

УДК 550.461

МАСШТАБНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПО ТЕЧЕНИЮ РЕКИ ЕНИСЕЙ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ПАВОДКА 1966 г.

© 2021 г. А. Я. Болсуновский^{1,*}, Д. В. Дементьев¹, В. И. Вахрушев¹

Представлено академиком РАН А.Г. Дегерменджи 08.02.2021 г.

Поступило 08.02.2021 г.

После доработки 19.02.2021 г.

Принято к публикации 20.02.2021 г.

Многолетние исследования обнаружили в донных отложениях и аллювиальных почвах поймы реки Енисей на разном расстоянии (до 820 км) от радиоактивных сбросов Горно-химического комбината (ГХК) Росатома слои аномального содержания ^{137}Cs . Максимальная удельная активность ^{137}Cs в аномальных слоях достигала 26000 Бк/кг, что выше максимального значения ^{137}Cs для известной радиоактивной аномалии береговой зоны г. Енисейска (330 км от ГХК), которая возникла во время экстремального паводка 1966 г. Совпадающий радионуклидный состав и отношения радионуклидов ($^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}$ и $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$) в обнаруженных нами аномальных слоях с данными для аномалии г. Енисейска свидетельствует об одном источнике происхождения – перенос донных отложений из зоны ГХК во время экстремального паводка 1966 г. Масштабный перенос радиоактивных донных отложений по течению реки из зоны сбросов ГХК во время экстремального паводка 1966 г. может представлять потенциальную радиационную опасность для экосистемы реки и населения прибрежных поселков.

Ключевые слова: донные отложения, река Енисей, экстремальный паводок, техногенные радионуклиды, датировка слоев

DOI: 10.31857/S2686739721060050

Пойма реки Енисей загрязнена техногенными радионуклидами в результате деятельности Горно-химического комбината (ГХК) Росатома и глобальных выпадений. В слоях донных отложений реки после сбросов ГХК зарегистрирован широкий перечень техногенных радионуклидов: изотопы европия (^{152}Eu , ^{154}Eu и ^{155}Eu), цезия (^{137}Cs и ^{134}Cs), ^{60}Co , ^{90}Sr и трансурановые элементы (изотопы плутония, америция, нептуния и кюрия) [1–4]. По данным работы [5], запасы техногенных радионуклидов на участке поймы реки Енисей протяженностью 250 км от ГХК составили 131 Кюри. Вертикальное распределение радионуклидов в донных отложениях реки имеет сложный характер с наличием ряда максимумов, обусловленных разными скоростями поступления радионуклидов с ГХК, а также в результате глобальных выпадений [2, 6]. В ежегодных Государ-

ственных докладах “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае” и Радиационно-гигиенических паспортах Красноярского края, в частности за 2014 г. [7], отмечается, что в границах 1000-километрового участка зоны наблюдения ГХК в пойме р. Енисей имеются многочисленные участки повышенной аккумуляции техногенных радионуклидов, присутствовавших в нормативных и аварийных сбросах реакторного и радиохимического заводов комбината в результате его деятельности. Большинство радиационно-загрязненных участков поймы реки расположены вне границ населенных пунктов, за исключением радиоактивной аномалии на береговой полосе г. Енисейска [2, 7]. Детальное исследование этой радиоактивной аномалии на территории о. Городской (г. Енисейск) показало высокое содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs в аллювиальных слоях, соответствующего категории очень низкоактивных радиоактивных отходов [2, 7]. По данным работы [2], образование радиоактивного слоя произошло путем отложения тонкодисперсного гумусированного осадка в период мощного паводка на реке Енисей, перенесшего большие массы донных отложений из района вблизи ГХК. На основании отношения изотопов

¹ Институт биофизики Федерального исследовательского центра “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Красноярск, Россия

*E-mail: radecol@ibp.ru

Таблица 1. Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг) и отношения техногенных радионуклидов в активных слоях кернов донных отложений и пойменных почв реки Енисей по течению от ГХК

Район и год отбора	Глубина, см	^{137}Cs , Бк/кг	$^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}^*$	$^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}^*$
Енисейск-1-1997**	90–105	3500–19900	290–810	7000–48000
Енисейск-2-1997**	0–15	3500–13100	600–640	— ***
Балчуг-2009	3–9	3200–26000	260–2090	16000
Балчуг-2010	27–33	2200–2700	150–200	5500
Балчуг-2012	18–24	2600–8800	520–800	— ***
Балчуг-2016	9–15	3800–17000	350–460	3000
Балчуг-2018	57–63	1000–3300	310–610	2000–4000
Стрелка-2012	42–48	1100–3100	160–240	1500–2000
Бор-2013	66–69	750	300	— ***

Примечание. * – отношения радионуклидов приведены с пересчетом на январь 2018 г.; ** – приведены данные работы Сухорукова и соавт. [2]; *** – в слоях отсутствует ^{60}Co в связи с многолетним радиоактивным распадом.

