

Основные черты распределения техногенных радионуклидов в аллювиальных почвах и донных осадках реки Енисей

Ф. В. СУХОРУКОВ, М. С. МЕЛЬГУНОВ, С. И. КОВАЛЕВ

Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты по распределению техногенных радионуклидов в почвах, донных осадках и растениях в ближней зоне влияния Красноярского горно-химического комбината (ГХК) (о-в и коса Атамановские, Балчуговская протока) и на о-ве Городском у г. Енисейска. В ближней зоне в почвах и донных осадках постоянно обнаруживаются ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{60}Co и в водорослях, кроме того, ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co и ^{65}Zn . В почвах о-ва Городской доминирует ^{137}Cs . Основными формами нахождения в почвах указанных радионуклидов являются органокомплексы, хемосорбция (поверхностная и межслоевая) на минеральных частицах и активные частицы. Суммарные запасы радионуклидов на о-ве и косе Атамановской составляют чуть больше 2 Ки. Распределение радионуклидов в почвах пространственно и по вертикали неравномерное, и в ряде случаев (ухвостье о-ва Атамановский, мелкие участки с активными частицами на косе и острове, активный слой на о-ве Городском) они могут быть отнесены к твердым радиоактивным отходам, требующим утилизации.

После аварии на ЧАЭС резко увеличилось количество работ по геохимии техногенных радионуклидов в окружающей среде (ОС), в том числе и по выявлению территорий былых и остаточных радиоактивных загрязнений, связанных с испытаниями ядерных устройств, работой атомных производств и захоронением радиоактивных отходов. Результаты этих работ, полученные в нашей стране и за рубежом, изложены в многочисленных публикациях. В них приводятся данные по геохимии большой группы радионуклидов в почвах, растениях, донных осадках вод, пищевых продуктах; по характеру и степени загрязнения радионуклидами разнообразных ландшафтов от самых разных источников.

Особый интерес представляют загрязнения, обусловленные функционированием производств по наработке изотопов плутония, в число которых входит и ГХК [1]. Сведения о ха-

рактере и масштабах загрязнения окружающей среды ландшафтов р. Енисей в результате его деятельности появились в последние 3–4 года [2–7, 11]. В них показано, что загрязнению подверглись аллювиальные почвы затопляемой части островов и берегов Енисея на расстоянии, превышающем 1000 км от источника. В работах [2–6] приводятся данные по загрязнению вод, донных отложений, почв и растений большим спектром радионуклидов от короткоживущего ^{24}Na до вечного ^{239}Pu . Показано, что вниз по течению наблюдается постепенное уменьшение плотности радиоактивного загрязнения и меняются качественный состав радионуклидов и их количественные соотношения.

В работе [7] называются радионуклиды, связанные с реакторным производством и работами радиохимического завода, перерабатывающего облученный уран. Твердые радиоактивные отходы (РАО) обычно содержат ^{51}Cr ,

^{54}Mn , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{95}Zn , ^{95}Nb , $^{141,144}\text{Ce}$, ^{137}Cs , ^{238}U , ^{239}Pu ; жидкие высоко- и среднеактивные отходы содержат радионуклиды U, Pu, Ru, Np, Th, Zr, Nb, Ce, Sr и Cs. Суммарная активность только жидких радиоактивных отходов (ЖРО) на предприятии более $1.08 \cdot 10^8$ Ки. В работе [7], кроме того, дается и характеристика всех видов хранилищ РАО, включая полигон Северный, где производится закачка слабоактивных ЖРО в два пласта-коллектора (на глубину 370–465 и 180–280 м), область питания которых находится к югу от полигона, а областью разгрузки является долина р. Кан (12–14 км от полигона) и частично р. Тель (для верхнего горизонта).

Проведенные нами исследования аллювиальных почв и донных осадков ближайших к сбросу островов (в основном о-ва Атамановский, протоки и залива Б. Балчуг) показали, что в них накоплены большие количества долгоживущих радионуклидов, главным образом ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{60}Co [6]. Кроме названных радионуклидов в почвах и донных осадках обнаруживаются ^{154}Eu , ^{155}Eu и в активных частицах ^{134}Cs , а в водорослях у косы Атамановской еще и ^7Be , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{65}Zn . Исследование почв о-ва Городского (г. Енисейск, более 250 км от сброса) и донных осадков вблизи него подтвердило ранее установленные факты загрязнения аллювиальных почв ухвостья острова долгоживущими изотопами Eu и ^{137}Cs со своими особенностями вертикального распределения и литологического контроля радиоактивности.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Выбор мест пробоотбора

На первом этапе были выбраны для изучения, с одной стороны, о-в и коса Атамановские, как наиболее близко расположенные к источнику загрязнения и имеющие все типичные для других пойменных элементов ландшафта р. Енисей почвы, с другой – почвы острова (сегодня и уже длительное время полуострова) Городской у г. Енисейск, как удаленные более чем на 250 км от ГХК. Обзорная схема расположения мест пробоотбора дана на рис. 1.

Места отбора проб на о-ве Атамановском указаны на схеме (см. рис. 1). На косе Атама-

новской отбор проб проведен в близкорасположенных точках (20 м) у тура.

Донные осадки обследованы у о-ва Атамановский, в Балчуговской протоке и в районе г. Енисейска (ухвостье о-ва Городского и в 500 м выше ухвостья по течению р. Енисей в протоке, на левом его берегу).

Водоросли отобраны в ухвостье Атамановской косы, в протоке между косой и правым берегом р. Енисей.

Пробоотбор и пробоподготовка

Пробы почв отбирали путем задавливания (или забивания) металлического кольца диаметром 82 и высотой 50 мм. Объем проб составлял 264 м^3 . Донные осадки отбирали специальным пробоотборником (спаренные трубы диаметром 110 мм каждая), а на о-ве Атамановский – эмалированным черпаком.

Керн донных осадков разрезали вдоль оси на две половины для детального описания и затем опробовали каждые 30 мм.

Все пробы почв и донных осадков доводили до воздушно-сухого состояния и взвешивали. Отбор проб кольцом и пробоотборником и последующее взвешивание обеспечивают определение (плотности) проб, что позволяет оценивать не только активность радионуклидов (Бк/кг), но и запас загрязнения (Ки/км²).

Пробы водорослей отобраны с лодки путем отрыва их от дна лодочным якорем, затем высушены при комнатной температуре.

Пробы мха и хвойных опавов собирали вручную с определенной площади и высушивали при температуре не выше 30 °С.

Водоросли, мох и хвойные опавы прессовали в таблетки для изучения на сцинтилляционных и полупроводниковых детекторах.

Вся пробоподготовка, кроме сушки водорослей (она проведена в ИБФ СО РАН, г. Красноярск), осуществлялась в Аналитическом центре ОИГГМ СО РАН.

