

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 631.43.539.16

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РАДИОЦЕЗИЯ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ (ЧЕРНОБЫЛЬ И ФУКУСИМА)

А.В. Коноплев¹, М.М. Иванов², М.А. Комиссаров³, В.Н. Голосов⁴, Н.В. Кузьменкова⁵

¹ Институт радиоактивности окружающей среды Фукусимского университета, Япония
^{1, 2, 4, 5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
лаборатория геохимии природных вод

^{2, 4, 5} Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии

³ Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, лаборатория почвоведения

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра радиохимии

¹ Заместитель директора, д-р биол. наук; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

² Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ivanovm@bk.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: mkomissarov@list.ru

⁴ Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: gollossov@gmail.com

⁵ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

Исследование посвящено реконструкции долговременной динамики концентрации ^{137}Cs в водных объектах, загрязненных в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». Установлено, что вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях глубоководных участков может служить основой для восстановления динамики концентрации радионуклида на взвеси и в растворе. Для реконструкции используются колонки донных отложений водохранилищ и экспериментальные значения коэффициента распределения K_d . Метод применим при отсутствии перемешивания осаждаемой взвеси с нижележащими слоями и при значении K_d существенно выше 10^4 л/кг. Исследования в зонах загрязнения Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» показали возможность успешной реконструкции долговременных изменений концентрации ^{137}Cs для рек, озер и прудов. Полученные данные представляют первую оценку временного хода удельной активности ^{137}Cs на взвеси в водных объектах зоны Чернобыльской АЭС, что важно для понимания его поведения в системе «почва–вода» и миграции по пищевым цепям. Зависимости концентраций ^{137}Cs от времени описываются эмпирической двухэкспоненциальной и/или полуэмпирической диффузионной моделью, применимой для прогнозных оценок долговременной динамики радиоактивного загрязнения водных объектов после ядерных аварий. Результаты исследования подтверждаются данными мониторинга для тестовых водных объектов и удовлетворительным согласованием с восстановленными значениями концентраций ^{137}Cs . Полученная информация имеет большое значение для оценки экологических последствий ядерных аварий и разработки стратегий управления загрязненными территориями. Методология, представленная в исследовании, может быть адаптирована для изучения поведения других радионуклидов в водных экосистемах, способствуя улучшению прогнозирования и управления радиоэкологическими рисками в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: миграция радионуклидов, раствор, взвесь, диффузия, моделирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.1

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, 38 лет после аварии на Чернобыльской АЭС (далее – ЧАЭС) и 13 лет после аварии на АЭС «Фукусима-1» (далее – АЭС Ф-1), особый интерес представляет долговременная ди-

намика долгоживущих радионуклидов в водных объектах загрязненных территорий. Это связано как с важностью оценки доз для водной биоты, так и с тем, что в долговременной перспективе именно вода является основным путем выноса радионукли-

дов с загрязненных территорий на дальние расстояния [IAEA, 2006; Igarashi et al., 2022; Taniguchi et al., 2019]. Данные по долговременному изменению содержания радионуклидов в растворе и на взвеси природных вод, подверженных воздействию, доступны далеко не всегда. В особенности, для водных объектов зоны ЧАЭС это касается концентрации радионуклидов на взвеси, поскольку основное внимание систем мониторинга было сосредоточено на содержании радионуклидов в растворе, определяющем их подвижность и биологическую доступность [Konoplev et al., 2021].

Восстановить долговременные изменения ^{137}Cs аварийного происхождения в природных водах можно с помощью анализа его вертикального распределения в донных отложениях в случае озер, прудов и водохранилищ в случае рек. Целью настоящего аналитического обзора является обобщение результатов выполненных в этой области в последние годы исследований и формулировка общих принципов метода, его возможностей и ограничений.

Эмпирическое и полуэмпирическое моделирование долговременной динамики загрязнения водных объектов радиоцезием. После аварии на ЧАЭС временной ход концентрации растворенного ^{137}Cs в загрязненных водных объектах зачастую описывали простой эмпирической моделью в виде суммы нескольких экспоненциальных функций [Hilton, 1997; Monte, 1997; Chernobyl..., 2005]:

$$c(t) = \sum_i C_i^0 e^{-(\lambda + k_i)t}, \quad (1)$$

где $c(t)$ – текущая концентрация ^{137}Cs (на взвеси в Бк/кг, а в растворе в Бк/м³ или Бк/л); λ – константа скорости радиоактивного распада ^{137}Cs , равная 0,023 год⁻¹; k_i – подгоночные значения констант скорости первого порядка i -го процесса (год⁻¹); C_i^0 – подгоночные параметры, t – время. После аварии на АЭС Ф-1 этот подход был также использован многими исследователями для описания динамики как растворенного ^{137}Cs , так и ^{137}Cs на взвеси [Onda et al., 2020; Nakanishi and Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020; Taniguchi et al., 2019; Ueda et al., 2021].

В последние годы достаточно широко используется альтернативный способ описания и прогнозирования долговременной динамики радиоцезия в водных объектах, а именно полуэмпирическая диффузионная модель [Коноплев и др., 2021]. Эта модель основана на предположении, что основным источником взвешенного материала в поверхностном стоке является верхний слой почвы водосбора, и вертикальное распределение радиоцезия в нем описывается обыкновенным диффузионным уравнением. В этом случае динамика изменения концентрации ^{137}Cs в верхнем слое почвы, а следова-

тельно, и на взвеси в поверхностном стоке и затем в реке может быть приближенно описана уравнением [Коноплев и др., 2021]:

$$C_p(t) = \frac{\sigma_0}{p\sqrt{\pi D_{eff}t}} e^{-\lambda t} = C_p^0 \frac{e^{-\lambda t}}{\sqrt{t}}, \quad (2)$$

где σ_0 – начальный средний запас ^{137}Cs на водосборе; D_{eff} – среднее по водосбору значение эффективного коэффициента дисперсии; λ – константа скорости радиоактивного распада ^{137}Cs ; p – средняя объемная плотность верхнего слоя почв на водосборе, t – время.

Используя коэффициент распределения, в системе «взвесь–раствор» изменение во времени концентрации ^{137}Cs в растворе может быть приближенно описано уравнением [Коноплев и др., 2021]:

$$C_d(t) = \frac{\sigma_0}{pK_d\sqrt{\pi D_{eff}t}} e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Достоинством этой модели является то, что одно и то же несложное уравнение может быть использовано для описания динамики ^{137}Cs в реках для широкого диапазона времени после аварии за исключением относительно короткого начального периода, когда загрязнение определяется прямыми выпадениями на водную поверхность. При этом используются всего два параметра – D_{eff} и K_d , имеющие ясный физический смысл.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы формирования уровней загрязнения природных вод после ядерной аварии существенно отличаются для различных фаз после аварии. В начальный период после аварии основным путем радиоактивного загрязнения водоемов являются атмосферные выпадения на поверхность воды [Chernobyl..., 2005; Smith et al., 2005]. Эта фаза после аварии продолжается, как правило, от нескольких недель/месяцев до года. По ее завершении основным долговременным источником поступления радионуклидов в водные объекты является поверхностный сток с их водосборов [Smith et al., 2005]. Основным источником радионуклидов как в растворе, так и на взвешенных частицах в поверхностном стоке является верхний слой почвы водосбора. Многочисленные исследования смыва загрязняющих веществ различной природы показали, что эффективная толщина слоя почвы, вступающего во взаимодействие с поверхностным стоком, составляет несколько миллиметров (до 1 см) [Donigian et al., 1977; CREAMS..., 1980; Ahuja et al., 1981]. Концентрация радионуклида в верхнем «контактном» слое почвы уменьшается со временем вследствие его вертикальной миграции в более глубокие слои. Соответственно, уменьшается концентрация радионуклида на взвеси и, как следствие, в растворе

в поверхностном стоке и затем в водных объектах [Konoplev et al., 2021]. Взвесь поверхностного стока при его поступлении в озера или пруды осаждается на их дне в отложениях [Konoplev et al., 2022a], а в случае рек накапливается в донных отложениях водохранилищ [Ivanov et al., 2021; Konoplev et al., 2022b]. Таким образом, формируется вертикальный профиль наносов и связанного с ними радионуклида в донных отложениях.

