

ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.27>

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОНУКЛИДА СО-60 КАК ВРЕМЕННОГО МАРКЕРА ДЛЯ ДАТИРОВКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ ЕНИСЕЙ

Научная статья

Болсуновский А.Я.^{1,*}, Вахрушев В.И.²

^{1,2} Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (radecology[at]gmail.com)

Аннотация

В статье представлены результаты использования микрочастиц с ^{60}Co как реперного маркера даты паводка 2006 года для расчёта скоростей осадконакопления донных отложений (ДО) реки Енисей в зоне радиоактивного влияния ГХК. Описана аппаратура и методика измерений. На основании скоростей осадконакопления для двух районов реки показано, что максимальное поступление ^{137}Cs в ДО в зоне влияния ГХК датируется периодами крупных паводков 1966 и 1988 года. В период паводка 1988 года в ДО р. Енисей поступали два радионуклида (^{137}Cs и ^{60}Co), в отличие от поступления только ^{60}Co в период паводка 2006 года. Регистрация микрочастиц с ^{60}Co в различных слоях керна на разных глубинах способствует повышению точности хронологии поступления радионуклидов в ДО.

Ключевые слова: донные отложения, река Енисей, паводки, техногенные радионуклиды, радиоактивные микрочастицы, датировка слоев.

APPLICATION OF RADIONUCLIDE CO-60 AS A TEMPORAL MARKER FOR DATING BOTTOM SEDIMENTS IN THE YENISEY RIVER

Research article

Bolsunovsky A.Y.^{1,*}, Vakhrushev V.I.²

^{1,2} Institute of Biophysics of SB RAS, Красноярск, Russian Federation

* Corresponding author (radecology[at]gmail.com)

Abstract

The article presents the results of using ^{60}Co microparticles as a reference marker for the 2006 flood date to calculate the sedimentation rates of bottom sediments (BS) of the Yenisei River in the zone of radioactive influence of the MCC. The equipment and measurement methods are described. Based on the sedimentation rates for two areas of the river, it is shown that the maximum influx of ^{137}Cs into the DS in the zone of influence of the MCC dates back to the periods of major floods in 1966 and 1988. During the 1988 flood, two radionuclides (^{137}Cs and ^{60}Co) entered the BS of the Yenisei River, as opposed to only ^{60}Co during the 2006 flood. The registration of ^{60}Co microparticles in various layers of the core at different depths contributes to the accuracy of the chronology of radionuclide entry into the BS.

Keywords: bottom sediments, Yenisei River, floods, technogenic radionuclides, radioactive microparticles, layer dating.

Введение

Донные осадки (ДО) водоёмов представляют собой уникальный объект, который содержит многолетние сведения о техногенной деятельности источника загрязнения в береговой зоне, а также о глобальных природных событиях. Радиоэкологический мониторинг реки Енисей в районе воздействия Горно-химического комбината (ГХК) ГК «Росатом» вблизи г. Железногорск выявил повышенное содержание техногенных радионуклидов в ДО [1], [3], [5], [7]. В отдельных слоях ДО и пойменных почв были обнаружены радиоактивные частицы, исследования которых в институтах Красноярска, Новосибирска и Москвы подтвердили реакторное (ГХК) происхождение [2], [8], [9], [10]. Радиоактивные частицы содержали радионуклиды цепной реакции, а также только радионуклид активационного происхождения ^{60}Co [2], [7], [8], [10]. Наличие радиоактивных частиц в пойме р. Енисей приводит к неравномерному распределению радионуклидов по глубине пойменных почв и осадков. Исследования показали, что вертикальные профили радионуклидов в ДО р. Енисей имеют ряд максимумов, обусловленных как гидрологическим режимом реки, так и уровнем штатных сбросов комбината, включая радиоактивные частицы. Одним из факторов, способствовавших образованию высокоактивных максимумов ^{137}Cs на различных глубинах кернов ДО, стал экстремальный паводок 1966 года на р. Енисей [2], [6]. Данный паводок вызвал затопление береговой зоны комбината и способствовал переносу взвеси с радионуклидами на значительные расстояния по течению реки [2], [3], [4], [6]. Помимо паводка 1966 года, река Енисей подвергалась и другим экстремальным наводнениям, например, в 1988 и 2006 годах. Вследствие этих событий в различных глубинных слоях донных осадков были зарегистрированы максимумы содержания радионуклидов.