Ядерно-физические методы анализа

Изучение радионуклидного состава отобранных образцов проводилось в лаборатории геохимии редких элементов и экогеохимии Аналитического центра ОИГГМ СО РАН методом высокоразрешающей полупроводниковой гам-

ма-спектрометрии. В качестве аналитического оборудования при этом использовались две независимые измерительные линейки на основе:

1) коаксиального HP Ge полупроводникового детектора EGPC 20–1.80-SHF 00 30A (производство фирмы EURISYS MEASURES (Франция), относительная эффективность 20 %, разрешение по линии 1332 кэВ (Co-60) – 1,8 кэВ), периферийного спектрометрического

оборудования, многоканального анализатора PCA III–4000 в составе ПК IBM PC и программы обработки гамма-спектров INTERWINNER-GAMMA той же фирмы;

2) коаксиального Ge(Li) полупроводникового детектора ДГДК-100В (производство ИФТП, г. Дубна, чувствительность регистрации для энергии 1332 кэВ – 100 мм², разрешение по линии 1332 кэВ – 2,6 кэВ), периферий-

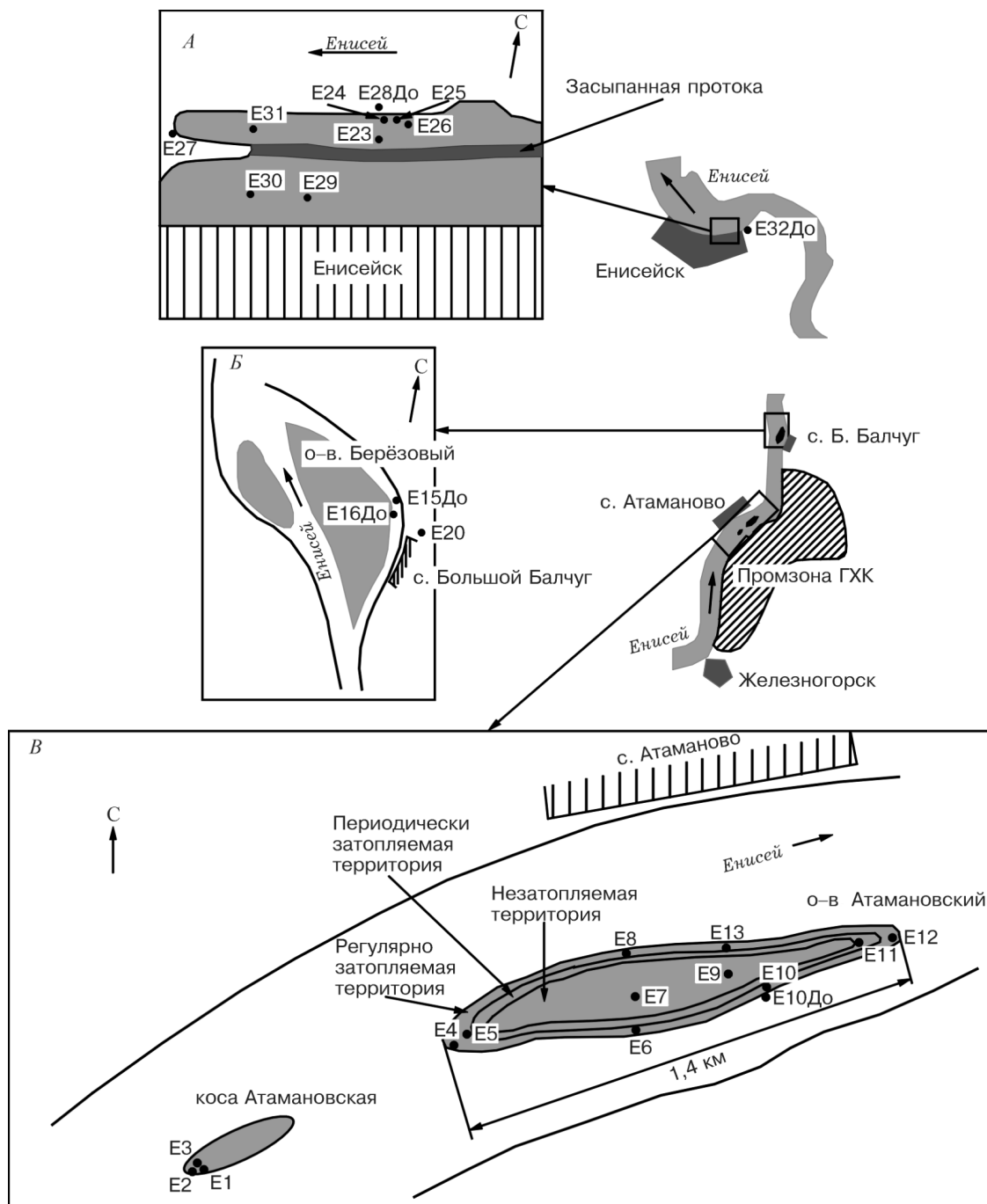


Рис. 1. Схема отбора проб на островах Городском (А), Березовом (Б), Атамановском и косе Атамановской (В).

ного спектрометрического оборудования, многоканального анализатора АЦП-8К-2 в составе ПК IBM PC и программы обработки гамма-спектров ANGAMMA фирмы "АСПЕКТ" (г. Дубна).

Используемый тип оборудования позволял проводить измерение гамма-линий в диапазоне от 100 до 2000 кэВ.

Помимо этого в ряде случаев для определения естественных (U(Ra), Th, K) и техногенных (^7Be , ^{137}Cs) радионуклидов применялся также метод низкофоновой сцинтилляционной гамма-спектрометрии на основе низкофонового сцинтилляционного детектора с кристаллом NaI(Tl) 200 × 200 (с колодцем 70 × 150).

Для защиты от естественного фонового излучения применяли радиационно чистый свинец и вольфрам. При необходимости измерения проводили в стальной камере низкого фона "КАНИФЕР", с толщиной стенок 20 см, расположенной в помещении на глубине 9 м с 3-метровым бетонным перекрытием и 2-метровым слоем грунта на поверхности. Остаточный фон камеры составляет 0,1 мкР/ч (при фоне на поверхности земли 12–15 мкР/ч), из них 50 % составляет вклад проникающего космического излучения, 30 % флуктуаций фона определяет уровень концентрации радона в подземном помещении, который может значительно колебаться. Устранение влияния этой компоненты достигается путем закачки воздуха через фильтр с высоты 10 м над поверхностью земли и выдавливанием радона из помещения измерительной камеры [8].

Для повышения эффективности регистрации аналитического сигнала в пробах большого объема измерения проводили в сосудах Мариелли объемом 300 см³. Масса навески исследуемых образцов составляла от 200 до 400 г. Время замера образцов определялось уровнем активности анализируемых изотопов и изменялось от 2–3 до 24 ч.