Максимальные концентрации радионуклида в профиле донных отложений соответствуют начальному периоду после аварии. В тех случаях, когда перемешивание наносов в профиле донных отложений пренебрежимо мало, а радионуклид прочно связан с наносами, т. е. его коэффициент распределения в системе «взвесь–вода» (отношение концентрации радионуклида на взвеси к его концентрации в растворе) $K_d > 10^4$ л/кг [IAEA, 2010], максимум в вертикальном распределении радионуклида должен быть ярковыраженным, т. е. «острым» и без размытого фронта. Концентрация радионуклида в наносах выше максимума должна постепенно падать вплоть до поверхностного слоя отложений и соответствовать уменьшению со временем его содержания в верхнем слое почвы на водосборе водоема. Тогда положение максимума служит временной меткой аварии, а по профилю над пиком можно восстановить временной ход концентрации радионуклида на взвеси в водоеме, располагая данными по динамике среднегодовой скорости осадконакопления или, в первом приближении, предполагая ее постоянной на протяжении периода после аварии [Konoplev et al., 2022a, 2022b]. Не каждый профиль донных отложений может быть использован для реконструкции изменения концентраций радиоцезия в водном объекте. Кроме того, что колонка донных отложений должна отбираться в зоне аккумуляции наносов, необходимо, чтобы область отбора донных отложений не подвергалась антропогенному вмешательству и биотурбации биотой водного объекта. Опыт показывает, что в этом отношении даже колонки, отобранные вблизи друг от друга, могут существенно отличаться по перечисленным условиям [Konoplev et al., 2022b].

Коэффициент распределения K_d чернобыльского радиоцезия, как правило, лежит в пределах 10^4 – 10^5 л/кг, в то время как для фукусимского радиоцезия он как минимум на порядок больше – 10^5 – 10^6 л/кг. Таким образом, условие прочной связи радиоцезия с наносами выполняется для водных объектов как Чернобыльской [Ivanov et al., 2021], так и Фукусимской зон радиоактивного загрязнения. Необходимо также принимать во внимание, что в случае аварии на ЧАЭС радионуклиды были выброшены в атмосферу в значительной мере в составе топливных частиц,

нерастворимых в воде (в среднем порядка 75% для радиоцезия) [Бобовникова и др., 1991]. При этом формы выпадений радиоцезия существенным образом зависели от расстояния до ЧАЭС, поскольку топливные частицы выпадали в основном вблизи от аварийного реактора, а на большие расстояния переносился радиоцезий в составе конденсационных мелких частиц. С течением времени в почве происходит постепенное выщелачивание радионуклидов из топливных частиц в результате их разрушения и окисления кислородом воздуха. Однако в донных отложениях в отсутствие кислорода топливные частицы значительно более устойчивы и радионуклиды там выщелачиваются медленнее (примерно на порядок величины), чем в почве [Bulgakov et al., 2009]. Это еще более усиливает связанность радионуклидов с наносами особенно в зоне отчуждения ЧАЭС [Konoplev et al., 2022a] и является причиной того, что средние значения K_d для водных объектов ближней зоны были выше значений для водоемов на удаленных участках следа, например в Тульской области.

При выполнении перечисленных условий естественно предположить, что концентрация радиоцезия в каждом индивидуальном слое колонки донных отложений, скорректированная с учетом радиоактивного распада, соответствует его концентрации на взвеси в период времени, в течение которого этот слой формируется путем ее осаждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановление долговременного изменения концентрации ^{137}Cs аварийного происхождения в реках на основе его вертикального распределения в донных отложениях их водохранилищ. ^{137}Cs в реке, загрязненной в результате аварии на ЧАЭС в 1986 г. В первые годы после аварии на ЧАЭС важнейшие водные объекты, подвергшиеся радиоактивному загрязнению, контролировались системой мониторинга Госкомгидромета СССР на содержание радионуклидов [Вакуловский и др., 1991; Vakulovsky et al., 1994]. Однако, после 1991 г. мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод в районах России, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, не осуществлялся. Между тем потребность в таких данных для достоверной оценки доз населения и биоты осталась. Возможность реконструкции концентраций ^{137}Cs в реках на основе его вертикальных профилей в донных отложениях была впервые изучена и опробована в работах [Konoplev et al., 2019; Ivanov et al., 2021] для р. Упа, протекающей через «Тульское пятно» Чернобыльского следа и расположенного на ней Щекинского водохранилища (рис. 1). На рис. 2А приведено вертикальное

распределение ^{137}Cs в одной из колонок донных отложений Щекинского водохранилища, отобранных в феврале 2018 г. [Ivanov et al., 2021].

Средняя скорость осадконакопления за 32 года после аварии на ЧАЭС составляла около 5 см/год (см. рис. 2А). На рис. 2 приведены также результаты восстановления удельной активности ^{137}Cs на взвеси (Б) и удельной активности ^{137}Cs в растворе (В) в р. Упе по его вертикальному профилю в донных

отложениях Щекинского водохранилища на основе данных [Ivanov et al., 2021]. Необходимо отметить, что, поскольку удельная активность ^{137}Cs на взвеси вообще не измерялась системой мониторинга, приведенные впервые оценки представляют интерес как с точки зрения радиационной безопасности в регионе, так и с точки зрения изучения геоморфологических процессов на водосборе р. Упы [Golosov, Ivanov, 2020].

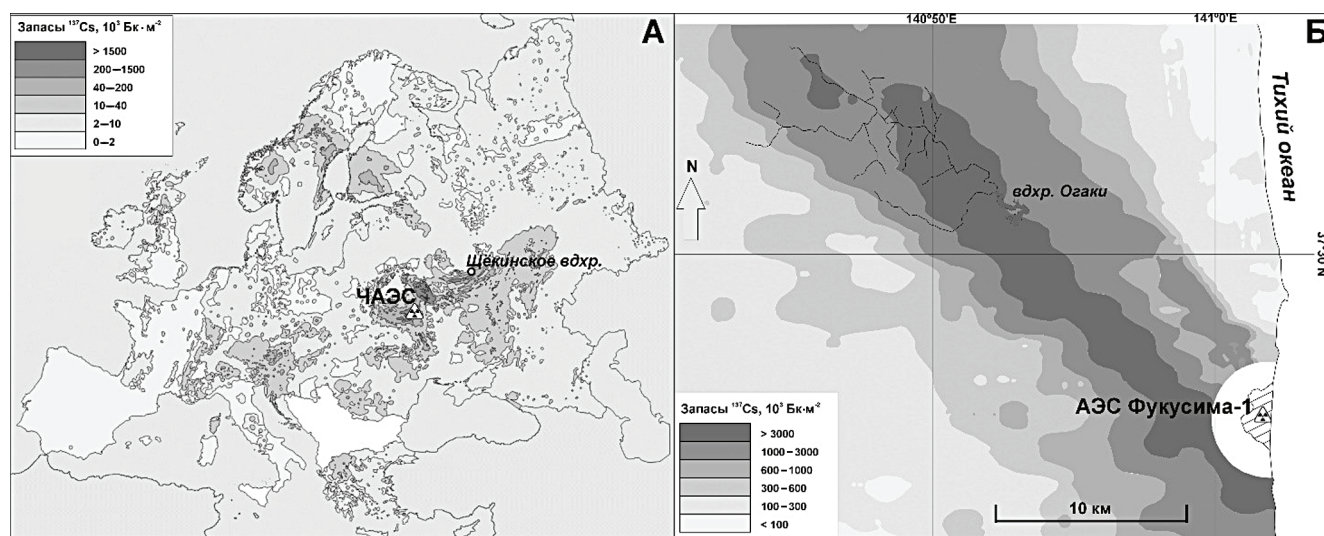


Рис. 1. Расположение объектов исследования: А – на европейской территории России; Б – на острове Хонсю в Японии

