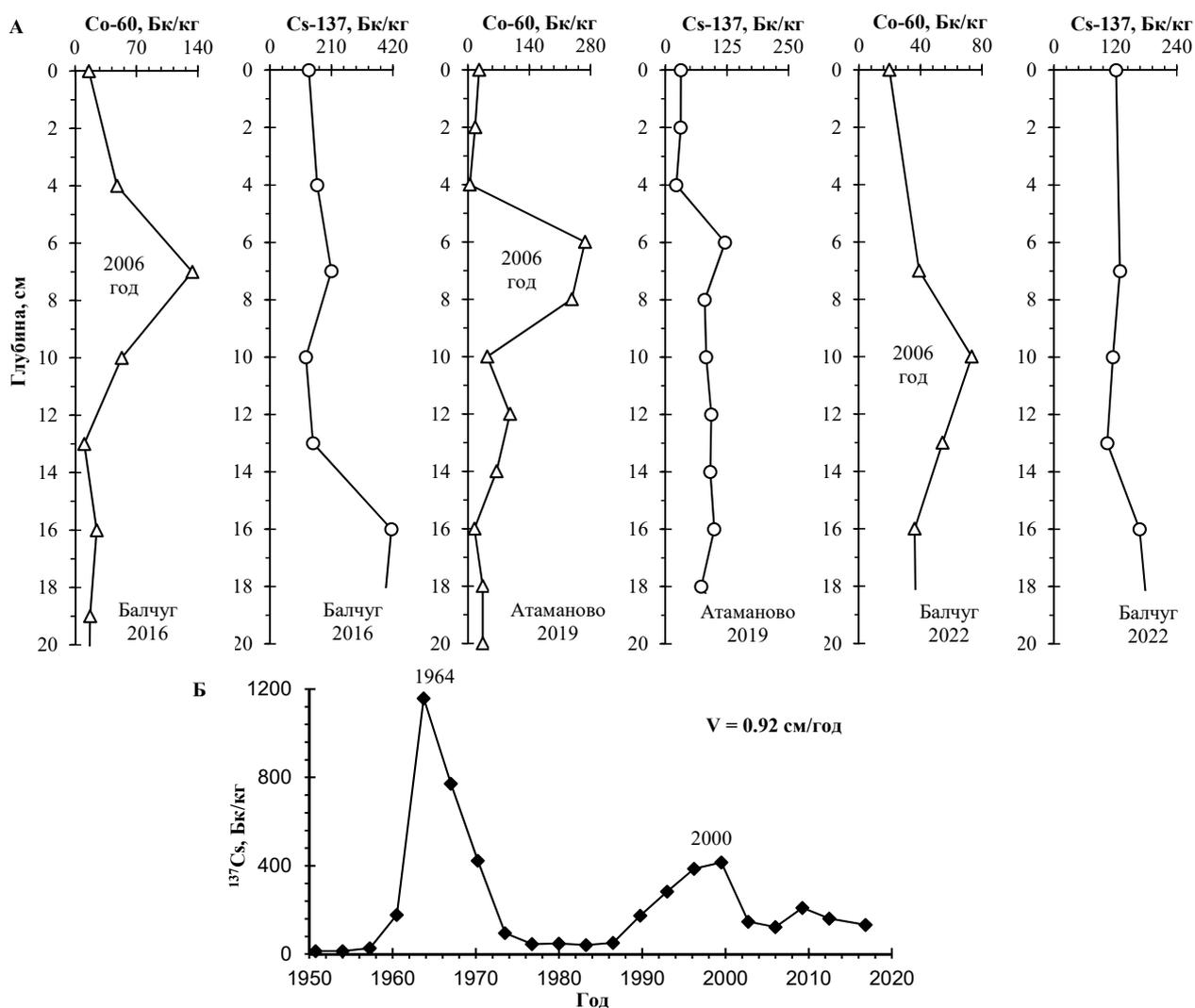


Рис. 5. Примеры вертикального распределения ^{60}Co и ^{137}Cs в верхней части ДО в районе сел Атаманово-Балчуг (А), и хронологии поступления ^{137}Cs в ДО с использованием маркерного ^{60}Co (Б)