Измерения проб почв и донных отложений показали, что помимо изотопов, соответствующих продуктам радиоактивного распада естественных ^{238}U и ^{232}Th , а так же ^{40}K , в той или иной мере в них присутствуют долгоживущие радионуклиды техногенного происхождения: ^{152}Eu (период полураспада 13,2 года), ^{154}Eu (8,5 года), ^{155}Eu (4,96 года), ^{137}Cs (30,15 года), ^{60}Co (5,271 года). Типичный гамма-спектр активной пробы из района о-ва Атамановский, полученный на полупроводниковом детекторе, представлен на рис.

2. В некоторых пробах отмечено присутствие ^{134}Cs (2,066 года). В отдельных образцах донных отложений в ближней от сброса зоне кроме указанных выше обнаружены также короткоживущие изотопы ^7Be (53,3 сут), ^{46}Sc (83,3 сут), ^{51}Cr (27,7 сут), ^{54}Mn (312,5 сут), ^{59}Fe (44,5 сут), ^{58}Co (70,8 сут), ^{65}Zr (243,9 сут).

Калибровку спектрометрических трактов по эффективности для расчета активностей изотопов проводили с использованием:

1. Силикатного стандартного образца равновесной урановой руды УР 047 С с содержанием урана 470 г/т.

2. Стандартного образца, приготовленного на основе кварцевой крупки и образцового радиоактивного раствора ^{152}Eu (свидетельство № 42280.74558 ГНМЦ ВНИИФТРИ Госстандарта России, 1997 г.).

Пределы обнаружения всех радионуклидов для полупроводниковой гамма-спектрометрии составили: при измерении с обычной защитой – от 2 до 5 Бк/кг, при использовании камеры низкого фона – от 0,5 до 1 Бк/кг. При расчете активностей радиоизотопов не учитывалась возможная неравномерность их распределения по объему исследуемого образца.

Метод определения форм подвижности радионуклидов

Для определения форм нахождения радиоизотопов в аллювиальных почвах проводили их выщелачивание: а) дистиллированной водой; б) ацетатно-аммониевым буфером с pH 4,8; в) 1MНNO₃; г) 5MНNO₃ – в соответствии с [9, 10].

Методика подсчета запасов радионуклидов в почвах

Оценка запасов радионуклидов проведена только для регулярно и периодически затопляемой зон о-ва Атамановский и косы Атамановской. Для подсчета запасов оцениваемая территория о-ва Атамановского была разделена на 7 блоков, каждый из которых характеризуется одной точкой наблюдения (в голове острова двумя точками) (см. рис. 1). Территорию Атамановской косы не разделяли на блоки. Запас радионуклидов в каждом блоке получен путем умножения плотности загрязнения, выраженной в величине активности на единицу площади, на площадь блока. Общий запас радионук-

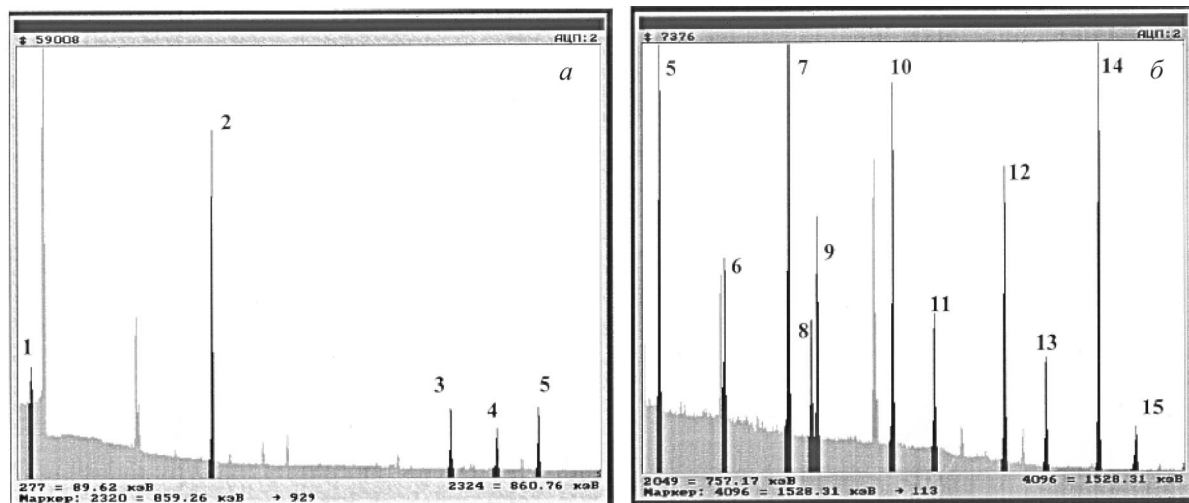


Рис. 2. Гамма-спектр типичной активной пробы из района о-ва Атамановского. Дата замера 27 ноября 1998 г., время замера 47830 с. На рисунках *a* и *б* представлены разные энергетические диапазоны регистрации одного спектра. Выделенные пики соответствуют гамма-линиям долгоживущих техногенных радионуклидов (см. таблицу). Остальные пики являются либо фоновыми, либо линиями продуктов распада естественных U и Th, либо линиями присутствующих в пробе техногенных радионуклидов, не используемыми для расчетов.

Таблица гамма-линий

№	Энергия, кэВ	Фон импульс	Площадь импульс	Нуклид	№	Энергия, кэВ	Фон импульс	Площадь импульс	Нуклид
1	105,32	154892	29375	Eu-155	9	1004,83	11710	28574	Eu-154
2	344,37	47593	270798	Eu-152	10	1112,11	9808	47286	Eu-152
3	661,71	30843	55336	Cs-137	11	1173,31	9186	17963	Co-60
4	723,31	31221	37000	Eu-154	12	1274,46	3475	40815	Eu-154
5	779,00	20713	59677	Eu-152	13	1332,56	1667	15839	Co-60
6	873,33	19685	17946	Eu-154	14	1408,08	697	57726	Eu-152
7	964,11	14878	56272	Eu-152	15	1460,39	440	5952	K-40
8	996,36	12739	14768	Eu-154					

лидов в затопляемой зоне получен путем суммирования запасов в каждом блоке. Так как ни в одном разрезе не зафиксировано исчезновения техногенных радионуклидов в нижних горизонтах, полученную оценку запасов следует рассматривать как минимальную. Дополнительное опробование и анализ мелкозема галечников подстилающей почвы, проведенные осенью 1998 г., показывают их зараженность ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{60}Co , заметно убывающую на глубине в пределах 40 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы

На затопляемой в паводок косе Атамановской опробованы два разреза почв (рис. 3 – Е1, Е3). Из рисунков видно, что наиболее неравномерно в разрезах распределены ^{152}Eu , ^{154}Eu и

^{137}Cs , одинаковую активность по всему профилю имеют ^{60}Co , ^{155}Eu , ^{40}K . Равномерное распределение природного ^{40}K указывает на мало меняющийся минеральный состав почв, в которых основными его носителями являются калиевые полевые шпаты и гидрослюда. Отсутствие заметного снижения количеств радионуклидов в нижних частях разрезов указывает на необходимость опробования почв до подстилающих их галечников или коренных пород, что особенно важно для оценки их запасов.