Для датировки слоёв ДО обычно используют радиоизотопные методы на основе естественных и техногенных радионуклидов [11]. Ранее в наших работах [12], [13] были приведены результаты расчёта скоростей осадконакопления р. Енисей на основе разных радиоизотопных методов: неравновесного ^{210}Pb , изотопных отношений $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$. Путем датировки слоев осадков, обогащенных радиоактивным изотопом ^{137}Cs , было установлено, что его максимальные содержания приходятся на время крупных паводков на реке Енисей, а также на другие, не связанные с наводнениями, события [12], [13]. После крупного паводка 2006 г. на реке Енисей в верхних слоях ДО кернов района Балчуг были зарегистрированы максимумы ^{60}Co и в отдельных слоях были отмечены

радиоактивные микрочастицы с ^{60}Co [7]. Предполагается, что ^{60}Co был смыт со взвесью с береговой зоны ГХК во время паводка 2006 года. Максимумы радионуклида ^{60}Co в верхних слоях после паводка 2006 года, включая микрочастицы с ^{60}Co [7], могут служить дополнительным маркером для датировки слоёв ДО, кроме метода отношения изотопов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$. Однако ранее верхние слои максимумов ^{60}Co в ДО многих районов реки не анализировали на присутствие Со-микрочастиц и тем самым снижали доказательность принадлежности слоя максимума ^{60}Co именно к паводку 2006 года.

Цель работы — оценка применимости техногенного радионуклида ^{60}Co , в том числе в составе радиоактивных микрочастиц, как индикатора времени для определения возраста слоев с максимальным содержанием ^{137}Cs в донных осадках реки Енисей в зоне непосредственного воздействия комбината.

Методы и принципы исследования

В период с 2016 по 2021 год в ходе экспедиций были отобраны донные осадки (ДО) реки Енисей по направлению течения от Горно-химического комбината вблизи сёл Атаманово и Балчуг, расположенных на расстоянии 86 и 96 км от г. Красноярска, соответственно. Эти районы отбора находятся на расстоянии около 5 км (Атаманово) и 15 км (Балчуг) по течению реки от места предполагаемого сброса ГХК. В районе с. Балчуг керн ДО отбирали в протоке под слоем воды примерно 60–70 см. В районе с. Атаманово керн ДО отбирали в голове одного из островов напротив села в низкой пойме. Место отбора было на расстоянии около 8 м от уреза воды и ежегодно затапливается во время весенне-летних паводков. При отборе керна в районе с. Атаманово на глубине 40 см была отмечена вода. Для отбора кернов ДО использовали стальные цилиндрические пробоотборники. Методика подготовки проб ДО и гамма-спектрометрия радионуклидного состава ДО подробно приведена в работах [5], [7], [12], [13].

Согласно данным работы Linnik et al. [3], в аллювиальных осадках поймы среднего течения реки Енисей в зоне влияния ГХК распределение радионуклидов различается: ^{137}Cs преимущественно сорбируется на тонкодисперсных фракциях, таких как пески мелкой фракции, суглинки и глинистые осадки; ^{60}Co и ^{152}Eu демонстрируют более высокую аффинность к среднесуглинистым и глинистым фракциям. 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). Ожидаемо, донные осадки рек содержат большое количество SiO_2 и Al_2O_3 . Концентрации SiO_2 в ДО нескольких позиций р. Енисей вблизи сел Балчуг и Атаманово варьировали от 56 до 68 масс. %. Диапазон концентраций Al_2O_3 в ДО с позиций вблизи сел Балчуг и Атаманово составлял 11,9–13,1 масс. %. Концентрации Fe_2O_3 в отобранных образцах варьировали от 4,5 до 6,0 масс. %. В пробах осадков также содержались MgO , CaO , Na_2O , K_2O и TiO_2 , которые не превышали 1–3 масс. % и существенно не различались между районами отбора проб. Таким образом, концентрации основных элементов в донных осадках существенно не различались между позициями в одном районе отбора проб, а также между районами отбора вблизи сел Балчуг и Атаманово.

Для выделения радиоактивных микрочастиц с ^{60}Co использовали метод последовательного разделения (квартования) исходной пробы ДО и г-спектрометрические измерения отдельных частей этой пробы (от 10 до 260 грамм). В работе выделялись не сами микрочастицы с ^{60}Co , а минимальные части пробы, содержащие данные микрочастицы. Время измерения проб варьировало от 40000 до 90000 секунд. Статистические расчеты проводили с помощью программы ExcelMSOffice. Относительная ошибка в определении активности радионуклидов в пробах ДО была $\leq 20\%$.