В предыдущей нашей работе [29] было показано, что максимальное содержание ^{60}Co в верхней части кернов с известным временем поступления (2006 год), может использоваться для расчета скоростей осадконакопления. Для кернов ДО, которые были отобраны вблизи с. Атаманово и Балчуг в 2016, 2019 и 2022 году, нами рассчитаны скорости осадконакопления по максимуму ^{60}Co и получены соответствующие диапазоны скоростей. Для района вблизи с. Балчуг для кернов ДО 2016 года отбора скорость осадконакопления лежала в интервале 0,7–1,2 см/год, а для того же района, но для кернов, отобранных в 2022 г., скорость была на уровне 0,6–1,0 см/год. Для кернов ДО, отобранных в 2019 г. вблизи с. Атаманово скорость осадконакопления по максимуму ^{60}Co была в диапазоне 0,4–0,7 см/год,

что соответствует скорости 0,7 см/год, рассчитанной методом отношения $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ для района с. Атаманово, в работе [17]. В целом можно заметить, что скорости осадконакопления, рассчитанные по максимуму ^{60}Co (в интервале 0,4–1,2 см/год) и методом изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ (0,5–1,3 см/год) для участка реки ниже по течению от ГХК вблизи сел Атаманово-Балчуг, совпадают со скоростями, рассчитанными методом неравновесного ^{210}Pb (0,5–1,0 см/год) для фонового участка реки вблизи сел Есаулово и Шивера. Полученные результаты расчета скоростей указывают на схожесть гидродинамических и гидрологических условий на р. Енисей на анализируемых нами участках реки выше и ниже по течению от ГХК (вблизи с. Есаулово, Шивера и с. Балчуг).

Повышенное содержание ^{60}Co в верхних слоях кернов ДО позволяет провести ретроспективный анализ поступления ^{137}Cs в слои ДО с применением ^{60}Co как маркера времени 2006 года (рис. 5Б). Датировка слоев керна ДО, отобранного в 2016 г вблизи с. Балчуг, показала (рис. 5Б), что максимум ^{137}Cs (400 Бк/кг) в верхних слоях керна не относится к крупному паводку 1988 года, а сформирован 2000-м годом. Также в исследуемом керне ДО нам не удалось выявить паводок 2006 года, поскольку во время паводка значительного поступления ^{137}Cs в ДО не отмечалось [29]. Ранее нами был обнаружен максимум ^{137}Cs в верхних слоях ДО на фоновом участке, датированный 1999-м годом (рис. 3Б), что с учетом погрешности близок к датированному 2000-м годом максимуму ^{137}Cs в верхних слоях ДО района вблизи ГХК (рис. 5Б). По данным работы В.Г. Линника с соавторами [30] известно о многократных затоплениях разной интенсивности поймы реки на исследуемом участке вблизи с. Балчуг в период с 1989 по 2000 гг., и особенно отмечены паводки 1995 и 1997 годов, которые с учетом ошибки могут совпадать с нашей датировкой 1999–2000 год максимума ^{137}Cs . Кроме этого, на рис. 5Б в средней части керна на глубине 40–55 см, присутствует максимум ^{137}Cs (1200 Бк/кг), датированный 1966-м годом. Эта датировка также совпадает с датировкой аномальных максимумов ^{137}Cs в нижних слоях, обнаруженных ранее [12]. Ниже максимума ^{137}Cs , датированного 1966 годом, активность ^{137}Cs убывает до уровня фоновых значений. Стоит отметить, что на ранее приведенной хронологии поступления ^{137}Cs в ДО, построенной методом неравновесного ^{210}Pb , и на датировке, полученной методами отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$, так же присутствуют максимумы, датированные 1966-м годом, что говорит об их общем времени образования в слоях ДО – в период экстремального паводка 1966 г. Полученные результаты, совместно с расчетами скоростей осадконакопления, подтверждают схожие гидродинамические и гидрологические условия, сложившиеся на участках р. Енисей в фоновых районах с. Есаулово, Шивера и в ближнем к ГХК участке у сел Атаманово и Балчуг.