цезия ($^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$) авторы вышеназванной работы заключили, что радиоактивная аномалия г. Енисейска образовалась в период экстремального паводка 1966 г. Во время этого события, крупнейшего за последние 65 лет на реке Енисей, расход воды через плотину Красноярской ГЭС составлял не менее $18\,000\text{ м}^3/\text{с}$ [8], что в несколько раз превышал средний многолетний расход воды ($3000\text{ м}^3/\text{с}$). Экстремальный расход воды через плотину сопровождался подъемом уровня воды в реке и затоплением многих прибрежных населенных пунктов [8]. Возросшая во время паводка скорость течения реки привела к переносу радиоактивных донных отложений и аллювиальных почв поймы реки из зоны вблизи ГХК на большие расстояния по течению реки – как минимум на 330 км (г. Енисейск) от ГХК. Ранее проведенный мониторинг содержания техногенных радионуклидов в слоях донных отложений и аллювиальных почв в районах вблизи ГХК не выявил аномальных по ^{137}Cs слоев, которые могли образоваться во время паводка 1966 г. Как правило, глубокие слои кернов донных отложений содержали высокие значения не только ^{137}Cs , но и других техногенных радионуклидов сбросов ГХК [2, 6], не характерных для события 1966 г.

Цель данной работы – поиск кернов донных отложений и аллювиальных почв поймы реки Енисей по течению реки от ГХК, содержащих слои аномального содержания ^{137}Cs в результате паводка 1966 г.

Для исследований использовали керны донных отложений и аллювиальных почв, отобранных в пойме реки Енисей в период с 2009 по 2018 г. на расстоянии до 900 км (с. Бор) по течению от г. Красноярска. Керны отбирали как вблизи ГХК (п. Балчуг на расстоянии 15 км от сбросов ГХК), так и на удаленных участках вблизи с. Стрелка и с. Бор (250 и 820 км от ГХК соответственно). Для

отбора использовали стальные пробоотборники – трубы разной длины с диаметром 11 см [6]. Керны донных отложений и аллювиальных почв отбирали в ежегодно-затапливаемых застойных зонах вблизи берега реки, включая острова. Удельную активность техногенных радионуклидов в пробах определяли γ -спектрометрическим методом на γ -спектрометре фирмы “Canberra” (США) со сверхчистым германиевым детектором с тонким бериллиевым окном, позволяющим регистрировать γ -кванты с энергией от 30 кэВ. Для определения скорости осадконакопления и датировки слоев кернов после сбросов ГХК использовали отношение техногенных радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$, которое ранее показало хорошее совпадение результатов с расчетами по методу неравновесного ^{210}Pb [9].

Ранее Сухоруков и соавт. [2] отмечали, что в кернах аллювиальных почв береговой зоны г. Енисейска зарегистрировано аномальное содержание ^{137}Cs . При этом максимумы ^{137}Cs присутствовали как в глубоких слоях керна (90–105 см), так и в верхней части керна (0–15 см) (рис. 1, табл. 1). В отобранных нами кернах донных отложений и аллювиальных почв поймы реки Енисей вблизи сбросов ГХК (п. Балчуг) также были обнаружены слои аномального содержания ^{137}Cs в верхних и нижних слоях кернов (рис. 1, табл. 1). При этом максимальное содержание ^{137}Cs достигало 26000 Бк/кг для района вблизи п. Балчуг, что превосходило максимальные значения ^{137}Cs для района вблизи г. Енисейска (табл. 1). Слои аномального содержания ^{137}Cs в верхних и нижних слоях кернов были отмечены в кернах, отобранных в 2009–2013 и в 2016–2018 гг. (рис. 1, табл. 1).