Основные результаты и обсуждение

Ранее анализ распределения радионуклидов по глубине осадков, извлеченных из зоны воздействия комбината, выявил наличие множественных максимумов ^{60}Co и ^{137}Cs . Эти максимумы радионуклидов в ДО, возможно, могут быть связаны не только с поступлением радионуклидов с территории ГХК во время крупных паводков 1966, 1988 и 2006 года на Енисее, но и другими событиями, например, штатной деятельностью ГХК. Однако для корректной датировки слоёв ДО р. Енисей необходимо знать скорости осадконакопления. Предыдущие исследования, основанные на анализе соотношения радионуклидов ($^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$) в ДО вблизи комбината (район села Балчуг), показали, что скорость накопления осадка составляла от 0,5 до 1,3 см/год [12], [13]. Эти значения близки к скорости осадконакопления (0,5–1,0 см/год), рассчитанной для контрольного участка реки (выше ГХК) с использованием метода неравновесного ^{210}Pb [12], [13].

Как уже отмечали, для кернов ДО, извлеченных после паводка 2006 года вблизи ГХК (район с. Балчуг), в верхних слоях зарегистрировали максимумы удельной активности ^{60}Co [7]. При разделении проб ДО с высоким содержанием ^{60}Co на отдельные части, в некоторых из них обнаружены микрочастицы, содержащие ^{60}Co . В отобранных кернах ДО другого района вблизи ГХК (с. Атаманово) также отмечены слои максимального содержания ^{60}Co и возможно присутствие микрочастиц с ^{60}Co . Наличие Со-микрочастиц в кернах ДО, как маркеров даты паводка 2006 года, позволит рассчитать скорости осадконакопления и построить сравнительную хронологию поступления ^{137}Cs в ДО р. Енисей для двух районов вблизи ГХК (села Балчуг и Атаманово).

3.1. Исследование распределения радионуклидов по глубине осадков реки Енисей в районе с. Балчуг, а также определение возраста слоев с помощью анализа микрочастиц, содержащих ^{60}Co

Для района Балчуг ранее проведенные исследования обнаружили в верхних слоях ДО радиоактивные частицы с высокой удельной активностью не только ^{137}Cs , но и ^{60}Co [9]. Авторы отмечали, что после извлечения крупных радиоактивных частиц с высокой активностью ^{60}Co в отобранных пробах ДО остаются микрочастицы низкой активности ^{60}Co [9]. Эти радиоактивные микрочастицы были найдены только в верхних слоях ДО в ближней зоне влияния ГХК (с. Балчуг). В более глубоких слоях ДО этого района микрочастицы с ^{60}Co не обнаружены.

На примере керна ДО (рисунок 1) из района Балчуг продемонстрировано, как распределение ^{60}Co и присутствие Со-микрочастиц может служить маркером даты (2006 г.) для расчёта скорости осадконакопления. В этом керне

основной пик ^{60}Co и наличие Со-микро частиц наблюдается в верхних слоях ДО (4–12 см), а основной пик ^{137}Cs — в более глубоком слое (42–45 см). Также в слое 20–23 см регистрируется другой максимум ^{137}Cs , но его активность в 2 раза ниже активности ^{137}Cs в слое 42–45 см. Анализ верхних слоев осадков после паводка 2006 года выявил отсутствие статистически значимых изменений в удельной активности радионуклида ^{137}Cs (рис. 1 (б)). Данный результат представляется нетипичным, учитывая известные случаи поступления ^{137}Cs с территории комбината во время предыдущих масштабных паводков, таких как в 1966 году.

На основании скорости осадконакопления (0,9 см/год), рассчитанной с помощью реперного максимума ^{60}Co (Со-микро частицы) даты паводка 2006 г., максимальное поступление ^{137}Cs в нижний слой керна 40–52 см датируется периодом паводка 1966 г. (рисунок 1(б)). При этом максимум ^{137}Cs в слое 20–23 см датируется 1995 годом, что с учётом ошибки расчётов можно связать с крупным паводком на р. Енисей в 1988 году. Также в этом слое 20–23 см отмечен не только максимум ^{137}Cs , но и максимум ^{60}Co (рис. 1(а)), что свидетельствует о возможном поступлении в период паводка 1988 года с территории ГХК в ДО двух радионуклидов. Однако частицы с ^{60}Co в слое 20–23 см не было обнаружено. Полученная скорость осадконакопления (0,9 см/год), рассчитанная по реперному маркеру ^{60}Co (2006 г.) соответствует интервалу скоростей, полученными ранее с использованием радиоизотопных методов для контрольного района и зоны вблизи ГХК (Балчуг) — 0,5–1,3 см/год [12], [13].