Fig. 1. Location of studied objects: A – in the European territory of Russia; Б – on the Honshu Island in Japan

Таким образом, в работах [Konoplev et al., 2019; Ivanov et al., 2021] впервые была предпринята попытка использовать вертикальные профили ^{137}Cs в донных отложениях водохранилища не только для изучения процессов осадконакопления на дне водоемов и стока наносов с их водосборов, но и для реконструкции долговременной динамики радиоактивного загрязнения рек после ядерных аварий. Точность метода может быть улучшена с помощью аппроксимации пика ^{137}Cs в профиле донных отложений функцией Гаусса, взяв за основу нижнее плечо его распределения, т. е. часть профиля, расположенного ниже максимума. В этом случае реальные концентрации ^{137}Cs в первые годы после аварии будут равны скорректированным на распад его концентрации в соответствующих слоях профиля за вычетом «хвостовых» значений концентраций ^{137}Cs распределения пика по Гауссу [Ivanov et al., 2021]. Улучшение точности метода возможно также в том случае, если есть дополнительная информация о скорости осадконакопления в водохранилище. Например, это возможно осуществить при сочетании метода с хронологией осадконакопления с использованием ^{210}Pb [Appleby et al., 2003; Putyrskaya

et al., 2020]. В свою очередь многолетние изменения скорости осадконакопления можно параметризовать через долговременные изменения годовых осадков [Konoplev et al., 2022a, 2022b].

^{137}Cs в реке, загрязненной в результате аварии на АЭС Ф-1 в 2011 г. Впоследствии предложенный метод реконструкции временного хода радиоактивного загрязнения реки по вертикальному распределению ^{137}Cs в донных отложениях ее водохранилища был использован для зоны аварии на АЭС Ф-1. Также как при аварии на ЧАЭС в 1986 г., в случае аварии на АЭС Ф-1 в 2011 г. произошло загрязнение ^{137}Cs бассейнов речных систем Абукума, Мано, Нитта, Ота, Укедо, Маеда, Кума и др. [Igarashi et al., 2022; Onda et al., 2020; Taniguchi et al., 2019], которые впадают в Тихий океан, вынося туда радиоцезий как в растворе, так и на взвеси.

Климат и географические условия префектуры Фукусима в Японии и зоны аварии на ЧАЭС существенно различаются. Так, ландшафты на водосборах Чернобыльской зоны равнинные и характеризуются небольшими уклонами, в то время как ландшафты на водосборах Фукусимы являются в основном горными с большими уклонами, при этом

также отмечаются и геохимические особенности почвенного покрова. Среднегодовые суммы осадков также сильно различаются: для Чернобыльской зоны она составляет порядка 600 мм, а для зоны АЭС Ф-1 – 1200–1800 мм, т. е. в 2–3 раза больше [Коноплев и др., 2021; Onda et al., 2020].

Помимо геоклиматических и геохимических различий районов радиоактивного загрязнения Фукусимы и Чернобыля отличаются также начальные формы нахождения радионуклидов. В случае аварии на ЧАЭС радиоцезий был выброшен в атмо-

сферу, в значительной мере (до 75%) в составе топливных частиц, нерастворимых в воде [Бобовникова и др., 1991]. При этом формы выпадений радиоцезия в результате аварии на ЧАЭС существенным образом зависели от расстояния до ЧАЭС, поскольку топливные частицы выпадали, в основном, вблизи от аварийного реактора, а на большие расстояния переносился радиоцезий в составе конденсационных мелких частиц. С течением времени происходит постепенное выщелачивание радиоцезия из топливных частиц в результате их разрушения и окисления.

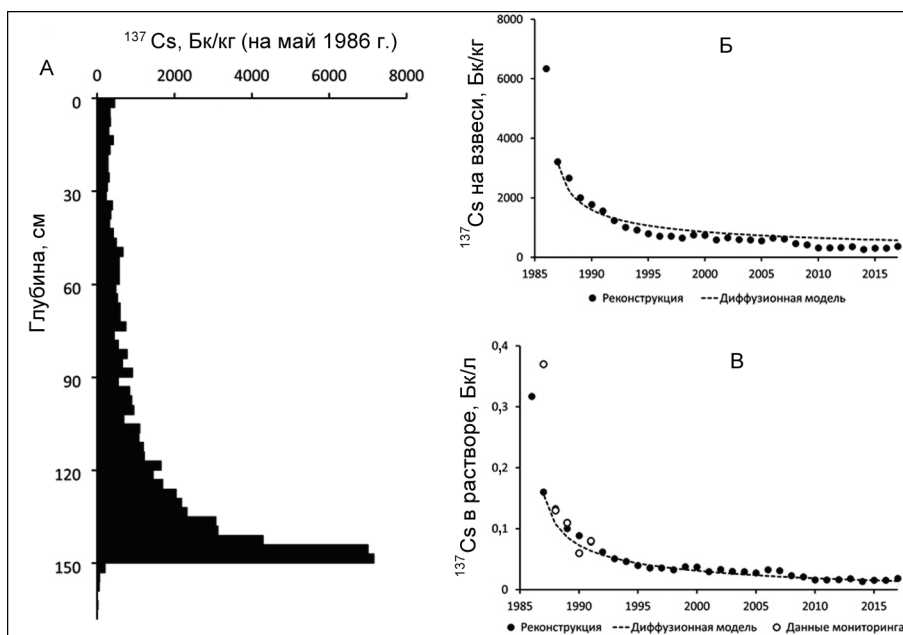


Рис. 2. Реконструкция ^{137}Cs в р. Упе после аварии на ЧАЭС и сравнение с результатами расчетов по диффузионной модели [Коноплев и др., 2021] при коэффициенте распределения ^{137}Cs в реках этого региона $2 \cdot 10^4$ л/кг и данными мониторинга ^{137}Cs в р. Упе в первые годы после аварии на ЧАЭС (1986–1991) [Вакуловский и др., 1991; Vakulovsky et al., 1994]: А – восстановление долговременной динамики удельной активности ^{137}Cs в р. Упе (Тульская обл.) в течение 32 лет после аварии на ЧАЭС на основе его профиля в колонке донных отложений Щекинского вдхр., отобранной в феврале 2018 г., с запасом ^{137}Cs 1260 кБк/м² на основе данных [Ivanov et al., 2021]; реконструированные зависимости от времени после аварии на ЧАЭС концентраций ^{137}Cs в р. Упе на входе в водохранилище: Б – на взвеси; В – в растворе

Fig. 2. Reconstruction of ^{137}Cs in the Upa River after the Chernobyl accident and comparison with the results of calculations using the diffusion model [Konoplev et al., 2021] with a ^{137}Cs distribution coefficient in the rivers of this region of $2 \cdot 10^4$ l/kg and ^{137}Cs monitoring data in the Upa River in the first years after the Chernobyl accident (1986–1991) [Vakulovsky et al., 1991; Vakulovsky et al., 1994]: А – reconstruction of the long-term dynamics of the specific activity of ^{137}Cs in the Upa River. Upa (Tula region) for 32 years after the Chernobyl accident based on its profile in the bottom sediment core of the Shchekino reservoir, collected in February 2018, with a ^{137}Cs reserve of 1260 kBq/m² based on data from [Ivanov et al., 2021]; reconstructed dependencies on time after the Chernobyl accident of ^{137}Cs concentrations in the Upa river at the entrance to the reservoir: Б – in suspension; В – in solution

В первое время после аварии на АЭС Ф-1 полагали, что радиоцезий в выпадениях находился в основном в виде сульфатов в подвижном состоянии, т. е. в растворимых и обменных формах [Kaneyasu et al., 2012]. Однако позднее были получены данные о том, что значительная доля радиоцезия выпала в составе стекловидных горячих частиц, нерастворимых в воде [Ikehara et al., 2018].

