

УДК 550.461

РАДИОНУКЛИД ^{60}Co КАК МАРКЕР ДЛЯ ОЦЕНКИ МАСШТАБА ПЕРЕНОСА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ ЕНИСЕЙ В ПАВОДОК 2006 ГОДА

© 2022 г. А. Я. Болсуновский^{1,*}, Д. В. Дементьев¹, В. И. Вахрушев^{1,2}

Представлено академиком РАН А.Г. Дегерменджи 07.04.2022 г.

Поступило 07.04.2022 г.

После доработки 27.04.2022 г.

Принято к публикации 28.04.2022 г.

Исследования донных отложений реки Енисей с 2006 по 2016 г. вблизи Горно-химического комбината (ГХК) и на удалении до 250 км от ГХК по течению реки обнаружили в верхних слоях повышенное содержание радионуклида ^{60}Co , в том числе в форме радиоактивных микрочастиц. Увеличение удельной активности ^{60}Co в пойме реки произошло вследствие экстремального паводка 2006 г. Отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в поверхностных слоях донных отложений после паводка варьировало от 0.2 до 1.0 и существенно отличалось от отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (2.5–6.0) в поверхностных слоях до паводка. Повышенное содержание ^{60}Co в верхних слоях донных отложений может служить маркером события 2006 г. для расчета скорости осадконакопления и датировки поступления радионуклидов в донные отложения.

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

DOI: 10.31857/S2686739722080047

Донные отложения реки Енисей содержат широкий перечень техногенных радионуклидов (включая трансурановые элементы) вследствие многолетних сбросов Горно-химического комбината (ГХК) Росатома в г. Железногорск Красноярского края [1–4]. Вертикальное распределение радионуклидов в донных отложениях реки имеет сложный характер с наличием ряда максимумов, обусловленных разными скоростями поступления радионуклидов со сбросами ГХК, гидрологическими условиями, а также в результате глобальных выпадений [2, 3].

Результаты многолетних исследований донных отложений и аллювиальных почв поймы реки Енисей на разном расстоянии (до 820 км) от радиоактивных сбросов ГХК показали наличие слоев с аномальным содержанием ^{137}Cs [2, 4]. Максимальная удельная активность ^{137}Cs в таких

аномальных слоях достигала 26 000 Бк/кг, что соответствует категории очень низкой активности радиоактивных отходов [2, 4, 5]. В предыдущей нашей работе был определен источник происхождения аномальных слоев – перенос донных отложений из зоны ГХК по течению реки во время экстремального паводка 1966 г. [4]. Одним из признаков, свидетельствующих об образовании аномальных по ^{137}Cs слоев донных отложений во время этого паводка, является отсутствие в настоящее время в них такого короткоживущего техногенного радионуклида как ^{60}Co ($T_{1/2} = 5.27$ лет). Ранее мы отмечали присутствие ^{60}Co в поверхностных слоях донных отложений реки Енисей [2, 3], что свидетельствует о поступлении этого радионуклида со сбросами ГХК.

В работе [6] анализировали разные радиоактивные частицы, в том числе содержащие только один радионуклид ^{60}Co . Эти частицы с ^{60}Co были обнаружены в поверхностном слое почвы поймы реки Енисей вблизи сбросов ГХК в 2007 и 2008 г. сотрудниками Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). Максимальная удельная активность ^{60}Co достигала 46 000 Бк/частицу, что многократно превышало максимальную удельную активность ^{60}Co в пойменных почвах данного района реки (200–300 Бк/кг) [6].

¹ Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального исследовательского центра Красноярского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*E-mail: radecol@ibp.ru