Выводы

Для расчета скоростей осадконакопления ДО реки Енисей нами использовано четыре метода: метод изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$, методы неравновесного ^{210}Pb и маркерного ^{60}Co . Скорости осадконакопления, рассчитанные для фоновых участков реки вблизи сел Есаулово и Шивера методом неравновесного ^{210}Pb , находились в диапазоне 0,5–1,0 см/год. Для более удаленного участка реки в районе с. Балчуг скорости были в интервале 0,5–1,3 см/год, определенные по отношениям $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$. Для районов реки вблизи с. Атаманово и с. Балчуг скорость осадконакопления, рассчитанная по маркерному ^{60}Co находилась в интервале 0,4–1,2 см/год. В целом, оценка скоростей осадконакопления для отобранных кернов ДО в фоновых районах у сел Есаулово и Шивера и вблизи сбросов ГХК у села Балчуг методами неравновесного ^{210}Pb , изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ и маркерного ^{60}Co , показала, что их значения лежат в одном интервале 0,5–1,3 см/год.

Построена хронология поступления ^{137}Cs в ДО реки Енисей с использованием расчета скоростей осадконакопления разными радиоизотопными методами. Максимальное поступление ^{137}Cs в ДО в фоновых районах с. Есаулово, Шивера и на участках с. Балчуг было отмечено во время паводка 1966 года, что подтверждается и согласуется с ранее опубликованными нашими данными о регистрации слоев, относящихся к экстремальному паводку 1966 года. Также в слоях кернов ДО обнаружены максимумы ^{137}Cs , датированные другим крупным паводком на реке Енисей – 1988 годом. Помимо известных крупных паводков, неожиданно были выявлены и менее крупные паводки (1995 и 1997 гг.) по данным ретроспективного анализа кернов ДО, отобранных в фоновом районе и на участке вблизи с. Балчуг. Эти паводки были датированы на основании расчетов скоростей осадконакопления как по методу неравновесного ^{210}Pb , так и методу маркерного ^{60}Co .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov Yu.V., Revenko Yu.A., Legin V.K., Rakov N.A., Zhidkov V.V., Savitskii Yu.V., Tishkov V.P., Pospelov Yu.N., Yegorov Yu.M. On estimating the contribution of the Enisei River to the overall radioactive contamination of the Kara // *Radiochemistry*. 1994. Vol.36. №. 6. P. 546–559.
2. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U. Tertyshnik E.G. Radioactive contamination of the Yenisei River // *Journal of Environmental Radioactivity*. 1995. Vol. 29. №. 3. P. 225–236.
3. Болсуновский А.Я., Ермаков А.И., Мясоедов Б.Ф., Новиков А.П., Соболев А.И. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей // *Доклады Академии наук*. 2002. Т. 387, № 2. С. 233–236.
4. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М., Болсуновский А.Я., Ковалев С.И., Косолапова Л.Г., Мельгунов М.С., Рапута В.Ф. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал "Гео". 2004. 286 с.
5. Bolsunovsky A.Ya. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River // *Chemistry and Ecology*. 2010. № 26. P. 401–409.
6. Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V. Sediments of the Yenisei River: monitoring of radionuclide levels and estimation of sedimentation rates // *Sediment dynamics for a changing future*. 2010. №. 337. P. 143–148.