Как следует из данных табл. 1, в некоторых активных по ^{137}Cs слоях кернов наблюдается отсутствие техногенных радионуклидов с малыми периодами полураспада, таких как ^{60}Co (5,27 года) и

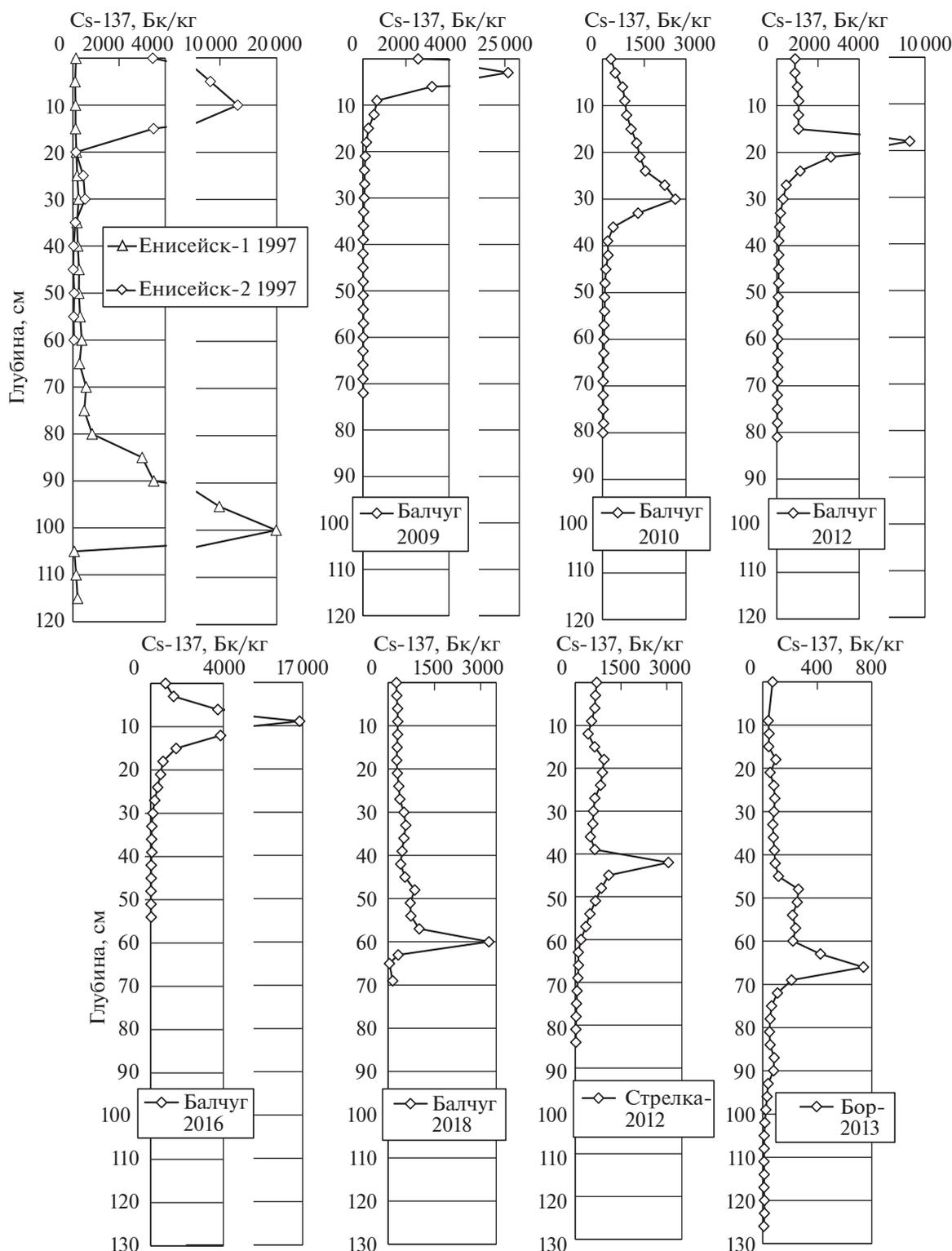


Рис. 1. Распределение ^{137}Cs в кернах осадков поймы р. Енисей с аномальными слоями, отобранных вблизи сбросов ГХК (п. Балчуг), а также на значительном расстоянии по течению реки (села Стрелка и Бор, г. Енисейск). Данные по радиоактивной аномалии г. Енисейска взяты из работы [2].