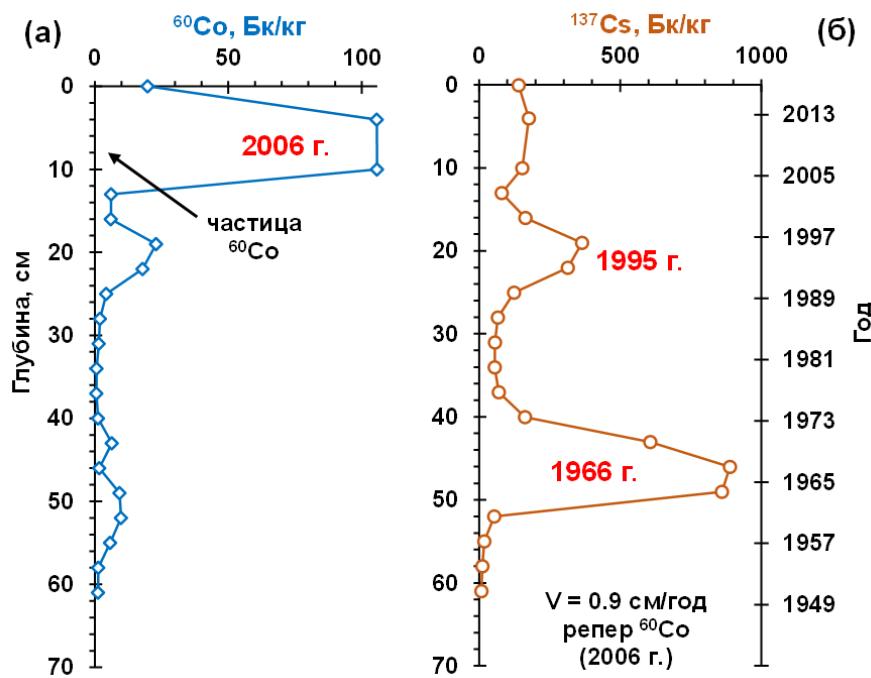


Рисунок 1 - Пример вертикального распределения ^{60}Co , ^{137}Cs в ДО (а, б) и хронология поступления ^{137}Cs (б) в ДО р. Енисей района Балчуг

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.27.1>

Примечание: стрелкой на графике отмечен слой с частицами ^{60}Co

3.2. Исследование распределения радионуклидов по глубине осадков реки Енисей в районе с. Атаманово, а также определение возраста слоев с помощью анализа частиц, содержащих ^{60}Co

Как было отмечено ранее, проведенный анализ кернов осадков реки Енисей в районе Балчуг (вблизи ГХК) показал отсутствие частиц ^{60}Co на разных глубинах, за исключением верхних слоев, связанных с паводком 2006 года. Однако для одного из кернов ДО другого района вблизи ГХК (Атаманово), отобранного в 2021 году, были отмечены слои повышенного содержания ^{60}Co на разной глубине, которые могли содержать частицы с ^{60}Co . На рис. 2 (а, б) показано вертикальное распределение ^{60}Co и ^{137}Cs в керне ДО р. Енисей, отобранного в районе Атаманово в 2021 году, при этом активность радионуклидов приведена в исходной пробе до квартования и выделения частиц. Длина этого керна была около 35 см и в трёх слоях методом разделения проб и гамма-спектрометрии малых навесок были обнаружены частицы с ^{60}Co . Это были следующие слои ДО: №4 (10–13 см), №8 (22–25 см) и №10 (27–29 см). Выбор этих слоёв, как и других, для последующего анализа на частицы был обоснован повышенным содержанием радионуклидов в этих слоях, по сравнению с пробами из ближайших слоёв кернов ДО. Так, в слое №8 активность ^{60}Co в исходной пробе составила 1490 Бк/кг, по сравнению со значениями 2–5 Бк/кг в соседних слоях. После разделения пробы №8 и проведения гамма-спектрометрии навесок разной массы была зарегистрирована более высокая удельная активность ^{60}Co — до 3470 Бк/кг в одной из навесок, что доказало присутствие частиц с ^{60}Co в этом слое ДО. При использовании метода разделения проб на части для слоя №4 получена максимальная активность ^{60}Co в навесках с частицами до 33 Бк/кг, для слоя №10 — 400 Бк/кг. Для этого керна в слое ДО №4 (10–13 см) с Со-частичами отсутствует максимум ^{137}Cs (рис. 2 (б)). И только для слоя №10 с Со-частичами на глубине