7. Semizhon T., Röllin S., Spasova Y., Klemt E. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment // *Journal of environmental radioactivity*. 2010. Vol. 101. №. 5. P. 385–402.
8. Голосов В.Н., Иванов М.М., Цыпленков А.С., Иванов М.А., Вакияма Ю., Коноплев А.В., Константинов Е.А., Иванова Н.Н. Эрозия как фактор трансформации радиоактивного загрязнения почв на водосборе Щекинского водохранилища (Тульская область) // *Почвоведение*. 2021. №. 2. С. 247–260.
9. Sobakin P.I., Chevychelov A.P., Gerasimov Y.R. Geographical features of pollution of the territory of Yakutia with Cesium-137 // *Geography and Natural Resources*. 2019. Vol. 40. P. 151–161.
10. Leonova G.A., Melgunov M.S., Mezina K.A., Preis Yu I., Maltsev A.E., Shavekin A.S., Rubanov M.V. Natural and manmade (¹³⁷Cs) radioisotopes in Holocene sequence of the Sherstobitovsky raised bog in the Barabinsk forest-steppe (West Siberia) // *Applied Geochemistry*. 2022. Vol. 140. P. 105258.
11. Дутов А.И., Пузанова Л.А. Агроэкологические аспекты возрождения отраслей сельскохозяйственного производства на территории, загрязненной радионуклидами (на примере чернобыльской катастрофы) // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2022. Т. 32. Вып. 2. С. 140–148.
12. 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.
13. Григорьев А.Г., Нестерова Е.Н., Невин И.А., Холмянский М.А. Схема техногенного радиоактивного загрязнения Российской Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017. №. 4. С. 16–22.
14. Bolsunovsky, A.Ya. Radionuclide speciation in sediments of the Yenisei River // *Radioprotection*. 2011. Vol. 46. No. 6. P. 195–198.
15. Носов А.В., Крылов А.Л., Киселев В.П., Казаков С.В. Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах / Под ред. Р.В. Арутюняна; Российская акад. наук, Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ). Москва: Наука, 2010. 253 с.
16. Крылов А.Л., Носов А.В., Арон Д.В., Меркушов В.П. Разработка расчетного программного комплекса "Бакис" для решения водных радиоэкологических задач // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2018. №. 4. С. 57–69.
17. Гритченко З.Г., Кузнецов Ю.В., Легин В.К., Струков В.Н. Хронология формирования радиоактивно-загрязнённых пойменных и донных отложений реки Енисей с помощью радиоактивных изотопов европия // *Радиохимия*. 2002. Т. 44, № 2. С.185–190.
18. Carroll J., Lerche I. *Sedimentary processes: quantification using radionuclides*. Elsevier, Amsterdam. 2003. 272 p.
19. Du P., Walling D. E. Using ²¹⁰Pb measurements to estimate sedimentation rates on river floodplains // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 103. №. 1. Pp. 59–75.
20. Sun X., Fan D., Liao H. et al. Variation in sedimentary ²¹⁰Pb over the last 60 years in the Yangtze River Estuary: New insight to the sedimentary processes // *Marine Geology*. 2020. Vol. 427. P. 106240.
21. Abril J. M. On the use of ²¹⁰Pb-based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 244. P. 106823.
22. Wang D. et al. An eco-parametric method to derive sedimentation rates for coastal saltmarshes // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 770. P. 144756.
23. Klemt E., Putyrskaya V., Röllin 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. P. 106584.
24. Ciszewski D., Łokas E. Application of ^{239,240}Pu, ¹³⁷Cs and heavy metals for dating of river sediments // *Geochronometria*. 2019. Vol. 46. №. 1. Pp. 138–147.