^{134}Cs (2.06 года). Ранее авторы работы [2] датировали радиоактивную аномалию г. Енисейска 1966-м годом (периодом экстремального павод-

ка) и поэтому спустя 40–50 лет после паводка радионуклид ^{134}Cs распался, а ^{60}Co регистрируется в пробах вблизи инструментального предела обна-

ружения. Радионуклиды ^{137}Cs и ^{152}Eu имеют относительно большие периоды полураспада (30 и 13.5 лет соответственно) и за прошедший период их активности в измеренных пробах аномальных слоев уменьшились не столь значительно. Полученный нами диапазон отношений $^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}$ в пробах аномальных слоев кернов вблизи сбросов ГХК варьирует от 150 до 2090, что пересекается с диапазоном отношения $^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}$ в пробах аномальных слоев кернов г. Енисейска – 290–810 (табл. 1). Для кернов удаленных районов по течению реки от ГХК (Стрелка и Бор) отношение $^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}$ в пробах аномальных слоев изменяется от 160 до 300 (табл. 1), что также соответствует отношению радионуклидов в аномальных слоях вблизи сбросов ГХК (Балчуг). Отношение радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в пробах аномальных слоев оказалось не столь информативным из-за более короткого периода полураспада ^{60}Co по сравнению с ^{137}Cs и ^{152}Eu . Как результат, рассчитанное на январь 2018 г. отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в отдельных пробах аномальных слоев г. Енисейска было в диапазоне 7000–48000, для проб аномальных слоев вблизи ГХК – отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ было в диапазоне от 2000 до 16000 или не определялось из-за отсутствия ^{60}Co (табл. 1). Следовательно, совпадающие отношения радионуклидов ($^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}$ и, при наличии, $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$) в пробах аномальных слоев по течению реки от ГХК с этими отношениями радионуклидов в аномальных слоях г. Енисейска свидетельствуют об одном и том же времени происхождения – экстремальном паводке 1966 г. на реке Енисей.

Из анализа распределения ^{137}Cs в кернах радиоактивных аномалий следует, что содержание ^{137}Cs в аллювиальных слоях ниже слоя максимальной активности уменьшается до низких значений – менее 100 Бк/кг (рис. 1), т.е. до фонового уровня глобальных выпадений ^{137}Cs вследствие ядерных испытаний до 1961 г. Например, для керна Енисейск-1 наблюдается резкое падение содержания ^{137}Cs уже в следующем слое после слоя максимальной активности ^{137}Cs с 19900 до 60 Бк/кг. Однако для большинства отобранных кернов вблизи ГХК (п. Балчуг) между слоем максимальной активности ^{137}Cs и фоновым слоем регистрируются слои с промежуточным содержанием ^{137}Cs (рис. 1). Так, для кернов вблизи сбросов ГХК (Балчуг-2010, 2012, 2016) и на удалении от ГХК (Стрелка-2012) ниже слоя максимального содержания ^{137}Cs в нескольких слоях регистрируется ^{137}Cs в диапазоне от 200 до 700 Бк/кг (рис. 1). Это можно объяснить как поступлением ^{137}Cs из зоны вблизи ГХК в период работы комбината до паводка 1966 г., так и возможной миграцией ^{137}Cs из верхних аномальных слоев за длительный период времени. В самых нижних слоях отдельных

кернов содержание ^{137}Cs отмечено на очень низком фоновом уровне – 7–10 Бк/кг.

Известно, что поступление радионуклидов со сбросами ГХК в р. Енисей началось с запуском первого реактора в 1958 г. Деятельность ГХК в полном объеме (и соответственно максимальные сбросы радионуклидов) началась с 1964 г. после ввода в работу всех реакторов и радиохимического производства [10]. В начальный период радиоактивных сбросов ГХК с 1958 по 1965 г. сформировался относительно низкий уровень радиоактивного загрязнения ^{137}Cs поймы реки Енисей, который регистрируется в кернах аллювиальных почв и донных отложений как промежуточный слой между фоновым уровнем и аномальным слоем паводка 1966 г. (рис. 1). Однако паводок 1966 г. привел к затоплению береговой промзоны ГХК, включая частично береговые бассейны-хранилища радиоактивных отходов, и переносу донных отложений на большие расстояния по течению реки от промзоны ГХК. В последующие годы в 1988 и 2006 г. на р. Енисей были крупные паводки, но они уступали по расходу воды паводку 1966 г. и не были отмечены существенными максимумами ^{137}Cs в отобранных кернах. Проведенная нами датировка слоев кернов из районов вблизи сбросов ГХК (Балчуг-2010, 2016, 2018) с использованием отношения радионуклидов ($^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$) подтвердила образование аномальных слоев в 1966 г.