На о-ве Атамановском выделяются три зоны почв с различным режимом обводнения: затопляемые, периодически затопляемые и незатопляемые.

Затопляемые и периодически затопляемые зоны сложены аллювиальными песчанистыми и супесчанистыми почвами с меняющимся (небольшим) количеством гумуса. В ежегодно за-

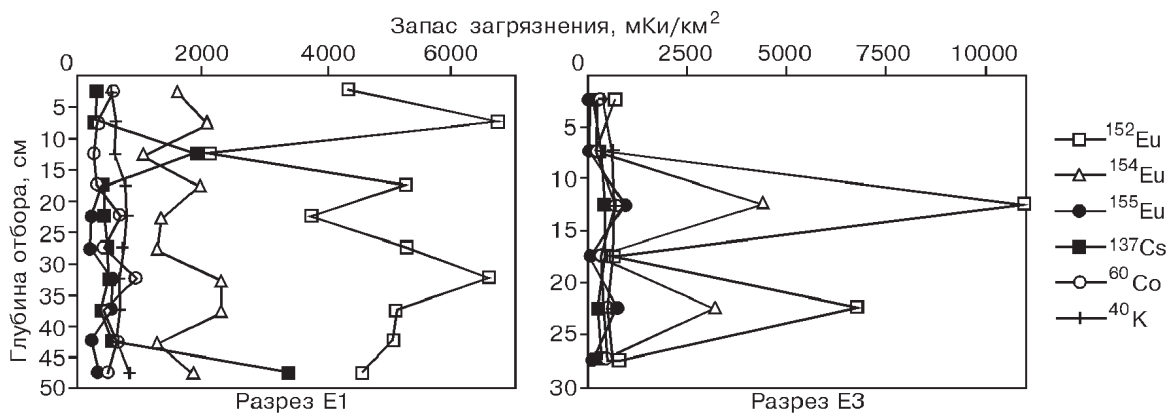


Рис. 3. Графики распределения радионуклидов в почвах косы Атамановской.

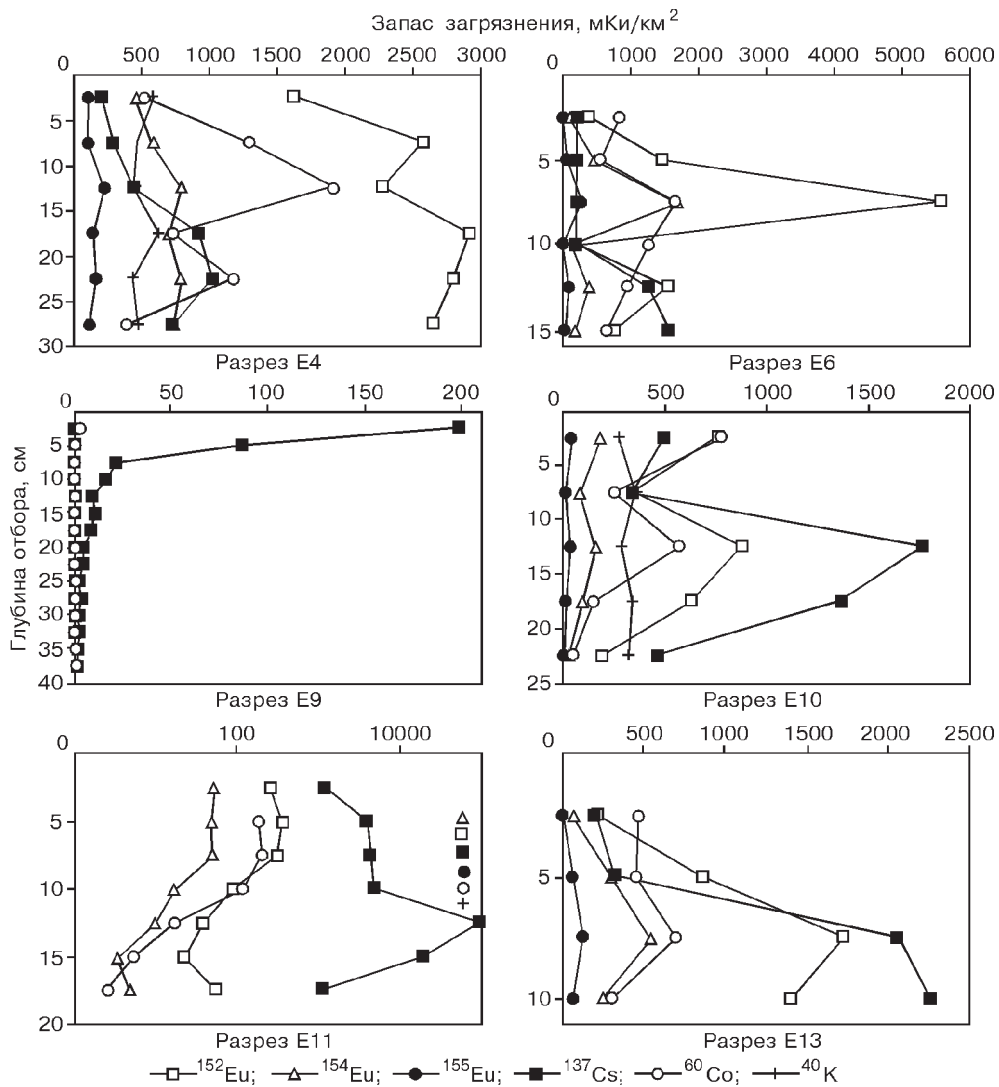


Рис. 4. Графики распределения радионуклидов в почвах о-ва Городской (г. Енисейск).