25. Morereau A., Jaegler H., Hain K., Steier P., Golser R., Beaumais A., Lepage H., Eyrolle F., Grosbois C., Cazala C., Gourgiotis A. Deciphering sources of U contamination using isotope ratio signatures in the Loire River sediments: Exploring the relevance of $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ and stable Pb isotope ratios // *Chemosphere*. 2022. Vol. 307. P. 135658.
26. Xu F., Yang R., Wang H., He X., Li W., Wei Ya., Bao L., Yuan J., Tong H. Sources and historical records of metal (loid) s in river sediments from an agricultural tributary of Tuojiang river: Evidence from geochemical analyses and Pb isotope // *Chemosphere*. 2023. Vol. 322. P. 138169.
27. Rixhon G. Deeper underground: Cosmogenic burial dating of cave-deposited alluvium to reconstruct long-term fluvial landscape evolution // *Earth-Science Reviews*. 2023. P. 104357.
28. Shi C., He H., Xia Z., Gan H., Xue Q, Cui Z., Chen J. Heavy metals and Pb isotopes in a marine sediment core record environmental changes and anthropogenic activities in the Pearl River Delta over a century // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 814. P. 151934.
29. Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В., Вахрушев В.И. Радионуклид Со-60 как маркер для оценки масштаба переноса донных отложений реки Енисей в паводок 2006 года // Доклады академии наук. Москва: Pleiades Publishing. 2022. Т. 505. №. 2. С. 141–148.
30. Линник В.Г., Волосов А.Г., Коробова Е.М., Борисов А.П., Потапов В.Н., Сурков В.В., Боргуис А., Браун Дж., Алексеева Т.А. Распределение техногенных радионуклидов в аллювиальных отложениях и фракциях почв в ближней зоне Красноярского ГХК // *Радиохимия*. 2004. Т. 46. №. 5. С. 471–471.

Поступила в редакцию 24.04.2023

Вахрушев Вадим Игоревич, аспирант кафедры биофизики
ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет"*,
младший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии**
*ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет"
660041, Россия, г. Красноярск, Свободный пр-кт, д. 79
E-mail: vavadbka@yandex.ru

Болсуновский Александр Яковлевич, доктор биологических наук,
заведующий лабораторией радиоэкологии**
E-mail: radecol@ibp.ru

Дементьев Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии**
E-mail: dementyev@gmail.com

**Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 50

V.I. Vakhrushev, A.Ya. Bolsunovsky, D.V. Dementyev

USING RADIOISOTOPE METHODS TO DATE ^{137}Cs INFLOW TO BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-2-178-190

The long-term study of samples of bottom sediments (BS) of the Yenisei River revealed the presence of a unique set of artificial radionuclides (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu), which made it possible to combine different methods for calculating sedimentation rates for a retrospective assessment of river BS. Studies have been carried out to determine the sedimentation rates by various methods, using natural non-equilibrium ^{210}Pb , the ratios of artificial isotopes $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ and $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$, and marker ^{60}Co , in several sections of the Yenisei River – downstream of the radioactive discharges of the Mining and Chemical Combine (MCC) of Rosatom near the villages of B. Balchug and Atamanovo, as well as upstream of the MCC discharges in the reference areas near the villages of Esaulovo and Shivera. Estimation of sedimentation rates using non-equilibrium ^{210}Pb , $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ and $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ isotope ratios, and marker ^{60}Co for reference areas and the areas near villages located downstream of the MCC showed that their values lay in the range of 0.5–1.3 cm/year. A chronology of ^{137}Cs influx into BS was constructed using different radioisotope methods, which demonstrated that the maximum ^{137}Cs influx into BS in the reference regions of the villages of Esaulovo and Shivera and in areas of the village of B. Balchug was noted during the extreme flood of 1966. ^{137}Cs maxima were also found in the BS layers whose dating coincided with the floods of 1988 and 1995–1997.

Keywords: sediments, Yenisei River, sedimentation rates, ratios of artificial isotopes, non-equilibrium ^{210}Pb , chronology.