В научной литературе известен только один сопоставимый факт масштабного переноса техногенных радионуклидов во время радиационных аварий по течению реки в виде взвешенных частиц донных отложений – поступления радиоактивных отходов в р. Теча во время начала работы ПО Маяк (Челябинская область, г. Озерск), производившего оружейный плутоний с 1949 г. Считается, что радиационное загрязнение поймы р. Теча по своему масштабу и последствиям является радиационной аварией [11]. В работе Мокрова [12] детально анализируется эта авария, когда в период с 1949 по 1951 г. осуществляли постоянные сбросы жидких радиоактивных отходов в р. Теча. Однако наиболее существенное влияние на загрязнение реки оказали не многолетние сбросы радиоактивных отходов в реку, а кратковременная “промывка” водоемов-хранилищ радиоактивных отходов В-3 и В-4 комбината чистой водой в октябре 1951 г. [12]. В этот период при расходе воды до 30 м³/с радиоактивные донные отложения хранилищ отходов поступили в реку и сформировали крупномасштабное загрязнение поймы р. Теча на всем протяжении в 240 км до устья. В работе [12] на основании совпадения отношения радионуклидов $^{238,239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$, измеренных в пробах донных отложений и почвы для различных точек поймы р. Теча, сделан вывод о практически “одномоментном” радиоактивном

загрязнение поймы. Согласно модельным расчетам автора [12], при малых скоростях сбросов жидких радиоактивных отходов (до 1 м³/с) в реку основная часть взвесей полностью оседала на первых 10 км от точки сброса. Однако при скоростях течения выше 7.5 м³/с загрязненные радионуклидами взвешенные частицы ила и глины переносились с водным потоком по всей длине р. Теча (240 км) и сформировали обширное радиоактивное загрязнение речной системы. Впоследствии радиоактивное загрязнение воды и береговой зоны реки привело к критическому облучению людей населенных пунктов по берегам реки [12].

Используя данные анализа радиационной аварии на р. Теча для ситуации на р. Енисей, можно считать, что скорости течения во время экстремального паводка на Енисее в 1966 г. достигали значений массового транспорта руслоформирующих наносов, сформированных вблизи промзоны ГХК, и, следовательно, происходил существенный перенос радионуклидов на взвеси по течению реки на большие расстояния. Ежегодный мониторинг и выявление новых участков аномального радиоактивного загрязнения поймы р. Енисей позволят оценить реальный масштаб переноса радиоактивных донных отложений из района вблизи ГХК по течению реки. На р. Енисей, по аналогии с р. Теча, в первые годы после паводка 1966 г. можно было ожидать существенного радиоактивного загрязнения береговой зоны реки и потенциальной радиационной опасности для населения прибрежных поселков р. Енисей. В последующие 10–20 лет после паводка 1966 г. радиоактивное загрязнение береговой зоны реки могло существенно снизиться из-за распада радионуклидов, перемещения радиоактивных аллювиальных почв во время ледохода и паводков, а также перекрытия радиоактивных слоев поймы относительно чистыми осадками. В будущем экстремальные паводки на р. Енисей могут нарушить поверхностные слои пойменных почв и перенести на большие расстояния по реке заглубленные радиоактивные слои паводка 1966 г. Поэтому максимальные объемы попусков воды Красноярской ГЭС должны согласовываться с оценкой предельных скоростей течения реки, способных привести к переотложению донных отложений.

Таким образом, в отобранных нами ядрах донных отложений и аллювиальных почв поймы р. Енисей на разном расстоянии по течению реки от сбросов ГХК впервые были обнаружены слои аномального содержания ¹³⁷Cs, превышающие максимальные значения ¹³⁷Cs для известной радиоактивной аномалии береговой зоны г. Енисейска (330 км от ГХК по течению реки). Радиоактивная аномалия г. Енисейска возникла в результате переноса донных отложений из зоны