топяемой зоне почва задернована и покрыта травянистой растительностью, среди которой преобладают осока и злаки. Здесь изучено 10 разрезов почв. Данные по активностям (содержаниям) радионуклидов и вертикальному их распределению для шести из них даны на рис. 4, из которого видно, что на фоне четко выраженного доминирования ^{152}Eu над другими изотопами в голове острова (разрез Е4) хорошо проявлены несущественное уменьшение активности всех изотопов на глубине и заметное снижение плотности загрязнения в верхнем 5-сантиметровом слое (дерне). В ухвостье острова в суммарном загрязнении почв возрастает доля ^{137}Cs , а плотность загрязнения достигает $126 \text{ Ки}/\text{км}^2$ (разрез Е11). В этих разрезах также не наблюдается полного исчезновения радионуклидов в нижних их частях, хотя все они пройдены до подстилающих галечников. Этот факт указывает на необходимость изучения на радиоактивность галечников, вернее, мелко- и тонкодисперсных их фракций и отмершего бентоса. На разрезе Е9 (незаотпляемая зона) показано распределение радионуклидов в почвенном профиле со слабой активностью, обусловленной в основном ^{137}Cs , которая нарастает снизу вверх и достигает максимума в верхних 10 см. Этот пример типичного распределения ^{137}Cs , поступающего на поверхность почв воздушным путем как от локальных источников, так и от глобальных выпадений. Плотность загрязнения, достигающая $300 \text{ мКи}/\text{км}^2$, значительно превышает уровень глобальных выпадений для этих широт и обязана воздушному поступлению радиоцезия от ГХК, на что указывает и обогащение им хвойной подстилки и обнаружение в ней ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu , которые абсолютно не характерны для глобальных выпадений.

На о-ве Городском (г. Енисейск) радиоактивное загрязнение выявлено на его ухвостье в 90-х гг. В. А. Тимофеевым. Им же в общих чертах охарактеризовано пространственное и вертикальное распределение радионуклидов в почве острова. Нами опробовано 7 разрезов почв и в 4 из них определены ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{40}K (рис. 5 – Е23, Е24). На этих разрезах видно, что на фоне незначительной изменчивости содержаний изотопов европия и ^{40}K наблюдаются значительные вариации содержаний ^{137}Cs , который определяет всю γ -активность почв. Максимальные его количества содержатся в гумусированном тонкопесчанисто-глинистом слое и в разрезе Е23 залегают на глубине 90–105, а в Е24 – 0–15 см. В этом слое запас загрязнения ^{137}Cs достигает десятков $\text{Ки}/\text{км}^2$.

Результаты измерения радиоизотопов в активном слое из разреза Е23 приведены в табл. 1, из которой видно, что ^{152}Eu и ^{60}Co в пределах активного слоя распределены более или менее равномерно, тогда как содержание ^{137}Cs максимально в верхней части слоя и падает вниз вплоть до А21–8, а затем возрастает и сохраняется до конца слоя. Такое распределение активности ^{137}Cs , обусловленное содержанием и качеством гумуса, может иметь два объяснения: 1) гумусированные супесчаные и глинистые слои в замкнутом водоеме были сорбционным барьером и извлекали радиоцезий из вод, в том числе после их перекрытия песчаным аллювием и из дренирующихся через него вод; 2) формирование гумусированного слоя началось с поступления органики и глинистого материала с малым количеством радиоцезия, а закончилось с высоким.

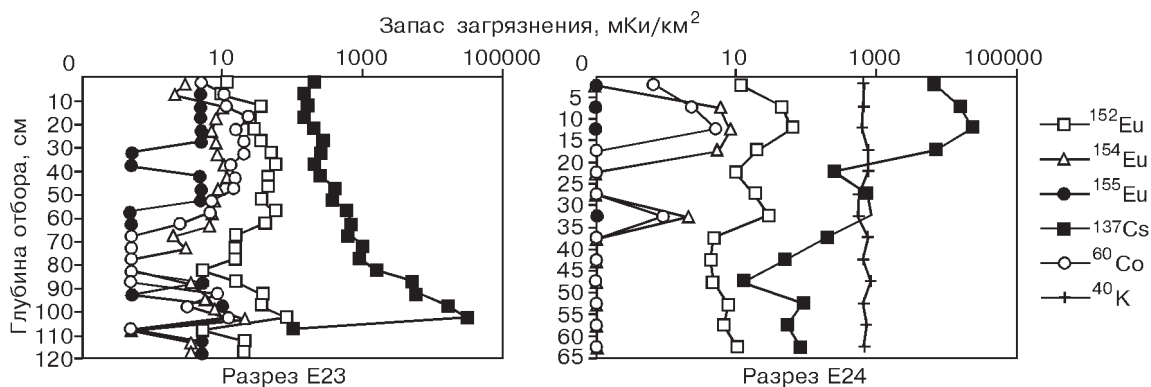


Рис. 5. Графики распределения радионуклидов в почвах о-ва Городской (г. Енисейск).

Содержание радионуклидов в разрезе "активного" горизонта на о-ве Городском

№ п/п	Шифр пробы	Масса	Удельная активность, Бк/кг			
			^{137}Cs	^{134}Cs	^{60}Co	^{152}Eu
1	A21-1	52,7	47 388 ± 2371	3,6 ± 2,4	16 ± 2	68 ± 8
2	A21-2	63,4	45 584 ± 2280		25 ± 6	123 ± 43
3	A21-3	80,1	16 857 ± 845		9 ± 4	32 ± 25
4	A21-4	76,2	17 223 ± 862		16 ± 5	37 ± 27
5	A21-5	77,3	16 167 ± 810		6 ± 4	43 ± 32
6	A21-6	71,8	12 251 ± 615		8 ± 5	15 ± 19
7	A21-7	70,2	11 117 ± 559	1,3 ± 1,0	3,1 ± 0,7	7,7 ± 2,8
8	A21-8	73,2	5523 ± 279		6 ± 3	23 ± 19
9	A21-8a	70,0	14 405 ± 723		2 ± 2	37 ± 32
10	A21-8б	66,6	15 024 ± 755		12 ± 5	60 ± 30
11	A21-8в	66,2	9915 ± 498		8 ± 4	27 ± 21

Если принять второй вариант, необходимо допустить существование промежуточного накопления органики (в старице или заливах), которая длительное время аккумулировала радиоцезий. Измерения в двух слоях ^{134}Cs показало его незначительное количество, что указывает на большой возраст загрязнения (30 и более лет).

Для оценки влияния ГХК на загрязнение радионуклидами почв в ближней зоне на фоне

глобальных выпадений изучены почвы на территории п/л "Таежный" и севернее с. Большой Балчуг (рис. 6 – E14, E20). В них измерены запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Полученные данные по ^{137}Cs (140 мКи/км² в точке E14 и 216 мКи/км² в точке E20) однозначно указывают на поступление части его с выбросами ГХК.