Выщелачивание радиоцезия из этих частиц происходит в окружающей среде значительно медленнее, чем из топливных частиц чернобыльского происхождения [Okumura et al., 2019]. Таким образом, различие начальных форм радиоцезия в выпадениях в Чернобыле и Фукусиме, а кроме того, различие в содержании глинистых минералов в почве и других ее свойств (водопроницае-

мости, кислотности и плотности), определяющих процессы его селективной сорбции и фиксации почвенными частицами, могут оказывать существенное влияние на транспорт наносов и радиоцезия с загрязненных водосборов и их накопления в донных отложениях. Поэтому важно было проверить применимость метода реконструкции временного хода загрязнения рек радиоцезием в зоне аварии АЭС Ф-1 в существенно отличающихся геоклиматических и геохимических условиях и специфических форм нахождения радиоцезия в системе «почва–вода».

На рис. 3А приведен один из профилей ^{137}Cs в донных отложениях водохранилища Огаки, расположенного на одной из наиболее загрязненных рек зоны аварии АЭС Ф-1 Укедо, на октябрь 2019 г. [Konoplev et al., 2022b]. Профиль соответствует критериям реконструкции загрязнения реки ^{137}Cs . Рис. 3Б и 3В иллюстрируют результаты реконструкции временного хода концентраций ^{137}Cs на взвеси и в растворе р. Укедо на входе в водохранилище Огаки, соответственно, и их сравнение с данными мониторинга [Nakanishi, Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020].

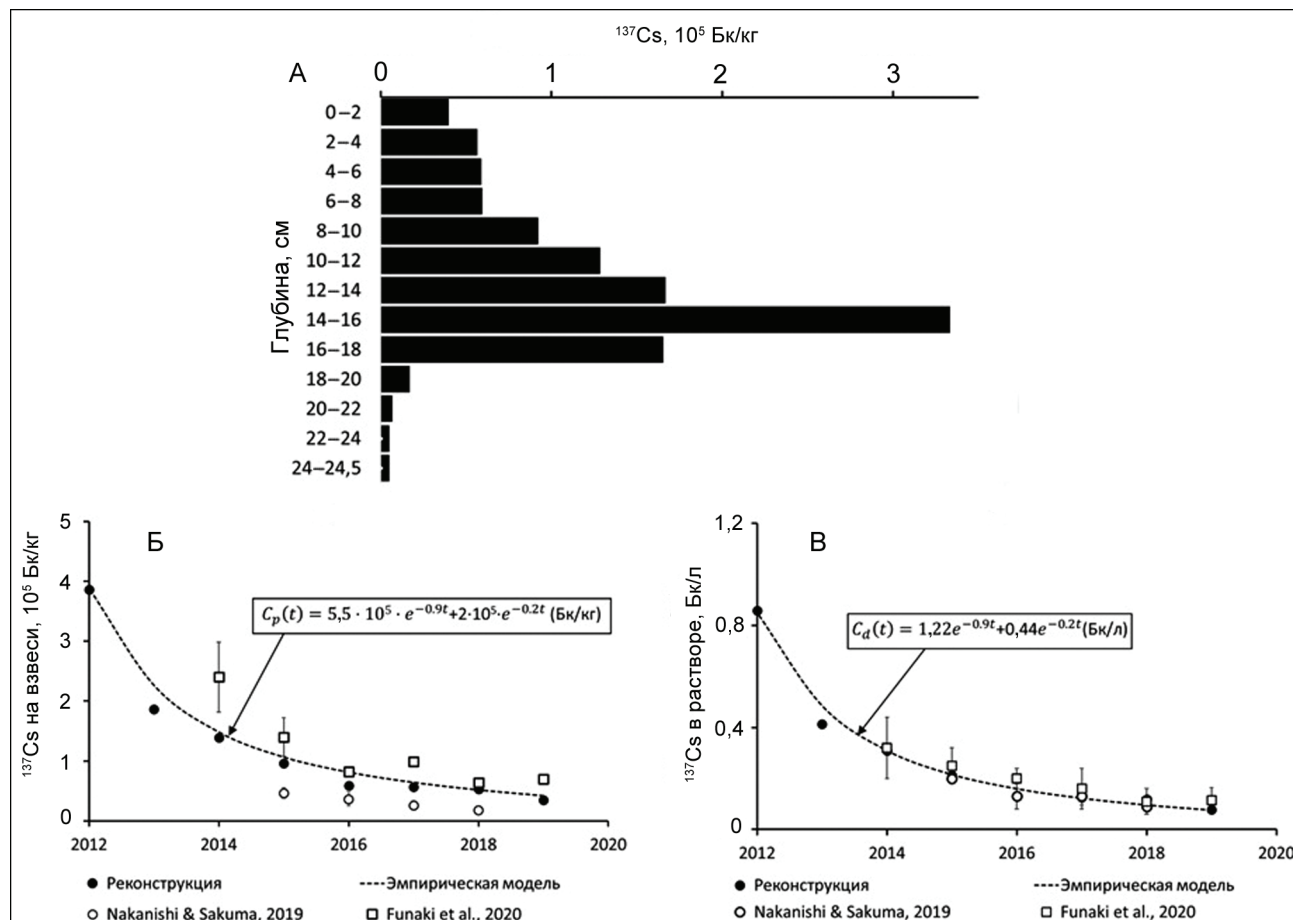


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs в одной из колонок донных отложений водохранилища Огаки на р. Укедо в зоне аварии АЭС Ф-1, отобранных в октябре 2019 г. (А), и восстановленные на его основе зависимости от времени концентраций ^{137}Cs на взвеси (Б) и в растворе (В) р. Укедо на входе в водохранилище. Для сравнения приведены данные мониторинга [Nakanishi, Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020] и результаты расчетов по эмпирической двухэкспоненциальной модели по уравнению (1)

Fig. 3. Vertical distribution of ^{137}Cs in one of the bottom sediment cores from the Ogaki Reservoir on the Ukedo River in the Fukushima Daiichi NPP accident zone, sampled in October 2019 (A), and the reconstructed time-dependent concentrations of ^{137}Cs in suspended matter (Б) and in solution (В) of the Ukedo River at the reservoir inlet. For comparison, monitoring data [Nakanishi and Sakuma, 2019; Funaki et al., 2020] and calculation results using the empirical two-exponential model according to equation (1) are presented

Концентрации растворенного ^{137}Cs были получены с использованием экспериментального значения коэффициента распределения ^{137}Cs в р. Укедо, равного $4,5 \cdot 10^5 \text{ л/кг}$ [Funaki et al., 2020]. Там же для

сравнения приведены результаты расчетов по эмпирической двухэкспоненциальной модели в соответствии с уравнением (1). Видно, что восстановленные концентрации удовлетворительно согласуются

с данными мониторинга при том, что и те, и другие описываются двухэкспоненциальной эмпирической моделью. В то же время диффузионная модель прогнозирует более медленное снижение концентраций ^{137}Cs как на взвеси, так и в растворе. По всей видимости, это может быть связано с тем, что модель предполагает в качестве причины уменьшения содержания ^{137}Cs в верхнем слое естественные процессы его вертикальной миграции в почве [Коноплев и др., 2021], в то время как в зоне аварии АЭС Ф-1, и в том числе на водосборе р. Укедо, японское правительство осуществляло обширную программу ремедиации и дезактивации территорий. Это привело к эффективному искусственному снижению содержания ^{137}Cs в верхнем слое почвы на водосборе и, как следствие, снижению его концентраций в поверхностном стоке [Hardie, McKinley, 2014; Howard et al., 2016; Onda et al., 2020; Feng et al., 2022].