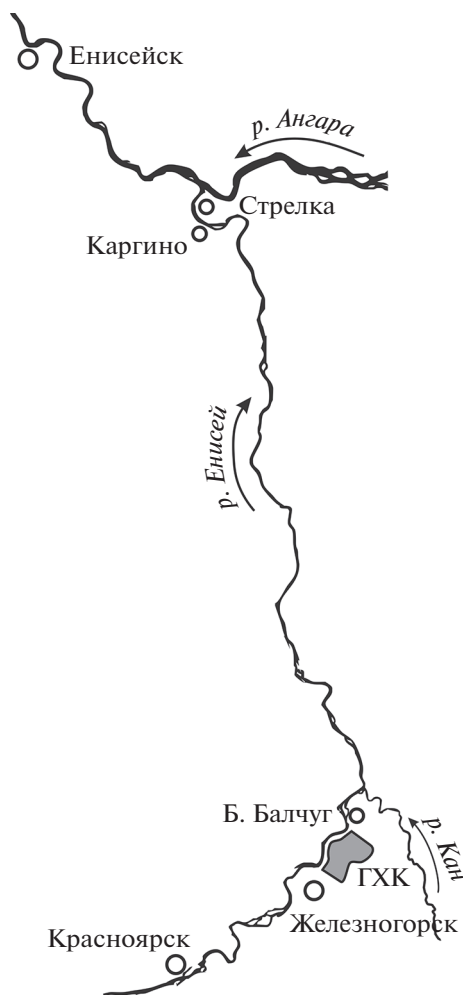


Рис. 1. Карта-схема района отбора проб донных отложений р. Енисей (Красноярский край).

В вышеотмеченной работе сделано предположение, что источником таких частиц может быть почва, содержащая радионуклиды, и смытая в Енисей с территории ГХК во время экстремального паводка 2006 г. Также было отмечено, что кроме частиц с высокой активностью ^{60}Co , в слоях пойменной почвы могли находиться небольшие фрагменты таких частиц меньшей активности [6]. Известно, что во время паводка 2006 г. расход воды через плотину Красноярской ГЭС составлял $10\,500\text{ м}^3/\text{с}$, что почти в 2 раза меньше расхода воды в паводок 1966 г. ($18\,000\text{ м}^3/\text{с}$), при величине среднего многолетнего расхода воды в $3000\text{ м}^3/\text{с}$ [7]. Экстремальный расход воды во время паводков сопровождался значительным подъемом уровня воды в реке и затоплением поймы реки, включая береговую линию в 30-км зоне ГХК.

Обычно при анализе кернов донных отложений реки Енисей нами особое внимание уделялось слоям максимальной активности долгожи-

вущего радионуклида ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ лет). При этом вертикальному распределению радионуклида ^{60}Co в донных отложениях не уделялось должного внимания. Однако присутствие ^{60}Co частиц в поверхностных слоях [6], образовавшихся во время паводка 2006 г., ставит необходимость дополнительного исследования ранее отобранных кернов на наличие ^{60}Co . Поэтому целью данной работы был анализ кернов донных отложений реки Енисей по течению реки от ГХК для выявления слоев повышенного содержания ^{60}Co , образовавшихся в результате паводка 2006 г.

Для исследований использовали керны донных отложений, отобранных в пойме реки Енисей в период с 1999 по 2016 г. на участке 95–330 км по течению от г. Красноярск (рис. 1). Керны были отобраны как вблизи ГХК (с. Б. Балчуг на расстоянии 15 км от места сбросов ГХК), так и на удаленных участках вблизи сел Каргино и Стрелка – 240 и 250 км от ГХК соответственно. Водная глубина точек отбора варьировала от 30 до 120 см в зависимости от гидрологических условий на реке Енисей.

Для отбора использовали стальные пробоотборники – трубы разной длины с диаметром 11 см [3]. Керны донных отложений 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 “Санберга” (США) со сверхчистым германиевым детектором с тонким бериллиевым окном. В большинстве случаев при регистрации высокой удельной активности ^{60}Co в пробах донных отложений проводили квартование исходной пробы на пробы меньшей массы. После квартования на основании γ -спектрометрических измерений определяли степень неоднородности удельной активности ^{60}Co в малых пробах массой 9–15 г и выявляли пробу с максимальной активностью ^{60}Co (Бк/пробу) вследствие присутствия микрочастиц с ^{60}Co .

Известно, что в кернах донных отложений и пойменных почв реки Енисей после сбросов ГХК присутствует широкий спектр γ -излучающих радионуклидов (изотопы цезия, европия и ^{60}Co) [2–4]. При этом, во всех слоях отобранных кернов, включая поверхностные слои, удельная активность ^{137}Cs была выше удельной активности других радионуклидов. В табл. 1 для примера приведены удельные активности поверхностных 10-см слоев двух кернов из ближней (Балчуг-1999) и дальней (Стрелка-2004) зоны влияния ГХК на пойму реки. Видно, что удельная активность ^{137}Cs выше активности ^{60}Co в поверхностных слоях кернов этих двух районов. При этом отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ варьирует от 2.5 до 6.0 для керна района

Балчуг, что совпадает с отношением $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (3.8–6.3) для кернa района Стрелка, удаленного на расстоянии 250 км от ГХК.