В почвенных профилях как косы Атамановской, так и о-ва Атамановского на разных уров-

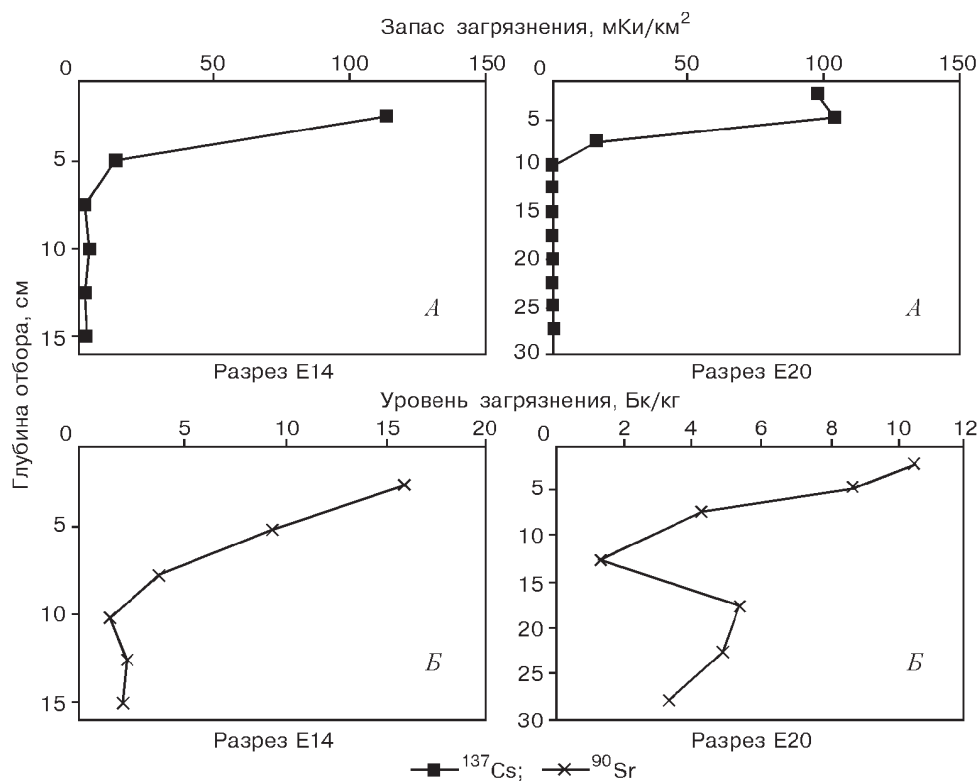


Рис. 6. Графики распределения ^{137}Cs (А) и ^{90}Sr (Б) в почве п/л "Таежный" E14 и д. Б. Балчуг E20.

Т а б л и ц а 2
Активность радиоцезия во фрагментах пробы
косы Атамановской

№ фрагмента	^{137}Cs , Бк	^{134}Cs , Бк	$^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$
1	196 10^3	225	871
2	747 10^3	859	869
3	416 10^3	468	888

нях встречаются активные частицы с высокой удельной активностью радиоцезия. В четырех фрагментах одной из них (коса Атамановская), представленных графитом, измерена активность ^{137}Cs и ^{134}Cs (табл. 2).

Принимая изначальное соотношение ^{137}Cs и ^{134}Cs , как это было при аварии на ЧАЭС, равным 2, возраст активной частицы равен 16 лет.

Активные частицы, вероятно, широко распространены в аллювиальных почвах островных систем. Они обнаружены на косе Атамановской, на о-ве Атамановский и в затопляемой части береговой зоны Балчуговской протоки (правый берег). Известно, что аналогичные активные частицы обнаруживались ранее [11] и не только здесь, но и на о-ве Городском (г. Енисейск) и в других местах. Одна из них изучена в ГЕОХИ [12]. Сейчас (без специальных исследований) трудно оценить степень их распространности и вклад радиоцезия и других радионуклидов, в них аккумулированных, в общую активность загрязнения участков. Следует, вероятно, ожидать, что их роль будет заметной только в ближней зоне к источнику, если допустить, что их появление в реке связано с попаданием в нее твердых РАО (фрагментов графитовых втулок, брикетов технологических каналов и др.) [7].

Определение форм подвижности радиоизотопов в пробах почв одного из профилей показало, что ^{137}Cs более прочно связан, чем ^{60}Co и ^{152}Eu . Из табл. 3 видно, что это различие особенно заметно для кислоторастворимой формы, что касается значительного размаха значений степени выщелачивания водно-растворимой и подвижной формы (воздействие ацетатно-аммонийным буфером), то он связан с большой неравномерностью содержаний изотопов в исходной пробе, обусловленной неравномерным распределением органики и гидрослюды – основных их носителей.

Можно утверждать, что значительная часть ^{60}Co , ^{152}Eu и, в меньшей степени, ^{137}Cs связаны

с органикой или прочно сорбированы слоистыми алюмосиликатами и гидроокислами Fe и Mn. ^{137}Cs помимо указанных форм (активные частицы, органокомплексы и поверхностная хемосорбция) в значительном количестве, вероятно, входит в межслоевые промежутки гидрослюды, замещая в них калий, и этим можно объяснить заметно меньшую степень его выщелачивания кислотами, чем ^{60}Co и ^{152}Eu .

Исходя из того, что в природе в условиях больших водных потоков отсутствуют сильно-кислые среды, можно считать ныне фиксированные в аллювиальных почвах косы и острова радионуклиды малоподвижными, а места их скопления с большей активностью твердыми радиоактивными отходами, которые могут быть удалены, перемещены или рассеяны, в основном механически, в том числе путем размыва почв рекой. Заметим, что эти утверждения не касаются других мест и сред загрязнения, где требуется провести эксперименты по

Т а б л и ц а 3
Результаты выщелачивания ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu
из аллювиальной почвы

Пробы		Степень выщелачивания, %		
		^{137}Cs	^{60}Co	^{152}Eu
ЕЗД	1	7*	20*	17*
	2	8*	20*	19*
	3	5,2	21,6	61,2
	4	33,3	67,9	84,5
ЕЗА ₁	1	11*	20*	27*
	2	15*	23,3	27*
	3	33	37,0	66,0
	4	62	83,3	79
ЕЗА ₂	1	15*	13*	3*
	2	18*	11*	3*
	3	38,5	44,1	60,8
	4	49,6	79,5	87,6
ЕЗА ₃	1	14*	22*	27,1
	2	14*	11,5*	41,1
	3	16	58,4	72,1
	4	50	86,5	87,5
ЕЗА ₄	1	13*	11*	4*
	2	16*	17*	7,7
	3	25,6	54,1	76,5
	4	47,9	75,2	91,7

П р и м е ч а н и е. Цифры 1 – 4 – растворы для выщелачивания: 1 – дистиллированная вода; 2 – ацетатно-аммонийный буфер с pH 4,8; 3 – 1MННО₃; 4 – 5MННО₃ и соответствующая им степень выщелачивания, %. Выщелачивания проводились из 50-граммовых навесок, которые отличались друг от друга активностью одноименных радионуклидов. * – данные с большой (> 50 %) ошибкой.