Таким образом, тестирование метода реконструкции долговременной динамики загрязнения реки ^{137}Cs после ядерной аварии на основе его вертикального распределения в донных отложениях глубоководных зон накопления наносов водохранилища показывает его применимость в будущем для целей достоверной оценки доз населения и биоты на загрязненных территориях [Konoplev et al., 2022b].

Восстановление долговременного изменения концентрации ^{137}Cs аварийного происхождения в озерах и прудах на основе его вертикального распределения в донных отложениях. Радиоэкологические исследования на Восточно-Уральском радиоактивном следе [Алексахин и др., 2001], территориях, загрязненных в результате ЧАЭС [Войцехович и др., 2016; Радионуклиды..., 2001; Bulgakov et al., 2002; Bulgakov et al., 2009; Ganzha et al., 2014], показали, что загрязнение радиоцезием наиболее устойчиво в замкнутых и слабопроточных озерах и водоемах, которые оказываются в результате наиболее чувствительными экосистемами по отношению к радиоактивному загрязнению. Исследования на загрязненных территориях в результате аварии на АЭС Ф-1 также указывают на уязвимость малых водоемов – озер и прудов – от радиоактивного загрязнения [Konoplev et al., 2021]. Только на загрязненных территориях Фукусимской префектуры имеется более трех тысяч мелиоративных прудов, создававшихся на протяжении последних столетий в целях подачи воды на рисовые чеки. Однако, ввиду их большого числа на загрязненных территориях долговременный мониторинг радиоактивного загрязнения каждого из них практически неосуществим. Данные по долговременному изменению содержания радионуклидов в растворе и на взвеси этих водоемов

доступны далеко не всегда. В особенности, для водных объектов зоны ЧАЭС это касается концентрации радионуклидов на взвеси, поскольку основное внимание систем мониторинга было сосредоточено на содержании радионуклидов в растворе, определяющем их мобильность и биологическую доступность. Вместе с тем для многих из этих водоемов взвешенный материал поступает с прилегающих водосборных территорий, и поэтому принцип метода реконструкции концентраций ^{137}Cs может быть использован и для этих водных объектов.

В работе [Konoplev et al., 2022a] метод реконструкции долговременной динамики концентрации ^{137}Cs на основе его профилей в донных отложениях использовался и показал свою применимость для водных объектов ближней зоны ЧАЭС – озер Азбучин и Глубокое и водоема-охладителя (ВО) ЧАЭС. На рис. 4 приведены профили ^{137}Cs в донных отложениях этих водоемов (А) и реконструированный временной ход его концентраций на взвеси в сравнении с расчетами по диффузионной модели (Б). Значимость данной реконструкции состоит в том, что это фактически первая и единственная оценка долговременного временного хода удельной активности ^{137}Cs на взвеси в сильно загрязненных водоемах зоны отчуждения ЧАЭС. Информация о содержании ^{137}Cs на взвеси представляет несомненный интерес с точки зрения понимания основных закономерностей не только его поведения в системе «почва–вода», но и его перехода в биоту и миграции по пищевым цепям.

На рис. 5 представлен временной ход растворенного ^{137}Cs в водоемах ближней зоны ЧАЭС, реконструированный из профиля донных отложений, отобранных в 2018 г. в сравнении с доступными данными мониторинга [Войцехович и др., 2016] и результатами расчетов по диффузионной модели. Видно, что восстановленная динамика ^{137}Cs , как на взвеси, так и в растворе, удовлетворительно соответствует данным мониторинга и описывается использованной полуэмпирической диффузионной моделью.

ВЫВОДЫ

Вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях глубоководных участков загрязненных водных объектов может служить основой для восстановления долговременной динамики концентрации этого радионуклида на взвеси. Для реконструкции временного хода концентрации ^{137}Cs в реках могут быть использованы колонки донных отложений расположенных на них водохранилищ. Концентрации растворенного ^{137}Cs могут быть восстановлены, используя эксперимен-

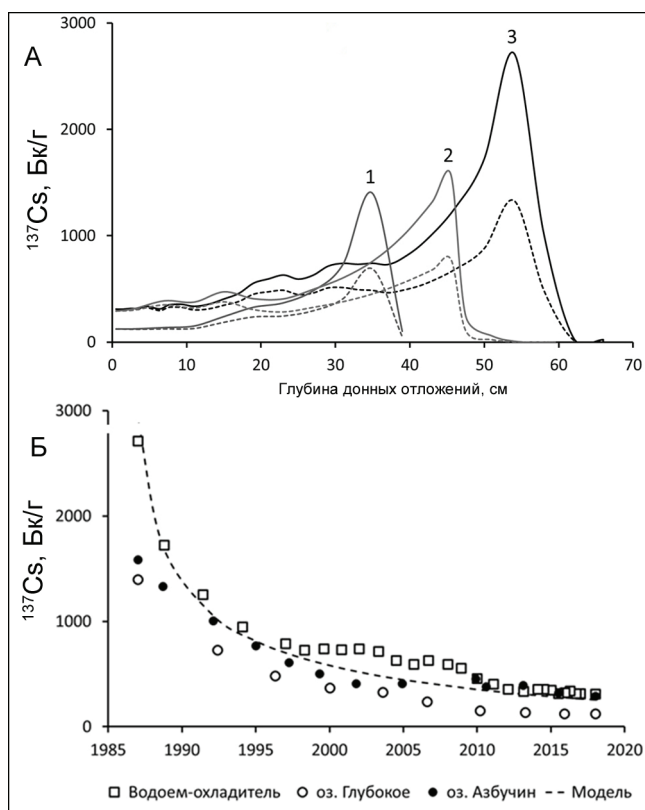


Рис. 4. Вертикальное распределение ^{137}Cs в донных отложениях в водоемах непосредственной близости от ЧАЭС: А – вертикальные распределения ^{137}Cs в донных отложениях оз. Глубокое (1), оз. Азбучин (2) и водоема-охладителя ЧАЭС (3). Пунктирные линии – удельные активности на дату отбора в 2018 г.; сплошные линии – профили удельных активностей скорректированные на расчетную дату осаждения взвеси; Б – реконструированный временной ход удельной активности ^{137}Cs на взвеси в водных объектах ближней зоны ЧАЭС и ее расчет по диффузионной модели по уравнению (2) при $c_p^0 = 3000 \text{ Бк} \cdot (\text{год})^{1/2} / \text{г}$. на основе данных работы [Konoplev et al., 2022a]

Fig. 4. Vertical distribution of ^{137}Cs in bottom sediments in reservoirs in the immediate vicinity of the Chernobyl nuclear power plant: А – vertical distributions of ^{137}Cs in bottom sediments of Lake Glubokoye (1), Lake Azbuchin (2), and the Chernobyl NPP cooling pond (3). Dashed lines represent specific activities on the sampling date in 2018, solid lines represent specific activity profiles adjusted to the calculated date of suspended matter deposition; Б – reconstructed temporal course of ^{137}Cs specific activity in suspended matter in water bodies of the Chernobyl NPP near zone and its calculation using the diffusion model according to equation (2) with $c_p^0 = 3000 \text{ Bq} \cdot (\text{year})^{1/2} / \text{g}$. Based on data from [Konoplev et al., 2022a]

тальные значения коэффициента распределения K_d водного объекта.

Реконструкция временного хода концентраций ^{137}Cs возможна в тех случаях, когда заметного перемешивания осаждаемой взвеси с нижележащими слоями отложений не происходит. Коэффициент распределения радионуклида должен иметь значение существенно выше 10^4 л/кг с тем, чтобы не происходило диффузионного размывания пика ^{137}Cs .