Активная фаза паводка 2006 г. на реке Енисей была в летний период (июль), но повышенный сброс воды на Красноярской ГЭС сохранялся после этого еще несколько месяцев. В осенний период 2006 г. нам удалось отобрать керны донных отложений двух районов – Балчуг-2006 и Стрелка-2006. Как следует из данных табл. 1, в поверхностном слое кернa Балчуг-2006 зарегистрирована высокая активность ^{60}Co (до 1100 Бк/кг), превышающая многократно удельную активность ^{137}Cs (270 Бк/кг). Проведенное в дальнейшем квартование этой пробы выявило присутствие микрочастицы с ^{60}Co в минимальной навеске пробы. В других верхних слоях этого кернa также отмечено повышенное содержание ^{60}Co и отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (0.7–1.3) было значительно ниже этого отношения в верхних слоях кернов до паводка (2.5–6.0). В поверхностном слое кернa Стрелка-2006 отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co} = 1.5$, что также было ниже этого отношения в верхних слоях кернов до паводка (3.8–6.3). Эти данные свидетельствуют о повышенном содержании радионуклида ^{60}Co , поступившего в период паводка 2006 г. в поверхностные слои донных отложений реки Енисей не только вблизи ГХК, но и на удаленном расстоянии по течению реки. При этом вблизи сбросов ГХК в поверхностной пробе донных отложений радионуклид ^{60}Co присутствует как в сорбционной (рассеянной) форме, так и в форме микрочастиц. В последующие годы (2008 и 2010) в отобранных нами кернax донных отложений вблизи с. Б. Балчуг продолжали регистрировать повышенное содержание ^{60}Co в поверхностных слоях (отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ варьировало от 0.5 до 1.4) и присутствие микрочастиц с ^{60}Co (табл. 1). В 2016 г. наличие микрочастиц с ^{60}Co отмечено в слое на глубине 10–13 см, что объясняется последующим ежегодным осадконакоплением. Присутствие микрочастиц с ^{60}Co в слое 10–13 см может служить маркером времени (2006 г.) для расчета скорости и хронологии осадконакопления. Для донных отложений районов Каргино и Стрелка, удаленных на 240–250 км от ГХК, в 2007 и 2008 г. также были обнаружены микрочастицы с ^{60}Co в поверхностных (0–10 см) и верхних (10–16 см) слоях кернов. Отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в этих слоях варьировало от 1.5 до 2.0 и отличалось от отношения радионуклидов в период до паводка (3.8–6.3). В 2012 и 2015 г. наши исследования продолжали регистрировать присутствие микрочастиц ^{60}Co в верхних слоях кернов этих удаленных районов, и рассчитанные отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (0.3–1.6) для этих слоев свидетельствовали о повышенном содержании ^{60}Co (табл. 1).