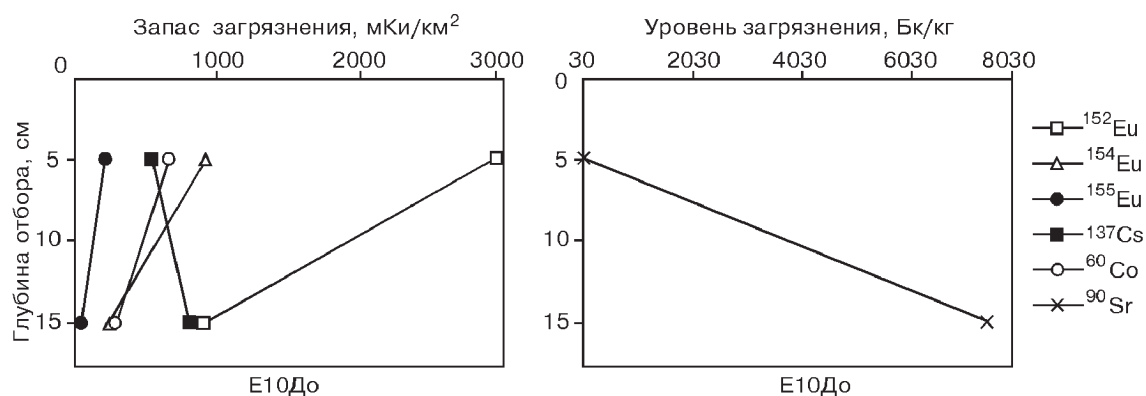


Рис. 7. График распределения радионуклидов в донном осадке у о-ва Атамановский.

выщелачиванию и дополнительному изучению фракций почв и донных осадков, что и планируется сделать.

Донные осадки

У о-ва Атамановский в одной точке (середина острова, правый берег, рис. 7 – E10Do) отобраны две пробы донных осадков мощностью по 10 см. В них верхний слой богаче изотопами Eu и ⁶⁰Co по сравнению с нижним, и обратная картина наблюдается для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, причем в нижнем слое их особенно много.

В Балчуговской протоке взяты две колонки донных осадков до глубины 26–28 см (см. схему рис. 1). В одной из них, расположенной в заливе протоки у правого берега (рис. 8, E15Do), обнаруживаются все радиоизотопы, установленные в донных отложениях о-ва Атамановский, из них наиболее неравномерно распределен ¹³⁷Cs. Пик его запаса (992 мКи/км²) приходится на предпоследний слой осадка, в котором наблюдается резкое уменьшение активности и других радиоизотопов. В осадке на проти-

воположном берегу протоки (см. рис. 8, E16Do) проявлена явная тенденция нарастания активности радионуклидов от нижних слоев к верхним, но при более низких их активностях, кроме ¹³⁷Cs, плотность загрязнения которым верхних слоев соизмерима с таковой в точке E15Do.

Из трех колонок, отобранных у о-ва **Городской**, в далеко отстоящих друг от друга точках, характеризующих разный гидродинамический режим их образования, наибольший интерес представляет отобранная в старой протоке (глубина воды до дна 0,5 мм), заросшей водорослями. Основной особенностью распределения радиоизотопов в этой колонке является возрастание их содержаний с глубиной, вплоть до последней пробы, характеризующей интервал 34–38 см (рис. 9, E32Do).

Обнаружение загрязнений в донных отложениях старицы ставит задачу их внимательного изучения, в том числе для ответа на вопрос о появлении гумусированных осадков, обнаруженных на о-ве Городской. Вполне вероятны их мобилизация и переотложение в период больших паводков.

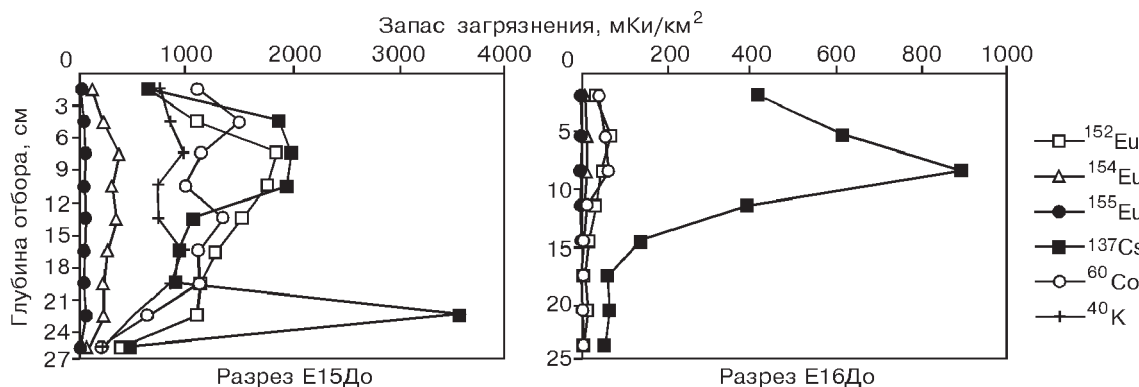


Рис. 8. График распределения радионуклидов в донных осадках Балчуговской протоки.

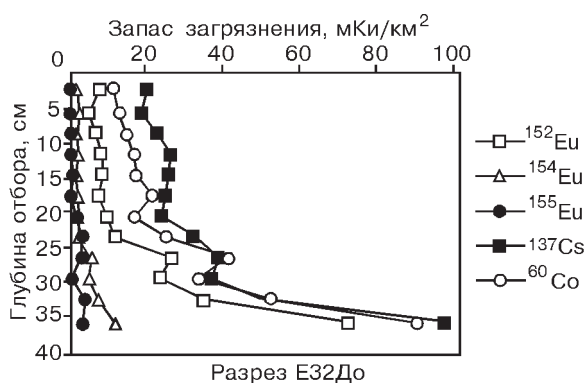


Рис. 9. График распределения радионуклидов в донных отложениях протоки у г. Енисейск.

Растения

Из растений наиболее загрязненными оказались два вида водорослей, отобранных в протоке (правый берег Енисея – ухвостье косы Атамановской). В них кроме долгоживущих радиоизотопов обнаружены ^7Be , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co и ^{65}Zn (табл. 4). Обнаруженный спектр радиоизотопов в однолетних растениях, отличающийся от такового в донных осадках наличием 6 короткоживущих (десятки суток и ^{54}Mn – 312 суток) изотопов, однозначно указывает на извлечение их из воды Енисея и, следовательно, на продолжающийся сброс их в реку ГХК.