27–29 см отмечен максимум ^{137}Cs . Частично максимум ^{137}Cs в слое №10 начинает проявляться и в слое №8 (22–25 см), где также были обнаружены микрочастицы с ^{60}Co .

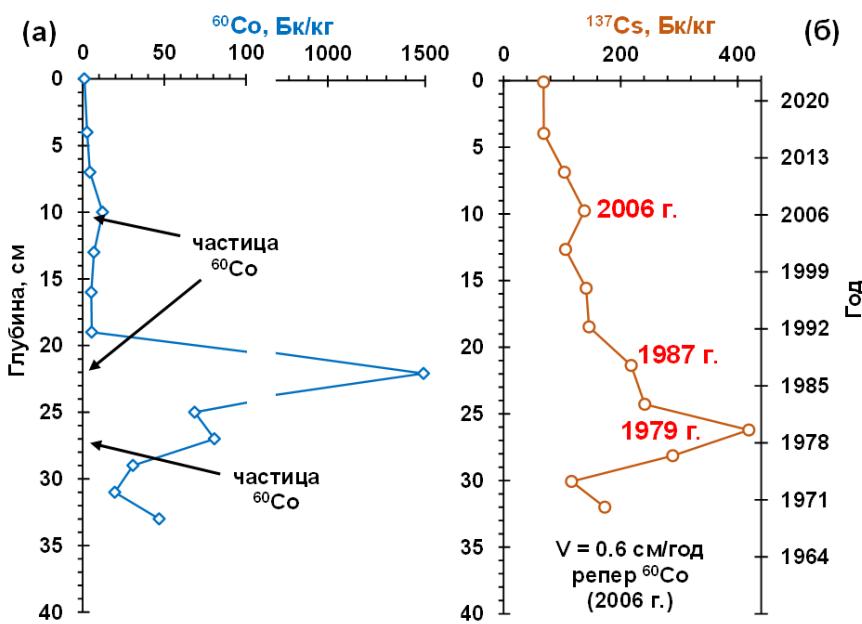


Рисунок 2 - Вертикальное распределение ^{60}Co и ^{137}Cs (а, б) в керне ДО района Атаманово, отобранного вблизи ГХК в 2021 году (активность радионуклидов в исходной пробе до квартования и выделения микрочастиц) и хронология поступления ^{137}Cs в ДО района Атаманово (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.27.2>

Примечание: стрелками на графике отмечены слои с микрочастицами ^{60}Co

Исходя из данных о наличии микрочастиц ^{60}Co в осадках Балчуга после паводка 2006 года, можно предположить, что аналогичные частицы в верхнем слое №4 керна из Атаманово также относятся к этому паводковому периоду. Об этом может свидетельствовать тот факт, что в слоях ДО района Балчуг с максимумом ^{60}Co в период паводка 2006 года отсутствует явный максимум ^{137}Cs (рис.1, 2). Применив метод реперного максимума ^{60}Co (присутствие микрочастицы с ^{60}Co в слое ДО №4) с датой 2006 года в отношении керна района Атаманово можно рассчитать скорость осадконакопления. Полученная скорость осадконакопления района Атаманово составит 0,6 см/год, что соответствует интервалу скоростей, рассчитанному ранее для контрольного района и зоны вблизи ГХК (Балчуг) — 0,5–1,3 см/год [12], [13], а также скорости, рассчитанной ранее с использованием метода реперного максимума ^{60}Co (0,9 см/год) для керна района Балчуг (рис.1).