При анализе влияния паводка 2006 г. на содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях нами основное внимание было уделено присутствию ^{60}Co и отношению $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в поверхностных слоях кернов. Как уже отмечали, во время паводка 2006 г. произошло значительное поступление ^{60}Co в донные отложения с территории ГХК. В другие экстремальные паводки, например, 1966 г., с территории ГХК произошел смыв радионуклида ^{137}Cs и перенос радиоактивных донных отложений на большие расстояния по течению реки [2, 4]. Для представления масштаба радиоактивного загрязнения донных отложений отдельных районов реки на рис. 2 приведены вертикальные распределения техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{60}Co и ^{152}Eu) по слоям кернов, отобранных вблизи сбросов ГХК (с. Б. Балчуг), а также на значительном расстоянии по течению реки (с. Стрелка) в разные периоды времени после паводка 2006 г. Для кернов района Балчуг в 2006 и 2010 г. характерно наличие максимума ^{137}Cs в средней части кернa с активностью до 5000 Бк/кг, что может быть связано с поступлением ^{137}Cs в экстремальные паводки 1966 или 1988 г. [7]. В слоях с экстремумами по содержанию ^{137}Cs не отмечено максимальной активности ^{60}Co и ^{152}Eu . Как уже отмечали, максимальная активность ^{60}Co регистрируется в этот период времени в поверхностном слое (табл. 1) и при этом наблюдается некоторое возрастание в поверхностных слоях и ^{152}Eu . Содержание радионуклида ^{137}Cs не изменяется в поверхностных слоях периода паводка 2006 г. (рис. 2), что выглядит довольно неожиданно по сравнению с поступлением ^{137}Cs с территории ГХК во время других паводков. При рассмотрении распределения радионуклидов в кернax, отобранных в 2015–2016 гг. (Балчуг-2016 и Стрелка-2016), следует отметить наличие в глубине нескольких максимумов ^{137}Cs и ^{152}Eu , что также может быть связано с эффектами паводков 1966 или 1988 г. В верхней части кернов четко виден максимум ^{60}Co – результат паводка 2006 г. В керне Балчуг-2016 максимум ^{60}Co совпадает с максимумом ^{152}Eu , что позволяет предположить поступление в р. Енисей не только ^{60}Co , но и ^{152}Eu во время паводка 2006 г. Следует еще раз повторить, что значительного поступления ^{137}Cs в этот период не отмечено (рис. 2).

Из приведенных в табл. 1 и рис. 2 данных следует, что слои донных отложений с повышенным содержанием ^{60}Co в первые годы после паводка 2006 г. были на поверхности кернов, а спустя почти 10 лет после паводка – регистрируются уже на глубине 10–13 см от поверхности. Это объясняется ежегодным осадконакоплением и отсутствием миграции ^{60}Co в соседние слои. Повышенное содержание ^{60}Co в отдельных слоях кернов, особен-

Таблица 1. Удельная активность ^{60}Co и ^{137}Cs в верхних слоях донных отложений реки Енисей до и после паводка 2006 г.

| Район и год отбора | Глубина, см | $^{137}\text{Cs}^*$, Бк/кг | $^{60}\text{Co}^*$, Бк/кг | $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ | Микрочастицы с $^{60}\text{Co}^*$, Бк/проба** |
|--------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|--|
| Балчуг-1999 | 0–4 | 333 | 73 | 4.6 | — |
| | 4–7 | 322 | 127 | 2.5 | — |
| | 7–10 | 292 | 48 | 6.0 | — |
| Стрелка-2004 | 0–5 | 282 | 45 | 6.3 | — |
| | 5–8 | 250 | 53 | 4.7 | — |
| | 8–11 | 270 | 72 | 3.8 | — |
| Балчуг-2006 | 0–5 | 270 | 1100 | 0.2 | 18 |
| | 5–8 | 377 | 533 | 0.7 | — |
| | 8–11 | 209 | 155 | 1.3 | — |
| Балчуг-2008 | 0–5 | 250 | 257 | 1.0 | — |
| | 5–8 | 217 | 486 | 0.5 | 13 |
| | 8–11 | 362 | 402 | 0.9 | — |
| | 11–14 | 838 | 278 | 3.0 | — |
| Балчуг-2010 | 0–3 | 369 | 587 | 0.6 | 10 |
| | 3–6 | 494 | 358 | 1.4 | — |
| | 6–9 | 742 | 60 | 12.3 | — |
| | 9–12 | 785 | 54 | 14.5 | — |
| Балчуг-2016 | 0–4 | 140 | 20 | 7.0 | — |
| | 4–10 | 176 | 105 | 1.7 | — |
| | 10–13 | 153 | 106 | 1.4 | 21 |
| | 13–16 | 80 | 6 | 13.2 | — |
| Стрелка-2006 | 0–5 | 110 | 74 | 1.5 | — |
| | 5–8 | 134 | 40 | 3.4 | — |
| | 8–11 | 114 | 42 | 2.7 | — |
| Каргино-2007 | 0–10 | 175 | 97 | 1.8 | 9 |
| | 10–13 | 163 | 45 | 3.6 | — |
| | 13–16 | 270 | 123 | 2.2 | — |
| Каргино-2008 | 0–7 | 81 | 30 | 2.7 | — |
| | 7–10 | 78 | 45 | 1.7 | — |
| | 10–13 | 72 | 42 | 1.7 | 3 |
| | 13–16 | 63 | 42 | 1.5 | 4 |
| | 16–19 | 69 | 18 | 3.8 | — |
| Стрелка-2008 | 0–3 | 53 | 11 | 4.8 | — |
| | 3–6 | 61 | 42 | 1.5 | — |
| | 6–9 | 48 | 24 | 2.0 | 3 |
| | 9–12 | 38 | 25 | 1.5 | — |
| Стрелка-2012 | 0–3 | 26 | 7 | 3.7 | — |
| | 3–6 | 33 | 110 | 0.3 | 5 |
| | 6–9 | 39 | 9 | 4.3 | — |
| | 9–12 | 48 | 16 | 3.0 | — |
| Стрелка-2015 | 0–9 | 50 | 5 | 10.0 | — |
| | 9–12 | 54 | 33 | 1.6 | — |
| | 12–15 | 55 | 22 | 2.5 | — |
| | 15–18 | 40 | 5 | 8.0 | — |