В хвое, хвойном опаде (подстилке) и мхе, отобранных на незатопляемой части острова и на территории п/л "Таежный", обнаружены только ^{137}Cs , ^{60}Co и изотопы Eu, кроме того, установлены в нижнем слое подстилки на о-ве Атамановском (точка Е9). Данные по хвойным подстилкам и хвое указывают на бывшие локальные атмосферные выпадения, источником которых был ГХК.

Запасы радионуклидов в почвах

Общий запас активности (по всем измеренным радионуклидам) в затопляемой зоне о-ва Атамановского составляет 1,411 Ки. Около половины активности (46 %) обусловлено ^{137}Cs . Остальные радионуклиды дают следующий вклад в запас активности, %: ^{152}Eu – 30, ^{154}Eu – 8, ^{155}Eu – 2, ^{60}Co – 16.

На косе Атамановской общий запас измеренных радионуклидов составляет 0,61 Ки. Каждый из радионуклидов дает следующий вклад в общую активность, %: ^{152}Eu – 59, ^{154}Eu – 22, ^{155}Eu – 4, ^{137}Cs – 9, ^{60}Co – 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждено и более аргументированно доказано ранее обнаруженное значительное загрязнение почв, донных осадков и растительности поймы р. Енисей в ближней к ГХК зоне широким спектром техногенных радионуклидов, главными из которых являются ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{60}Co . Имея разную природу происхождения, они тесно ассоциируют, хотя и находятся в разных формах в загрязненных ими почвах.

Используя в качестве возрастного критерия отношение активности ^{137}Cs и ^{134}Cs , удалось выявить разновозрастность радиоцезия на косе Атамановской, аккумулированного в активной частице (~ 16 лет) и активном слое почв на о-ве Городской (г. Енисейск) (≥ 30 лет).

Суммарная активность радионуклидов в слое почв (30–35 см) острова и косы Атамановских составляет чуть более 2 Ки (610 мКи на косе и 1411 мКи на острове). Подсчитать запас радиоизотопов в почвах о-ва Городского из-за

Таблица 4
Содержание радионуклидов в растениях

Точка	№ образца	Горизонт	Масса, г	^{152}Eu	^{154}Eu	^{137}Cs	^{60}Co	^7Be	^{46}Sc	^{51}Cr	^{54}Mn	^{58}Co	^{65}Zn
	АК1		45	91		147	433	244	87	1200	120	67	58
	АК2		45	33		49	312	88	22	774	113	58	71
Е9-97	Е9А	0-1 см	25,5	0	0	32	0						
	Е9А	1-2 см	54,2	37	8	387	18						
Е9-97	Е9Х		71			162							
Е9-97	Е9М		26,1	0	0	398							

его сосредоточения в маломощном (10–12 см) слое при отсутствии данных по его площади пока не удалось.

Часть ухвостья о-ва Атамановский, мелкие участки с активными частицами на косе Атамановской и острове, активный слой на о-ве Городском (г. Енисейск) могут быть отнесены к твердым радиоактивным отходам, требующим утилизации.

Радиоактивность однолетних водорослей, обнаруженная в сентябре 1997 г. и представленная серией короткоживущих изотопов, указывает на современный весенне-летний сброс их в Енисей.

Изучение загрязнения почв радионуклидами на левом берегу Енисея (п/л "Таежный") и правом берегу (с. Б. Балчуг) показало, что эти территории испытывали влияние ГХК, но уровень загрязнений здесь очень небольшой и много меньше природной составляющей (^{40}K).

Обнаруженная радиоактивность локализована в почвах и донных осадках в пределах поймы р. Енисей и представляет угрозу здоровью людей, пользующихся островами и затопливаемой частью берегов для отдыха, сбора ягод, грибов, покосов и выпаса скота.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН "Моделирование биологических и гидрофизических механизмов

переноса и распределения радионуклидов в речной экосистеме (на примере реки Енисей)".

ЛИТЕРАТУРА

1. Плутоний в России (экология, экономика, политика), Кол. авторов под рук. А. В. Яблокова, М., 1994.
2. А. В. Носов, М. В. Ашанин, А. Б. Иванов и др., *Атомная энергия*, 1993, **74**: 2, 144–150.
3. Ю. В. Кузнецов, Ю. А. Ревенко, В. К. Легин и др., *Радиохимия*, 1994, **36**: 6, 546–559.
4. А. В. Носов, А. М. Мартынова, *Атомная энергия*, 1996, **81**: 3, 226–232.
5. А. В. Носов, *Метеорология и гидрология*, 1997, 12, 84–91.
6. Ф. В. Сухоруков, М. С. Мельгунов, С. И. Ковалев, А. Я. Болсуновский, в кн.: Актуальные вопросы геологии и географии Сибири, т. 3, Томск, 1998, 285–287.
7. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1995 году. Ежегодник под ред. К. П. Махонько, Обнинск, 1996, 61–75.
8. В. А. Бобров, Ф. П. Кренделев, А. М. Гофман, Гамма-спектрометрический анализ в камере низкого фона, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1975.
9. А. И. Обухов, И. О. Плеханова, Атомно-абсорбционный метод в почвенно-биологических исследованиях, М., Изд-во МГУ, 1991.
10. Р. Д. "Методика выполнения измерений доли подвижных форм металлов (Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Co, Cr, Mn) в пробах почвы атомно-абсорбционным методом" ОКСТУ 0017 Изд. НПО "Тайфун", Обнинск.
11. В. А. Тимофеев, в кн.: Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека, Томск, 1996, 276–277.
12. А. Я. Болсуновский, Т. А. Горяченкова, В. О. Черкезян, Б. Ф. Мясоедова, *Радиохимия*, 1998, **40**: 3.

The Main Traits of Distribution of Technogenous Radionuclides in Alluvial Soils and Bottom Sediments of the Yenisei River

F. V. SUKHORUKOV, M. S. MELGUNOV, S. I. KOVALEV

Results of studying the distribution of technogenous radionuclides in soils, bottom sediments and plants in the proximal zone of influence of the Krasnoyarsk mining chemical integrated plant (the Atamanovsky island and bar, the Balchugovsky channel) and in the Gorodskoy island near Yeniseisk city are presented. In the proximal zone, both in soils and bottom sediments, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu and ^{60}Co , and, besides, in algae ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co and ^{65}Zn are consistently found. In soil of the Gorodskoy island ^{137}Cs dominates. The main forms of finding the above radionuclides are organic complexes, chemisorption (surface and interlayer) on mineral particles, and active particles. The total radionuclides reserves in the Atamanovsky island and bar amount to a little more than 2 Ci. Distribution of radionuclides in soils is spatial and heterogenous along the vertical, and in some cases (the upstream extremity of the Atamanovsky island, small sites with active particles in the bar and in the island, the active layer in the Gorodskoy island), they may be considered as solid radioactive wastes requiring utilization.