ГХК во время экстремального паводка 1966 г. и поэтому обнаруженные нами слои аномального содержания ¹³⁷Cs во многих других местах поймы реки также можно считать следствием паводка 1966 г. Об этом свидетельствует полученная нами датировка аномальных слоев 1966-м годом, а также следующие факты: 1) отсутствие в аномальных ¹³⁷Cs слоях наших ядер и вблизи г. Енисейска техногенных радионуклидов с коротким периодом полураспада; 2) совпадающие отношения радионуклидов (¹³⁷Cs/¹⁵²Eu и ¹³⁷Cs/⁶⁰Co) в пробах аномальных слоев разных районов по течению реки от ГХК; 3) слои обнаруженного максимального содержания ¹³⁷Cs в ядрах локализованы вблизи слоев фонового содержания ¹³⁷Cs, т.е. в начальный период активной деятельности ГХК с 1964 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С.В. Косиненко (Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН) за участие в отборе проб и аналитические исследования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-44-240001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // ДАН. 2002. Т. 387. № 2. С. 233–236.
2. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолуцкий В.М., Болсуновский А.Я., Ковалев С.И., Косолапова Л.Г., Мельгунов М.С., Рипута В.Ф. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск, Изд-во СО РАН. Филлиал “Гео”. 2004. 286 с.
3. Bolsunovsky A., Bondareva L. Actinides and Other Radionuclides in Sediments and Submerged Plants of the Yenisei River // J. Alloy. Compd. 2007. 444–445, P. 495–499.
4. Bolsunovsky A., Ermakov A., Sobolev A. New data on Transuranium Elements in the Ecosystem of the Yenisei River Floodplain // Radiochim. Acta. 2007. 95 (9). P. 547–552.
5. Болсуновский А.Я., Трапезников А.В. Сравнительный анализ радиоактивного загрязнения реки Енисей и Обь-Иртышской речной системы // Мат. III межд. конф. “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”, г. Томск. 23–27 июня 2009. Издательство “СТТ”, 2009. С. 95–98.
6. Bolsunovsky A. Artificial Radionuclides in Sediment of the Yenisei River // Chemistry and Ecology. 2010. 26 (6). P. 401–409.

7. Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2014 году”. Раздел 5. Радиационная обстановка. Министерство природных ресурсов и экологии Красноярского края. г. Красноярск. 2015. С. 66–88. <http://mpr.krskstate.ru/dat/File/3/Doklad-2014.pdf>
8. *Бабкин В.И.* О регулировании речного стока в XXI веке. Москва. Триумф, 2018. 215 с.
9. *Болсуновский А.Я., Деметьев Д.В., Косиненко С.В.* Использование радионуклидных методов датировки донных отложений реки Енисей // Мат. VI межд. конф. 4–7 февраля 2010 г. “Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде”, Семипалатинск, Казахстан. 2010. Т. 1. С. 114–118.
10. Отчет по экологической безопасности ГХК за 2019 год. Железногорск, 2020. 44 с. https://sibghk.ru/images/pdf/eco/ghk_ecorep_2019.pdf
11. *Mokrov Y., Glagolenko Y., Napier B.* Reconstruction of Radionuclide Contamination of the Techa River Caused by Liquid Waste Discharge from Radiochemical Production at the Mayak Production Association // Health Physics. 2000. 79 (1). P. 15–23.
12. *Мокров Ю.Г.* Реконструкция и прогноз радиоактивного загрязнения реки Теча. Автореф. дисс. докт. техн. наук по спец. “Геоэкология”. Челябинская обл., г. Озерск, Редакционно-издательский центр ВРБ, 2005, 49 с.

TRANSPORT OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES OVER LONG DISTANCES DOWNSTREAM THE YENISEI RIVER DURING THE 1966 EXTREME FLOOD EVENT

A. Ya. Bolsunovsky^{a,#}, D. V. Dementyev^a, and V. I. Vakhrushev^a

^a *Institute of Biophysics, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: radecol@ibp.ru*

Presented by Academician of the RAS A.G. Degermendzhi February 8, 2021

The long-term research revealed layers with abnormally high levels of ^{137}Cs in bottom sediments and alluvial soils in the floodplain of the Yenisei River at different distances (as far as 820 km) downstream of the radioactive discharge point of the Mining-and-Chemical Combine (MCC) of Rosatom. The highest activity concentration of ^{137}Cs in those layers reached 26000 Bq/kg, and that was higher than the ^{137}Cs maximum at the well-known radioactive anomaly in the Yeniseisk riparian zone (330 km downstream of the MCC), which originated during the 1966 extreme flood event. The radionuclide composition and the $^{137}\text{Cs}/^{152}\text{Eu}$ and $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ ratios in the anomalous layers we found were the same as at the Yeniseisk anomalous site, suggesting that they had the same origin – transport of sediments from the MCC area during the 1966 extreme flood event. The transport of radioactive bottom sediments over long distances from the MCC discharge point downstream the Yenisei during the 1966 extreme flood event poses a potential radiation hazard to the river ecosystem and residents of riverside villages.

Keywords: bottom sediments, the Yenisei River, extreme flood event, artificial radionuclides, dating of layers