Примечание. Жирным выделены слои с микрочастицами ^{60}Co ; * – активности радионуклидов приведены на дату отбора; ** – максимальная активность ^{60}Co в малой пробе донных отложений после квартования.

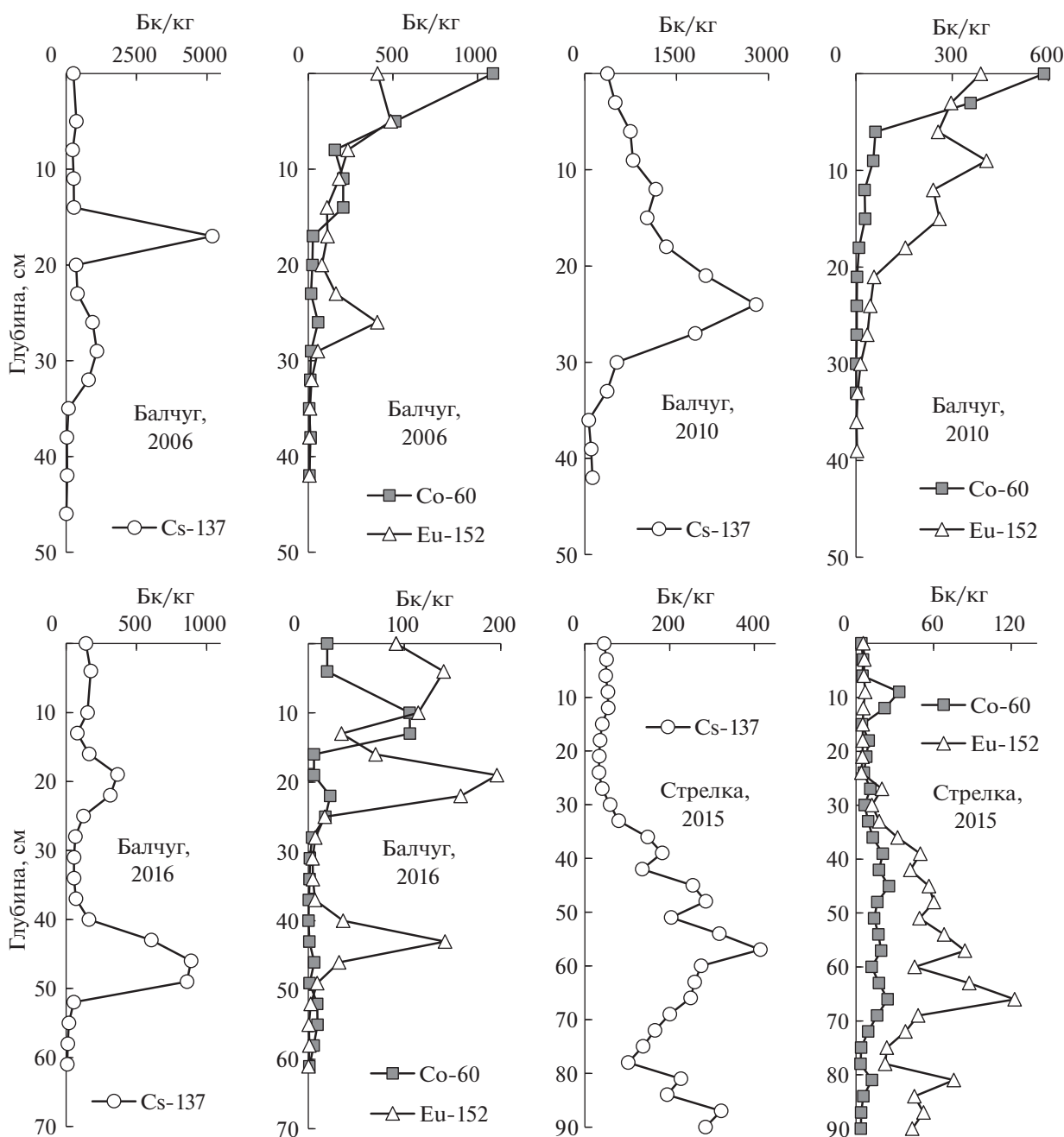


Рис. 2. Вертикальное распределение ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{152}Eu в донных отложениях поймы р. Енисей вблизи сел Б. Балчуг и Стрелка после паводка 2006 г.

но в форме микрочастиц, может служить маркером даты (2006 г.) для расчета скорости осадконакопления и последующей датировки слоев. При допущении постоянства средней скорости осадконакопления нами были рассчитаны датировка слоев керна Балчуг-2010, отобранного в 2010 г. (рис. 3). В поверхностном слое 0–3 см этого керна были выявлены микрочастица ^{60}Co и отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co} = 0.6$ (табл. 1), т.е. это соотношение радионуклидов соответствует условиям

маркера 2006 г. На основании расчета средняя скорость осадконакопления района Балчуг-2010 составила 0.6 см/год. Ранее мы предполагали, что максимум ^{137}Cs в средней части керна связан с поступлением радионуклидов во время одного из больших паводков 1966 или 1988 г. Датировка слоев с использованием маркера ^{60}Co показала, что время образования максимума ^{137}Cs в керна (рис. 3) с учетом ошибки расчетов совпадает с паводком 1966 г. На рис. 3 паводок 1988 г. проявился