Используя полученную методом реперного максимума ^{60}Co (2006 г) скорость осадконакопления для ДО района Атаманово (0,6 см/год), была получена хронология поступления двух радионуклидов ^{137}Cs , и ^{60}Co в ДО данного района р. Енисей. Хронология демонстрирует, что слой 22–25 см с Со-микрочастицами датируется 1987 годом, а слой 27–29 см с микрочастицами датируется 1979 годом (рис 2 (б)). Близость датировок слоёв №8 и №10 (1987 и 1979 годы), присутствие Со-микрочастиц, а также возможная погрешность расчётов — всё это позволяет сделать вывод о наличии единственного максимума ^{137}Cs в протяжённом слое ДО (22–29 см), образованном в период паводка 1988 года (рис. 2(б)). Ранее для керна ДО района Балчуг в слое 20–23 см, датированным с учётом ошибки расчётов паводком на р. Енисей в 1988 году (рис. 1), отмечен не только максимум ^{137}Cs , но и максимум ^{60}Co . Слои максимумов ^{137}Cs и ^{60}Co , датированные паводком 1988 года, для керна ДО района Балчуг были на глубине 20–23 см, а для района Атаманово — на глубине 22–29 см, т.е. близки по глубине (рис. 1 и рис. 2). Из сравнения данных распределения радионуклидов в кернах ДО для районов Балчуг и Атаманово (рис. 1 и рис. 2) следует о поступлении в период паводка 1988 года с территории ГХК двух радионуклидов (^{137}Cs и ^{60}Co). И при этом ^{60}Co мог поступать с территории ГХК в форме микрочастиц не только во время паводка 2006 года, но и паводка 1988 года. Следует отметить, что расчёт скорости осадконакопления и хронологии керна района Атаманово по методу отношения техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ оказался невозможным из-за присутствия микрочастиц с ^{60}Co не в одном, а в нескольких слоях по глубине керна.

Ранее в публикации [10] в соавторстве со специалистами ГХК отмечали существование не только радиоактивных топливных частиц, но и микрочастиц с ^{60}Co в пойменной почве р. Енисей вблизи ГХК. Согласно этой публикации [10], микрочастицы ^{60}Co были обнаружены в разных слоях по глубине пойменной почвы района вблизи ГХК, и авторы сделали вывод, что микрочастицы до 1999 года могли поступать неоднократно со сбросными водами в течение этого периода эксплуатации ГХК. Проведенные в настоящей работе исследования зарегистрировали микрочастицы ^{60}Co не только в поверхностных слоях ДО после крупного паводка на р. Енисей в 2006 году, но и в более глубоких слоях керна (рис. 2). Полученные данные подтверждают выводы работы [10] о неоднократных поступлениях Со-микрочастиц со сбросными водами ГХК, но в настоящей работе результаты были получены спустя 20 лет после исследований авторов публикаций (до 1999 года). Ранее проведенные исследования ДО р. Енисей выявили не только микрочастицы с ^{60}Co , но

и микрочастицы с доминированием ^{137}Cs или трансуранового элемента ^{241}Am [4], [13]. Микрочастицы с доминированием других радионуклидов (кроме ^{60}Co) в слоях ДО могут быть использованы в будущем в качестве дополнительных маркеров для хронологии осадконакопления.

В седиментологии для хронологии повсеместно используют метод неравновесного свинца и его модификации (CRS), а также метод реперного ^{137}Cs по датам глобальных выпадений. Для реки Енисей в зоне влияния ГХК из-за присутствия в осадках ^{152}Eu невозможно получить данные по неравновесному свинцу и провести датировку слоев этим методом. Для датировки слоев ДО реки возможно использование отношения техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, но присутствие микрочастиц с ^{60}Co или ^{137}Cs в отдельных слоях осадков р. Енисей приводит к большим неточностям расчетов. В связи с этим для датировки слоев осадков предлагается метод микрочастиц ^{60}Co в качестве реперного маркера, привязанного к дате паводка 2006 года. В будущем возможно использование метода Со-микрочастиц в качестве реперного с датой паводка не только 2006, но и 1988 года для датировки слоев осадков. Имеющийся у авторов настоящей работы опыт по датировке слоев ДО р. Енисей показал необходимость в использовании максимального числа радиоизотопных методов для получения объективной хронологии.