REFERENCES

1. Kuznetsov Yu.V., Revenko Yu.A., Legin V.K., Rakov N.A., Zhidkov V.V., Savitskii Yu.V., Tishkov V.P., Pospelov Yu.N., Yegorov Yu.M. On estimating the contribution of the Enisei River to the overall radioactive contamination of the Kara, in *Radiochemistry*, 1994, vol. 36, no. 6, pp. 546-559.
2. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U. Tertyshnik E.G. Radioactive contamination of the Yenisei River, in *Journal of Environmental Radioactivity*, 1995, vol. 29, no. 3, pp. 225-236.
3. Bolsunovsky A.Ya., Ermakov A.I., Sobolev A.I., Myasoedov B.F., Novikov A.P. [New data on the content of transuranic elements in bottom sediments of the Yenisei River], in *Doklady akademii nauk*, 2002, vol. 387, no. 8, pp. 971-974 (in Russ.).
4. Sukhorukov F.V., Degermendzhi A.G., Belolipetskiy V.M., Bolsunovskiy A.Ya., Kovalev S.I., Kosolapova L.G., Mel'gunov M.S., Raputa V.F. *Zakonomernosti raspredeleniya i migratsii radionuklidov v doline reki Enisey* [Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei plain], Novosibirsk: Publ. House of SB RAS "Geo", 2004, 286 p. (in Russ.).
5. Bolsunovsky A.Ya. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River, in *Chemistry and Ecology*, 2010, no. 26, pp. 401-409.
6. Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V. Sediments of the Yenisei River: monitoring of radionuclide levels and estimation of sedimentation rates, in *Sediment dynamics for a changing future*, 2010, no. 337, pp. 143-148.
7. Semizhon T., Röllin S., Spasova Y., Klemt E. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment, in *Journal of environmental radioactivity*, 2010, vol. 101, no. 5, pp. 385-402.
8. Golosov V. N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Wakiyama Y., Konoplev A.V., Konstantinov E.A., Ivanova N.N. [Erosion as a factor of transformation of soil radioactive contamination in the basin of the Shchekino Reservoir (Tula region)], in *Eurasian Soil Science*, 2021, vol. 54, no. 2, pp. 291-303 (in Russ.).
9. Sobakin P.I., Chevychelov A.P., Gerasimov Y.R. Geographical features of pollution of the territory of Yakutia with Cesium-137, in *Geography and Natural Resources*, 2019, vol. 40, pp. 151-161.
10. Leonova G.A., Melgunov M.S., Mezina K.A., Preis Yu I., Maltsev A.E., Shavekin A.S., Rubanov M.V. Natural and manmade (¹³⁷Cs) radioisotopes in Holocene sequence of the Sherstobitovskiy raised bog in the Barabinsk forest-steppe (West Siberia), in *Applied Geochemistry*, 2022, vol. 140, p. 105258.
11. Dutov A.I., Puzanova L.A. [Agroecological aspects of the revival of agricultural industries in the territory contaminated with radionuclides (a case of the Chernobyl disaster)], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, 2022, vol. 32, iss. 2, pp. 140-148 (in Russ.).
12. Bolsunovsky A.Y., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. [Transport of Artificial Radionuclides over Long Distances Downstream along the Yenisei River during the 1966 Extreme Flood Event], in *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 498, no. 2, pp. 514-518 (in Russ.).
13. Grigoriev A.G., Nesterova Ye.N., Neevin I.A., Kholmyanskii M.A. [The scheme of the anthropogenic radioactive pollution of Russian Arctic], in *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2017, no. 4, pp. 16-22 (in Russ.).
14. Bolsunovsky A.Ya. Radionuclide speciation in sediments of the Yenisei River, in *Radioprotection*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. 195-198.
15. Nosov A.V., Krylov A.L., Kiselev V.P., Kazakov S.V. *Modelirovanie migratsii radionuklidov v poverkhnostnykh vodakh* [Modeling of radionuclide migration in surface waters], Arutyunyan R.V. (ed); Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN. Moscow: Nauka Publ., 2010, 253 p. (in Russ.).
16. Krylov A.L., Nosov A.V., Aron D.V., Merkushev V.P. [Development of computational software system "Bakis" for solving aquatic radioecological problems], in *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2018, no. 4, pp. 57-69 (in Russ.).
17. Gritchenko Z.G., Kuznetsov Yu.V., Legin V.K., Strukov V.N. [Chronology of radioactive contamination of floodland and bottom sediments of the Yenisei river determined from europium isotope ratio], in *Radiochemistry*, 2002, vol. 44, pp. 199-204 (in Russ.).
18. Carroll J., Lerche I. *Sedimentary processes: quantification using radionuclides*. Elsevier, Amsterdam, 2003, 272 p.
19. Du P., Walling D. E. Using ²¹⁰Pb measurements to estimate sedimentation rates on river floodplains, in *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, vol. 103, no. 1, pp. 59-75.
20. Sun X., Fan D., Liao H. et al. Variation in sedimentary ²¹⁰Pb over the last 60 years in the Yangtze River Estuary: New insight to the sedimentary processes, in *Marine Geology*, 2020, vol. 427, p. 106240.
21. Abril J. M. On the use of ²¹⁰Pb-based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes, in *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, vol. 244, p. 106823.
22. Wang D. et al. An eco-parametric method to derive sedimentation rates for coastal saltmarshes, in *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 770, p. 144756.
23. Klemt E., Putyrskaya V., Röllin 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, in *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 232, p. 106584.