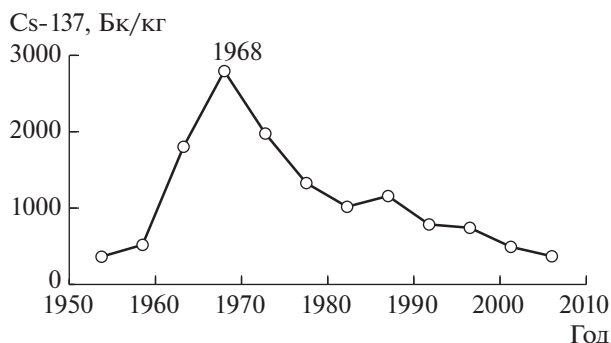


Рис. 3. Датировка ^{137}Cs в керне Балчуг-2010 на основании расчета средней скорости осадконакопления (0.6 см/год) по содержанию ^{60}Co в форме микрочастиц паводка 2006 г. в поверхностном слое.

небольшим пиком ^{137}Cs , по сравнению с максимумом ^{137}Cs паводка 1966 г. Дополнительным фактом в пользу датировки максимума ^{137}Cs паводком 1966 г. служит отношение радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co} = 1000$ в этом слое, которое соответствует отношению $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ для слоев паводка 1966 г. из работы [4] с учетом распада ^{60}Co . В предыдущей нашей работе [8] для района Балчуг скорости седиментации рассчитывали по отношению $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и скорости были несколько выше — 1.05 и 1.25 см/год. Различия полученных скоростей седиментации для района Балчуг в данной работе и нашей публикации ранее [8] могут быть обусловлены не только гидрологическими условиями на разных точках отбора, но и разными геолого-минералогическими характеристиками донных отложений.