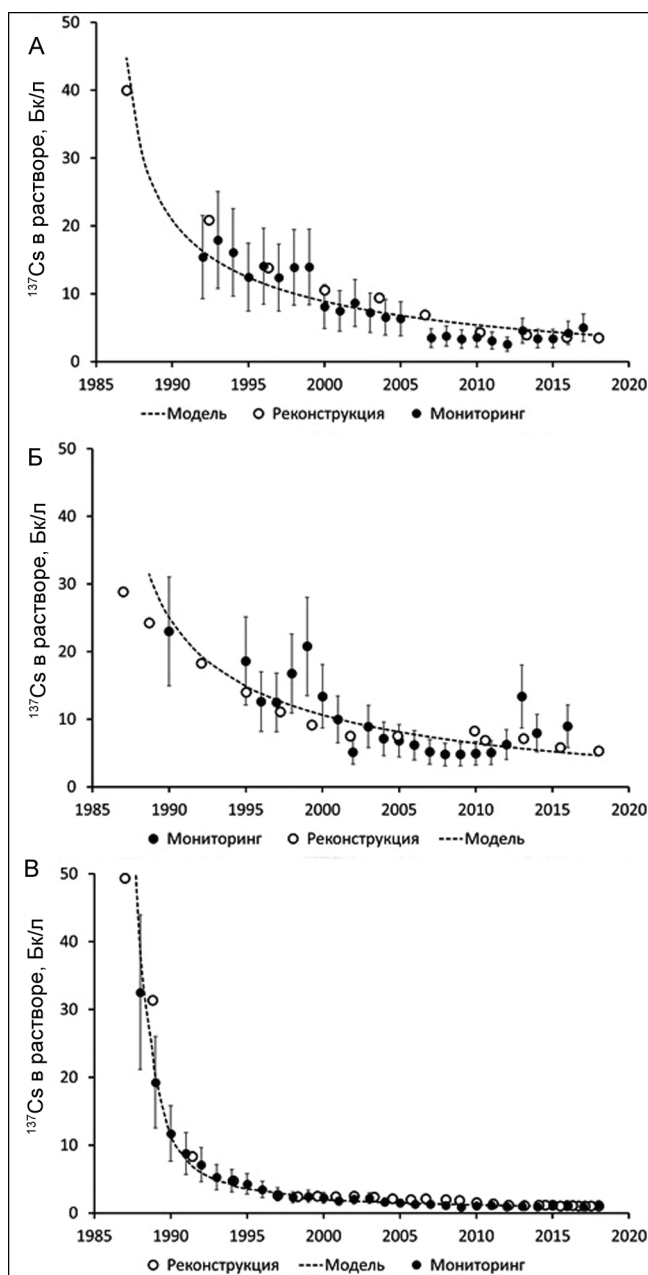


Рис. 5. Временной ход среднегодовых концентраций растворенного ^{137}Cs в трех водоемах ближней зоны ЧАЭС, реконструированный из профилей донных отложений, отобранных в 2018 г., в сравнении с доступными данными мониторинга и результатами расчетов по диффузионной модели: А – оз. Глубокое; Б – оз. Азбучин; В – водоем-охладитель ЧАЭС

Fig. 5. Temporal course of annual average concentrations of dissolved ^{137}Cs in three water bodies of the Chernobyl NPP near zone, reconstructed from bottom sediment profiles sampled in 2018, compared with available monitoring data and calculation results using the diffusion model: А – Lake Glubokoye; Б – Lake Azbuchin; В – Chernobyl NPP cooling pond

Исследования в этой области как в районах, загрязненных после аварии на ЧАЭС, так и в зоне загрязнения после аварии на АЭС Ф-1 показали, что при выполнении этих условий долговременные

изменения концентрации ^{137}Cs как на взвеси, так и в растворе после ядерной аварии могут быть с успехом реконструированы для рек, озер и прудов. Доступные данные мониторинга для тестовых водных объектов и их динамика удовлетворительно согласуются с восстановленными значениями концентраций ^{137}Cs .

Полученные данные представляют собой первую и единственную пока оценку временного хода

удельной активности ^{137}Cs на взвеси в водных объектах зоны загрязнения ЧАЭС. Рассчитанные на основе вертикальных профилей ^{137}Cs в донных отложениях зависимости от времени концентраций ^{137}Cs на взвеси и в растворе водных объектов как Чернобыльской, так и Фукусимской зон удовлетворительно описываются эмпирической двухэкспоненциальной и/или полуэмпирической диффузионной моделью.

Благодарности. Настоящая работа была выполнена в рамках мегагранта Минобрнауки номер 075-15-2024-614 и проекта Межуниверситетского центра радиоактивности окружающей среды Японии ERAN (Университет Цукубы) I-24-16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные ядерные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 572 с.
- Бобовникова Ц.И., Махонько К.П., Сиверина А.А. и др. Физико-химические формы радионуклидов в атмосферных выпадениях после аварии на Чернобыльской АЭС и их трансформация в почве // Атомная энергия. 1991. Т. 71. № 5. С. 449–454.
- Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. и др. Загрязнение цезием-137 и стронцием-90 водных объектов на территории, подвергшейся воздействию выбросов аварийного блока ЧАЭС // Метеорология и гидрология. 1991. № 7. С. 64–73.
- Войцехович О.В., Канивец В.В., Киреев С.И. и др. Радиоактивное загрязнение поверхностных вод // 30 лет Чернобыльской катастрофы: сб. информационно-аналитических материалов. Киев, 2016. С. 129–139. (На украинском языке)
- Коноплев А.В., Канивец В.И., Жукова О.М. и др. Полуэмпирическая диффузионная модель смыва радионуклидов с загрязненных водосборов и ее проверка на основе данных мониторинга рек Фукусимы и Чернобыля // Геохимия. 2021. Т. 66. № 6. С. 1–12.
- Радионуклиды в водных экосистемах Украины. Влияние радионуклидного загрязнения на гидробионты зоны отчуждения / под ред. М.И. Кузьменко, Киев: Чернобыльинтеринформ, 2001. 318 с. (На украинском языке)
- Ahuja L.R., Sharpley A.N., Yamamoto M. et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P , *Water Resources Research*, 1981, vol. 17, p. 969–974.
- Appleby P.G., Haworth E.Y., Michel H. et al. The transport and mass balance of fallout radionuclides in Blelham Tarn, Cumbria (UK), *Journal of Paleolimnology*, 2003, vol. 29, p. 459–473.
- Bulgakov A., Konoplev A., Smith J. et al. Fuel particles in the Chernobyl cooling pond: current state and prediction for remediation options, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, vol. 100, no. 4, p. 329–332.
- Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Smith J.T. et al. Modelling the long-term dynamics of radiocaesium in closed lakes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 61, p. 41–53.
- Chernobyl Catastrophe and Consequences, J.T. Smith, N.A. Beresford (eds.), Springer-Praxis, 2005, 310 p.
- CREAMS: A field-scale model for chemicals runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, W.G. Knisel (ed.), USDA Conservation Research Report, no. 26, 1980, 643 p.
- Donigian A.S., Beyerlein D.C., Davis H.H. et al. *Agricultural runoff management (ARM) model, version II: refinement and testing*, EPA 600/3-77-098, Athens, GA, Environmental Research Laboratory, US EPA, 1977.
- Feng B., Onda Y., Wakiyama Y. et al. Persistent impact of Fukushima decontamination on soil erosion and suspended sediment, *Nature Sustainability*, 2022, vol. 5, p. 879–889.
- Funaki H., Sakuma K., Nakanishi T. et al. Reservoir sediments as a long-term source of dissolved radiocesium in water system; a mass balance case study of an artificial reservoir in Fukushima, Japan, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 743, article 140668.
- Ganzha Ch., Gudkov D., Ganzha D. et al. Physicochemical forms of ^{90}Sr and ^{137}Cs in components of Gluboke lake ecosystem in the Chernobyl exclusion zone, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 127, p. 176–181.
- Golosov V., Ivanov M. Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived ^{137}Cs in contaminated territories of the East European Plain, *Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl*, A. Konoplev, K. Kato, S. Kalmykov (eds.), Tokyo, Springer Nature, 2020, p. 195–226.
- Hardie S.M.L., McKinley I.G. Fukushima remediation: status and overview of future plans, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 133, p. 75–85.
- Hilton J. Aquatic radioecology post Chernobyl – a review of the past and look to the future, *Freshwater and Estuarine Radioecology*, G. Desmet, R.J. Blust, R.N.J. Comans et al. (eds.), Amsterdam, Elsevier, 1997, p. 47–74.
- Howard J., Fesenko S.V., Balonov M. et al. A Comparison of Remediation after the Chernobyl and Fukushima Daiichi Accidents, *Radiation Protection Dosimetry*, 2016, vol. 173, no. 1–3, p. 170–176.
- IAEA. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, Technical reports series no. 472, Vienna, IAEA, 2010, 194 p.