Заключение

Обнаруженные радиоактивные микрочастицы с ^{60}Co в слоях ДО р. Енисей в зоне влияния ГХК могут быть маркером даты паводка 2006 года для определения скоростей осадконакопления. Полученные с помощью Со-микрочастиц оценки скоростей осадконакопления для двух участков реки в районе комбината (0,6 и 0,9 см/год) демонстрируют высокую степень согласованности между собой и хорошо укладываются в ранее установленный диапазон скоростей (0,5–1,3 см/год), определенный другими методами. На основании построенной хронологии для двух районов реки (Атаманово и Балчуг) подтверждено, что максимальное поступление ^{137}Cs в ДО датируется периодами крупных паводков 1966 и 1988 года. Впервые выявлено, что в период паводка 1988 года в ДО р. Енисей поступали два радионуклида (^{137}Cs и ^{60}Co) с береговой зоны ГХК, в отличие от поступления только ^{60}Co в период паводка 2006 года. При этом в паводки 1988 и 2006 годов ^{60}Co мог поступать в ДО в форме Со-микрочастиц. Регистрация микрочастиц с ^{60}Co в различных слоях керна способствует повышению точности хронологии поступления радионуклидов в ДО р. Енисей. Данные ретроспективного анализа показывают, что аномальные паводки на Енисее приводят к максимальному поступлению радионуклидов в ДО. Это подчеркивает значимость гидрологического режима реки как одного из факторов, определяющего радиоактивное загрязнение ДО и биоты. Учитывая продолжающуюся деятельность ГХК, необходимо комплексное рассмотрение всех влияющих факторов (гидрологических и производственных) для минимизации радиоактивной нагрузки на экосистему реки Енисей.

Доказанная применимость метода радиоактивных микрочастиц с ^{60}Co в слоях ДО р. Енисей в качестве маркера даты паводка 2006 года увеличила число используемых радиоизотопных методов (неравновесный ^{210}Pb , изотопные отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$) для построения хронология поступления радионуклидов в ДО р. Енисей или других водоемов. В современной седиментологии существует необходимость в использовании максимального числа радиоизотопных методов для получения объективной хронологии.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024).

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику лаборатории радиоэкологии Института биофизики СО РАН Дементьеву Д. В. за помощь в исследовании донных отложений.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FWES-2024-0024).

Acknowledgement

The authors express their gratitude to Dementiev D.V., Senior Researcher at the Radioecology Laboratory of the Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for his assistance in studying bottom sediments.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Болсуновский А.Я. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей / А.Я. Болсуновский, А.И. Ермаков, Б.Ф. Мясоедов [и др.] // ДАН. — 2002. — Т. 387. — № 2. — С. 233–236.
2. Сухоруков Ф.В. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей / Ф.В. Сухоруков, А.Г. Дегерменджи, В.М. Белолипецкий [и др.]. — Новосибирск: Гео, 2004. — 287 с.
3. Linnik V.G. Distribution of technogenic radionuclides in alluvial sediments and among fractions of the soil in the near zone of the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine / V.G. Linnik, A.G. Volosov, E.M. Korobova [et al.] // Radiochemistry. — 2004. — Vol. 46 (5). — P. 508–514.
4. Semizhon T. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment / T. Semizhon, S. Röllin, Y. Spasova [et al.] // J. Environ. Radioactivity. — 2010. — Vol. 101. — P. 385–402.

5. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River / A. Bolsunovsky // Chemistry and Ecology. — 2010. — Vol. 26. — № 6. — P. 401–409.
6. Болсуновский А.Я. Масштабный перенос техногенных радионуклидов по течению реки Енисей во время экстремального паводка 1966 г / А.Я. Болсуновский, Д.В. Дементьев, В.И. Вахрушев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2021. — Т. 498. — № 2. — С. 189–194.
7. Bolsunovsky A. 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 / A. Bolsunovsky, D. Dementyev, V. Vakhrushev // Reports on Earth Sciences. — 2022. — Vol. 505. — Pt. 2. — P. 527–533.
8. Bolsunovsky A.Ya. Hot particles in the Krasnoyarsk Territory / A.Ya. Bolsunovsky, T.A. Goryachenkova, V.O. Cherkezyan [et al.] // Radiochemistry. — 1998 — Vol. 40. — № 3. — P. 271–274.
9. Bolsunovsky A. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain / A. Bolsunovsky, M. Melgunov, A. Chuguevskii [et al.] // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — № 11132. — P. 1–10.
10. Gritchenko Z.G. Hot Particles of the Second Kind in Flood Lands of the Yenisei River / Z.G. Gritchenko, Yu.V. Kuznetsov, V.K. Legin [et al.] // Radiochemistry. — 2001. — Vol. 43. — № 6. — P. 639–642.
11. Foucher A. 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. Chaboche, P. Sabatier [et al.] // Earth System Science Data Discussions. — 2021. — P. 1–61.
12. Вахрушев В.И. Использование радиоизотопных методов для хронологии поступления Cs в донные отложения реки Енисей / В.И. Вахрушев, А.Я. Болсуновский, Д.В. Дементьев // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. — 2023. — Т. 33. — № 2. — С. 178–190.
13. Bolsunovsky A.Ya. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River / A.Ya. Bolsunovsky, V.I. Vakhrushev, D.V. Dementyev // Limnology and Freshwater Biology. — 2024. — № 4. — P. 274–279.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bolsunovskii A.Ya. Novie dannie po soderzhaniyu transuranovikh elementov v donnikh otlozheniyakh reki Yenisei [New data on the content of transuranic elements in bottom sediments of the Yenisei River] / A.Ya. Bolsunovskii, A.I. Yermakov, B.F. Myasoedov [et al.] // DAN [Reports on Earth Sciences]. — 2002. — Vol. 387. — № 2. — P. 233–236. [in Russian]
2. Sukhorukov F.V. Zakonomernosti raspredeleniya i migratsii radionuklidov v doline reki Yenisei [Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River Valley] / F.V. Sukhorukov, A.G. Degermendzhi, V.M. Belolipetskii [et al.]. — Novosibirsk: Geo, 2004. — 287 p. [in Russian]
3. Linnik V.G. Distribution of technogenic radionuclides in alluvial sediments and among fractions of the soil in the near zone of the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine / V.G. Linnik, A.G. Volosov, E.M. Korobova [et al.] // Radiochemistry. — 2004. — Vol. 46 (5). — P. 508–514.
4. Semizhon T. Transport and distribution of artificial gamma-emitting radionuclides in the River Yenisei and its sediment / T. Semizhon, S. Röllin, Y. Spasova [et al.] // J. Environ. Radioactivity. — 2010. — Vol. 101. — P. 385–402.
5. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River / A. Bolsunovsky // Chemistry and Ecology. — 2010. — Vol. 26. — № 6. — P. 401–409.
6. Bolsunovskii A.Ya. Masshtabnyi perenos tekhnogennikh radionuklidov po techeniyu reki Yenisei vo vremya ekstremalnogo pavodka 1966 g [Transport of Artificial Radionuclides over Long Distances Downstream along the Yenisei River during the 1966 Extreme Flood Event] / A.Ya. Bolsunovskii, D.V. Dementev, V.I. Vakhrushev // Dokladi Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle [Reports on Earth Sciences]. — 2021. — Vol. 498. — № 2. — P. 189–194. [in Russian]
7. Bolsunovsky A. 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 / A. Bolsunovsky, D. Dementyev, V. Vakhrushev // Reports on Earth Sciences. — 2022. — Vol. 505. — Pt. 2. — P. 527–533.
8. Bolsunovsky A.Ya. Hot particles in the Krasnoyarsk Territory / A.Ya. Bolsunovsky, T.A. Goryachenkova, V.O. Cherkezyan [et al.] // Radiochemistry. — 1998 — Vol. 40. — № 3. — P. 271–274.
9. Bolsunovsky A. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain / A. Bolsunovsky, M. Melgunov, A. Chuguevskii [et al.] // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — № 11132. — P. 1–10.
10. Gritchenko Z.G. Hot Particles of the Second Kind in Flood Lands of the Yenisei River / Z.G. Gritchenko, Yu.V. Kuznetsov, V.K. Legin [et al.] // Radiochemistry. — 2001. — Vol. 43. — № 6. — P. 639–642.
11. Foucher A. 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. Chaboche, P. Sabatier [et al.] // Earth System Science Data Discussions. — 2021. — P. 1–61.
12. Vakhrushev V.I. Ispolzovanie radioizotopnikh metodov dlya khronologii postupleniya Cs v donnie otlozheniya reki Yenisei [Using radioisotope methods to date ^{137}Cs inflow to bottom sediments of the Yenisei river] / V.I. Vakhrushev, A.Ya. Bolsunovskii, D.V. Dementev // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle [Bulletin of Udmurt University Series Biology Earth Sciences]. — 2023. — Vol. 33. — № 2. — P. 178–190. [in Russian]
13. Bolsunovsky A.Ya. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River / A.Ya. Bolsunovsky, V.I. Vakhrushev, D.V. Dementyev // Limnology and Freshwater Biology. — 2024. — № 4. — P. 274–279.