В работе [6] анализировали обнаруженные в 2007–2008 гг. вблизи ГХК частицы с высокой активностью ^{60}Co методом электронной микроскопии с рентгеновским анализатором. Было показано, что элементный состав частиц с ^{60}Co соответствовал составу нержавеющей стали, из которой изготовлены трубы в водной системе охлаждения ядерного реактора. Известно, что в активной зоне реактора нейтронный поток активирует стабильные элементы металлических конструкций и превращает их в радиоактивные элементы. Вероятно, основным источником таких радиоактивных частиц являлась коррозия материалов активной зоны реактора, так как теплоноситель активной зоны (вода) уносил продукты коррозии в Енисей. Среди радиоактивных элементов материалов реактора ^{60}Co имеет относительно большой период полураспада, что позволило радионуклиду длительное время существовать не только в конструкциях реактора, но и в Енисее.

Ранее γ -спектрометрический анализ проб верхних слоев кернов донных отложений реки Енисей постоянно обнаруживал ^{60}Co [2, 3]. В работе Сухорукова и соавт. [2] проводили квартование пробы пойменной почвы р. Енисей из района

вблизи ГХК на малые пробы массой 30 г и по результатам γ -спектрометрии проб выявили неоднородность в распределении радионуклидов в пойменной почве. Факт неоднородности распределения радионуклидов объяснялся авторами работы присутствием радиоактивных микрочастиц. Среди таких микрочастиц отмечались и частицы с ^{60}Co , аналогично результатам нашей работы для проб донных отложений (табл. 1). Присутствие частиц с ^{60}Co в пробах поймы реки Енисей, отобранных до паводка 2006 г. [2], свидетельствует об их поступлении в Енисей с территории ГХК в периоды предыдущих паводков. Активационные ^{60}Co частицы реакторного происхождения характерны не только для районов воздействия ГХК, ранее такие частицы были обнаружены в бухте Чажма (Японское море) после аварии на атомной подводной лодке в 1985 г. В работе [9] отмечали, что главным компонентом радиоактивного загрязнения бухты стал коррозионный ^{60}Co (из систем охлаждения реактора) в форме радиоактивных частиц. В состав частиц входили как элементы ядерного топлива (уран), так и элементы состава нержавеющей стали. Спустя 15 лет после аварии в 2000 г. частицы, содержащие ^{60}Co , были выделены из слоя керна донных осадков на глубине 10–15 см и удельная активность ^{60}Co в частицах достигала 10^{10} Бк/кг. Присутствие частиц с ^{60}Co на глубине 10–15 см донных отложений свидетельствует об отсутствии существенной вертикальной миграции частиц по глубине керна спустя 15 лет после радиационной аварии. На основании вышеотмеченной работы [9] можно в будущем рассчитывать скорости осадконакопления данного района бухты, используя ^{60}Co как маркер даты 1985 г. и провести датировку слоев донных отложений бухты тем же методом, что и в нашей работе (рис. 3).

Во время международных радиоэкологических экспедиций, проведенных в Карском море и Енисейском заливе в 2000–2001 гг. [10, 11], в верхних слоях кернов донных отложений было отмечено от-

носителем высокое содержание ^{137}Cs до 80 Бк/кг, которое авторами объяснялось поступлением ^{137}Cs из разных источников (глобальные выпадения после ядерных испытаний на Новой Земле и Чернобыльской аварии, радиоактивные сбросы ГХК и др.). Однако в этих слоях кернов был зарегистрирован ^{60}Co с активностью до 6 Бк/кг, и этот радионуклид стал маркером радиоактивных сбросов ГХК. В работе [10] отмечено, что максимальная активность ^{60}Co регистрируется в верхнем 5-см слое. Это означает, по мнению авторов, продолжающееся поступление ^{60}Co в р. Енисей, несмотря на остановку прамоточных реакторов ГХК. Используя данные вышеотмеченной работы [10], можно рассчитать отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co} = 7-8$ в поверхностных слоях донных отложений Енисейского залива. Это отношение несколько выше отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (3.8–6.3) для поверхностных слоев донных отложений района Стрелка на расстоянии 250 км от ГХК (табл. 1). Следовательно, не менее половины от зарегистрированного ^{137}Cs поступило в донные отложения Енисейского залива именно со сбросами ГХК, который находится на расстоянии около 2000 км выше по течению реки. Эти экспедиционные данные были получены в 2000–2001 гг., т.е. до паводка 2006 г. на реке Енисей. Данные о регистрации ^{60}Co в донных отложениях Енисейского залива и Карского моря после 2006 г. нам неизвестны.