24. Ciszewski D., Łokas E. Application of $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs and heavy metals for dating of river sediments, in *Geochronometria*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 138-147.
25. Morereau A., Jaegler H., Hain K., Steier P., Golser R., Beaumais A., Lepage H., Eyrolle F., Grosbois C., Cazala C., Gourgiotis A. Deciphering sources of U contamination using isotope ratio signatures in the Loire River sediments: Exploring the relevance of $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ and stable Pb isotope ratios, in *Chemosphere*, 2022, vol. 307, p. 135658.
26. Xu F., Yang R., Wang H., He X., Li W., Wei Ya., Bao L., Yuan J., Tong H. Sources and historical records of metal (loid) s in river sediments from an agricultural tributary of Tuojiang river: Evidence from geochemical analyses and Pb isotope, in *Chemosphere*, 2023, vol. 322, p. 138169.
27. Rixhon G. Deeper underground: Cosmogenic burial dating of cave-deposited alluvium to reconstruct long-term fluvial landscape evolution, in *Earth-Science Reviews*, 2023, p. 104357.
28. Shi C., He H., Xia Z., Gan H., Xue Q, Cui Z., Chen J. Heavy metals and Pb isotopes in a marine sediment core record environmental changes and anthropogenic activities in the Pearl River Delta over a century, in *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 814, p. 151934.
29. Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. [The Radionuclide Co-60 as a Marker for Estimating the Scale of Transfer of Bottom Sediments in the Yenisei River during the Flood of 2006], in *Doklady Earth Sciences*, Moscow: Pleiades Publishing, 2022, vol. 505, no. 2, pp. 527-533 (in Russ.).
30. Linnik V.G., Volosov A.G., Korobova Ye.M., Borisov A.P., Potapov V.N., Surkov V.V., Borguis A., Braun Dzh., Alekseyeva T.A. [Distribution of technogenic radionuclides in alluvial deposits and fractions of soils in neighboring zone of Krasnoyarsk GKHK], in *Radiochemistry*, 2004, vol. 46, no. 5, pp. 471-471 (in Russ.).

Received 24.04.2023

Vakhrushev V.I., PhD student, Department of Biophysics, Siberian Federal University*,
Junior Researcher, Laboratory of Radioecology, Institute of Biophysics, FRC KSC SB RAS**

* Siberian Federal University

Svobodny pr-kt, 79, Krasnoyarsk, Russia, 660041

E-mail: vavadbka@yandex.ru

Bolsunovsky A.Ya., Doctor of Biology, Head of the Laboratory of Radioecology**

E-mail: radecol@ibp.ru

Dementyev D.V., Candidate of Biology, Senior Researcher, Laboratory of Radioecology**

E-mail: dementyev@gmail.com

Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences**

Akademgorodok st., 50, Krasnoyarsk, Russia, 660036