- IAEA. *Radiological conditions in the Dneper river basin, Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan*, Vienna, IAEA, 2006, 185 p.
- Igarashi Y., Nanba K., Wada T. et al. Factors Controlling the Dissolved ^{137}Cs Seasonal Fluctuations in the Abukuma River Under the Influence of the Fukushima Nuclear Power Plant Accident, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, vol. 127, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1029/2021JG006591.
- Ikehara R., Suetake M., Komiya T. et al. Novel method of quantifying radioactive cesium-rich microparticles (CsMP) in the environment from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, p. 6390–6398.
- Ivanov M.M., Konoplev A.V., Walling D.E. et al. Using reservoir sediment deposits to reconstruct the longer-term fate of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout in the fluvial system, *Environmental Pollution*, 2021, vol. 274, article 116588.
- Kaneyasu N., Ohashi H., Suzuki F. et al. Sulfate Aerosol as a Potential Transport Medium of Radiocesium from the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, p. 5720–5726.
- Konoplev A., Kanivets V., Zhukova O. et al. Mid- to long-term radiocesium wash-off from contaminated catchments at Chernobyl and Fukushima, *Water Research*, 2021, vol. 188, article 116514.
- Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y. et al. Reconstruction of the Long-Term Dynamics of Particulate Concentrations and Solid–Liquid Distribution of Radiocesium in Three Severely Contaminated Water Bodies of the Chernobyl Exclusion Zone Based on Current Depth Distribution in Bottom Sediments, *Land*, 2022a, vol. 11, no. 1, article 29.
- Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T. et al. Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments, *Environmental Research*, 2022b, vol. 206, article 112307.
- Konoplev A.V., Ivanov M., Golosov V.N. et al. Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ^{137}Cs in the Upa River using bottom sediments in the Schekino reservoir and semi-empirical modelling, *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, p. 95–99.
- Monte L. A collective model for predicting the long-term behaviour of radionuclides in rivers, *Science of the Total Environment*, 1997, vol. 201, p. 17–29.
- Nakanishi T., Sakuma K. Trend of ^{137}Cs concentration in river water in the medium term and future following the Fukushima nuclear accident, *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 272–279.
- Okumura T., Yamaguchi N., Dohi T. et al. Dissolution behaviour of radiocaesium-bearing microparticles released from the Fukushima nuclear power plant, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article 3520.
- Onda Y., Taniguchi K., Yoshimura K. et al. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, vol. 1, p. 644–660.
- Putyrskaya V., Klemt E., Roellin S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb , *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, article 106135.
- Smith J.T., Belova N.V., Bulgakov A.A. et al. The “AQ-UASCOPE” simplified model for predicting ^{89}Sr , and ^{134}Cs , ^{137}Cs in surface waters after a large-scale radioactive fallout, *Health Physics*, 2005, vol. 89, no. 6, p. 628–644.
- Taniguchi K., Onda Y., Smith H.G. et al. Transport and redistribution of radiocesium in Fukushima fallout through rivers, *Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 53, p. 12339–12347.
- Ueda S., Hasegawa H., Ohtsuka Y. et al. Ten-year radiocesium fluvial discharge patterns from watersheds contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 240, article 106759.
- Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. et al. Cesium-137 and strontium-90 contamination of water bodies in the areas affected by releases from the Chernobyl nuclear power plant accident: an overview, *Journal of Environmental Radioactivity*, 1994, vol. 23, p. 103–122.

Поступила в редакцию 24.06.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

RECONSTRUCTION OF THE LONG-TERM DYNAMICS OF RADIOACTIVE CESIUM IN WATER BODIES CONTAMINATED AS A RESULT OF NUCLEAR ACCIDENTS (CASE STUDIES OF CHERNOBYL AND FUKUSHIMA)

A.V. Konoplev¹, M.M. Ivanov², M.A. Komissarov³, V.N. Golosov⁴, N.V. Kuzmenkova⁵

¹ Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan

^{1, 2, 4, 5} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Natural Waters Geochemistry

³ Ufa Institute of Biology, UFIC RAS, Laboratory of Soil Science

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Department of Radiochemistry

¹ Deputy Director, D.Sc. in Biology; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ivanovm@bk.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: mkomissarov@list.ru

⁴ Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: golosov@gmail.com

⁵ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

The study is focused on the reconstruction of long-term dynamics of ^{137}Cs concentration in water bodies contaminated as a result of Chernobyl and “Fukushima-1” NPP accidents. It was found that the vertical distribution of ^{137}Cs in bottom sediments of deep-water sites could be a basis for reconstruction of the dynamics of radionuclide concentration in suspension and in solution. Columns of bottom sediments of reservoirs and experimental values of distribution coefficient K_d are used for reconstruction. The method is applicable in the absence of mixing of the deposited suspension with the underlying layers and at K_d values significantly higher than 104 l/kg. Studies in the Chernobyl and “Fukushima-1” NPP contamination zones have shown that it is possible to reconstruct the long-term changes of ^{137}Cs concentration for rivers, lakes and ponds. The obtained data are the first assessment of the time course of ^{137}Cs specific activity on suspended sediment in water bodies of the Chernobyl NPP zone, which is important for understanding its behavior in the soil-water system and its migration through food chains. The time dependences of ^{137}Cs concentrations are described by the empirical two-exponential and/or semi-empirical diffusion model, applicable for predictive assessments of the long-term dynamics of radioactive contamination in water bodies after nuclear accidents. The results of the study are confirmed by monitoring data for the test water bodies, showing satisfactory agreement with the reconstructed values of ^{137}Cs concentrations. The information obtained is important for assessing the environmental consequences of nuclear accidents and developing strategies for the management of contaminated areas. The methodology presented in the study could be adapted to study the behavior of other radionuclides in aquatic ecosystems, contributing to better prediction and management of radioecological risks over a long term horizon.

Keywords: radionuclide migration, solution, suspension, diffusion, modeling

Acknowledgements. The research was carried out under the megagrant of the Ministry of Education and Science (no 075-15-2024-614) and the project of the Interuniversity Centre for Environmental Radioactivity of Japan ERAN (University of Tsukuba) I-24-16.