Таким образом, в период паводка 2006 г. в поверхностных слоях донных отложений реки Енисей вблизи ГХК и на удалении 250 км от ГХК по течению реки было зарегистрировано повышенное содержание радионуклида ^{60}Co , в том числе в форме радиоактивных частиц. Отношение $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ в поверхностных слоях донных отложений после паводка варьировало от 0.2 до 1.0 и существенно отличалось от отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (2.5–6.0) в поверхностных слоях до паводка. Спустя 5–10 лет после паводка в вертикальном распределении радионуклидов по глубине в верхней части керна регистрируется пик ^{60}Co . Повышенное содержание ^{60}Co в слоях кернов, особенно в форме микрочастиц, может служить маркером даты 2006 г. для расчета скорости осадконакопления и датировки поступления радионуклидов в донные отложения. Проведенная датировка керна Балчуг-2010 с использованием маркера ^{60}Co показала, что основной максимум ^{137}Cs логично датируется паводком 1966 г. Полученные нами данные свидетельствуют о поступлении в период паводка 2006 г. с территории ГХК в Енисей радионуклида ^{60}Co и его переносе в составе донных отложений на расстояние до 250 км от ГХК. В настоящее время удельная активность ^{60}Co в донных отложениях, учитывая короткий период полураспада, не представляет радиационной опасности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Косиненко Сергея Васильевича, ведущего инженера Института биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, за участие в отборе проб и аналитические исследования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

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., Белолитецкий В.М., Болсуновский А.Я., Ковалев С.И., Косолапова Л.Г., Мельгунов М.С., Рапута В.Ф. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филлиал “Гео”, 2004. 286 с.
3. Bolsunovsky A. Artificial Radionuclides in Sediment of the Yenisei River // Chemistry and Ecology. 2010. V. 26. № 6. P. 401–409.
4. Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В., Вахрушев В.И. Масштабный перенос техногенных радионуклидов по течению реки Енисей во время экстремального паводка 1966 года // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 2. С. 189–194.
5. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). СП 2.6.1.2612–10. М.: Моргкнига, 2022. 100 с.
6. Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A., Lind O.C., Salbu B. Unique Diversity of Radioactive Particles Found in the Yenisei River Floodplain // Scientific Reports. 2017. 7. Art. No. 11132. P. 1–10.
7. Бабкин В.И. О регулировании речного стока в XXI веке. М.: Триумф, 2018. 215 с.
8. Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В., Косиненко С.В. Использование радиоизотопных 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.
9. Куимова Н.Г., Павлова Л.М., Сергеев А.Ф., Лукичев А.А., Моисеенко В.Г. Бактериальная деструкция радиоактивных частиц // ДАН. 2004. Т. 397. № 3. С. 412–415.
10. Никитин А.И., Сурнин В.А., Новицкий М.А., Валетова Н.К., Кабанов А.И. и др. Радионуклиды и тяжелые металлы в Енисейском заливе в 2001 г. // Метеорология и гидрология. 2005. № 4. С. 56–65.
11. Standing W.J.F., Stepanets O., Brown J.E., Dowdall M., Borisov A., Nikitin A. Radionuclide Contamination of Sediment Deposits in the Ob and Yenisey Estuaries and Areas of the Kara Sea // Journal of Environmental Radioactivity. 2008. V. 99. P. 665–679.

RADIONUCLIDE ^{60}Co AS A MARKER FOR ASSESSING THE SCALE OF TRANSFER OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER IN THE FLOOD OF 2006

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

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

^b Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

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

Presented by Academician A.G. Degermendzhi April 7, 2022

Studies of bottom sediments of the Yenisei River from 2006 to 2016 near the Mining and Chemical Combine (MCC) and at a distance up to 250 km from the MCC along the river revealed an increased content of the ^{60}Co (including radioactive microparticles) in the upper layers. The increase of the specific activity of ^{60}Co in the river floodplain was due to the extreme flood of 2006. The $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ ratio in the surface layers of bottom sediments after the flood varied from 0.2 to 1.0 and significantly differed from the $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ ratio (2.5–6.0) in the surface layers before the flood. The increased content of ^{60}Co in the upper layers of bottom sediments can use as a marker of the 2006 event for calculating the rate of sedimentation and dating the entry of radionuclides into bottom sediments.

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