REFERENCES

- Ahuja L.R., Sharpley A.N., Yamamoto M. et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P , *Water Resources Research*, 1981, vol. 17, p. 969–974.
- Aleksakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A. et al. *Krupnye yadernye avarii: posledstviya i zaschitnye mery* [Large nuclear accidents: consequences and protective measures], Moscow, Izdat Publ., 2001, 572 p. (In Russian)
- Appleby P.G., Haworth E.Y., Michel H. et al. The transport and mass balance of fallout radionuclides in Blelham Tarn, Cumbria (UK), *Journal of Paleolimnology*, 2003, vol. 29, p. 459–473.
- Bobovnikova Ts.I., Makhonko K.P., Siverina A.A. et al. Fiziko-khimicheskie formy radionuklidov v atmosferykh vypadeniyakh posle avarii na Chernobyl'skoj AES i ikh transformatsiya v pochve [Physicochemical forms of radionuclides in atmospheric fallout after the Chernobyl NPP accident and their transformation in soil], *Atomic Energy*, 1991, vol. 71, no. 5, p. 449–454. (In Russian)
- Bulgakov A., Konoplev A., Smith J. et al. Fuel particles in the Chernobyl cooling pond: current state and prediction for remediation options, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, vol. 100, no. 4, p. 329–332.
- Bulgakov A.A., Konoplev A.V., Smith J.T. et al. Modelling the long-term dynamics of radiocaesium in closed lakes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 61, p. 41–53.
- Chernobyl Catastrophe and Consequences*, J.T. Smith, N.A. Beresford (eds.), Springer-Praxis, 2005, 310 p.
- CREAMS: A field-scale model for chemicals runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*, W.G. Knisel (ed.), USDA Conservation Research Report, no. 26, 1980, 643 p.
- Donigan A.S., Beyerlein D.C., Davis H.H. et al. *Agricultural runoff management (ARM) model, version II: refinement and testing*, EPA 600/3-77-098, Athens, GA, Environmental Research Laboratory, US EPA, 1977.
- Feng B., Onda Y., Wakiyama Y. et al. Persistent impact of Fukushima decontamination on soil erosion and suspended sediment, *Nature Sustainability*, 2022, vol. 5, p. 879–889.
- Funaki H., Sakuma K., Nakanishi T. et al. Reservoir sediments as a long-term source of dissolved radiocaesium in water system; a mass balance case study of an artificial reservoir in Fukushima, Japan, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 743, article 140668.
- Ganzha Ch., Gudkov D., Ganzha D. et al. Physicochemical forms of ^{90}Sr and ^{137}Cs in components of Gluboke lake ecosystem in the Chernobyl exclusion zone, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 127, p. 176–181.
- Golosov V., Ivanov M. Quantitative assessment of lateral migration of the Chernobyl-derived ^{137}Cs in contaminated territories of the East European Plain, *Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl*, A. Konoplev, K. Kato, S. Kalmykov (eds.), Tokyo, Springer Nature, 2020, p. 195–226.
- Hardie S.M.L., McKinley I.G. Fukushima remediation: status and overview of future plans, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 133, p. 75–85.
- Hilton J. Aquatic radioecology post Chernobyl – a review of the past and look to the future, *Freshwater and Estuarine Radioecology*, G. Desmet, R.J. Blust, R.N.J. Comans et al. (eds.), Amsterdam, Elsevier, 1997, p. 47–74.
- Howard J., Fesenko S.V., Balonov M. et al. A Comparison of Remediation after the Chernobyl and Fukushima Daiichi Accidents, *Radiation Protection Dosimetry*, 2016, vol. 173, no. 1–3, p. 170–176.
- IAEA. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, Technical reports series no. 472, Vienna, IAEA, 2010, 194 p.
- IAEA. *Radiological conditions in the Dneper river basin, Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan*, Vienna, IAEA, 2006, 185 p.

- Igarashi Y., Nanba K., Wada T. et al. Factors Controlling the Dissolved ^{137}Cs Seasonal Fluctuations in the Abukuma River Under the Influence of the Fukushima Nuclear Power Plant Accident, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, vol. 127, no. 1, p. 1–16, DOI: 10.1029/2021JG006591.
- Ikehara R., Suetake M., Komiya T. et al. Novel method of quantifying radioactive cesium-rich microparticles (CsMP) in the environment from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, p. 6390–6398.
- Ivanov M.M., Konoplev A.V., Walling D.E. et al. Using reservoir sediment deposits to reconstruct the longer-term fate of Chernobyl-derived ^{137}Cs fallout in the fluvial system, *Environmental Pollution*, 2021, vol. 274, article 116588.
- Kaneyasu N., Ohashi H., Suzuki F. et al. Sulfate Aerosol as a Potential Transport Medium of Radiocesium from the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46, p. 5720–5726.
- Konoplev A., Kanivets V., Zhukova O. et al. Mid- to long-term radiocesium wash-off from contaminated catchments at Chernobyl and Fukushima, *Water Research*, 2021, vol. 188, article 116514.
- Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y. et al. Reconstruction of the Long-Term Dynamics of Particulate Concentrations and Solid–Liquid Distribution of Radiocesium in Three Severely Contaminated Water Bodies of the Chernobyl Exclusion Zone Based on Current Depth Distribution in Bottom Sediments, *Land*, 2022a, vol. 11, no. 1, article 29.
- Konoplev A., Wakiyama Y., Wada T. et al. Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments, *Environmental Research*, 2022b, vol. 206, article 112307.
- Konoplev A.V., Ivanov M., Golosov V.N. et al. Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ^{137}Cs in the Upa River using bottom sediments in the Schekino reservoir and semi-empirical modelling, *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, p. 95–99.
- Konoplev A.V., Kanivets V.I., Zhukova O.M. et al. Polu-empiricheskaya diffuzionnaya model smyva radionuklidov s zagryaznennykh vodosborov i ee proverka na osnove dannykh monitoring rek Fukusimy i Chernobylya [Semi-empirical diffusion model of radionuclide washoff from contaminated catchments and its verification based on monitoring data from Fukushima and Chernobyl rivers], *Geochemistry*, 2021, vol. 66, no. 6, p. 1–12. (In Russian)
- Monte L. A collective model for predicting the long-term behaviour of radionuclides in rivers, *Science of the Total Environment*, 1997, vol. 201, p. 17–29.
- Nakanishi T., Sakuma K. Trend of ^{137}Cs concentration in river water in the medium term and future following the Fukushima nuclear accident, *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 272–279.
- Okumura T., Yamaguchi N., Dohi T. et al. Dissolution behaviour of radiocaesium-bearing microparticles released from the Fukushima nuclear power plant, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, article 3520.
- Onda Y., Taniguchi K., Yoshimura K. et al. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, vol. 1, p. 644–660.
- Putyrskaya V., Klemm E., Roellin S. et al. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb , *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, article 106135.
- Radionuklidy v vodnykh ekosistemakh Ukrainy. Vliyanie radionuklidnogo zagryazneniya na gidrobionty zony otchuzhdeniya [Radionuclides in aquatic ecosystems of Ukraine. Impact of radionuclide contamination on hydrobionts of the exclusion zone], M.I. Kuzmenko (ed.), Kyiv, Chernobylinterinform, 2001, 318 p. (In Ukrainian)
- Smith J.T., Belova N.V., Bulgakov A.A. et al. The “AQ-UASCOPE” simplified model for predicting ^{89}Sr , and $^{134, 137}\text{Cs}$ in surface waters after a large-scale radioactive fallout, *Health Physics*, 2005, vol. 89, no. 6, p. 628–644.
- Taniguchi K., Onda Y., Smith H.G. et al. Transport and redistribution of radiocesium in Fukushima fallout through rivers, *Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 53, p. 12339–12347.
- Ueda S., Hasegawa H., Ohtsuka Y. et al. Ten-year radiocesium fluvial discharge patterns from watersheds contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 240, article 106759.
- Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. et al. Cesium-137 and strontium-90 contamination of water bodies in the areas affected by releases from the Chernobyl nuclear power plant accident: an overview, *Journal of Environmental Radioactivity*, 1994, vol. 23, p. 103–122.
- Vakulovsky S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. et al. Zagryaznenie tsesiem-137 i strontsiem-90 vodnykh ob'ektov na territorii podvergsheysya vozdeystviyu vybrosov avariynogo bloka ChAES [Contamination with cesium-137 and strontium-90 of water bodies in the territory affected by emissions from the emergency unit of the Chernobyl NPP], *Meteorology and Hydrology*, 1991, no. 7, p. 64–73. (In Russian)
- Voitsekhovich O.V., Kanivets V.V., Kireev S.I. et al. [Radioactive contamination of surface waters], 30 ket Chernobyl'skoj katastrofy [30 years of the Chernobyl catastrophe], Collection of information and analytical materials, Kyiv, 2016, p. 129–139. (In Ukrainian)

Received 24.06.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 15.10.2024