

## Поведение $^{137}\text{Cs}$ в системе почва – ризосфера – растение на примере поймы реки Енисей

М. Ю. КРОПАЧЕВА, А. В. ЧУГУЕВСКИЙ, М. С. МЕЛЬГУНОВ, А. А. БОГУШ

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3  
E-mail: marya@uiggm.nsc.ru*

### АННОТАЦИЯ

Изучены распределение и формы нахождения  $^{137}\text{Cs}$  в таких компонентах биогеоценоза поймы р. Енисей, как почвы, ризосфера и растения. Исследования проводились в ближней зоне влияния Красноярского ГХК. Показано изменение удельной активности радионуклидов с увеличением расстояния от источника загрязнения, ее соотношение в почве и ризосфере, распределение в теле растений. Выявлено многообразие форм нахождения  $^{137}\text{Cs}$ , в том числе и подвижных, по результатам лабораторных экспериментов вычислено количество  $^{137}\text{Cs}$ , выносящегося из растений во время паводка.

**Ключевые слова:**  $^{137}\text{Cs}$ , почва, растения, ризосфера, Красноярский ГХК, Енисей.

Одним из ключевых факторов, определяющих переход элементов из почвы в растения, является ризосфера. Она служит связующим звеном между косным веществом почвы и живым организмом растения, ввиду чего необходимо рассматривать ее в комплексе с этими компонентами биогеоценоза. Как уникальный симбиоз вещества почвы, растений и микроорганизмов, ризосфера по своим химическим, физическим и биологическим свойствам заметно отличается от почвы, расположенной на некотором удалении от корней [1, 2], поэтому роль ризосферы в процессах аккумуляции и миграции элементов, особенно техногенных радионуклидов, в системе косное вещество — живое вещество представляет важную проблему с точки зрения биогеохимии.

Техногенные радионуклиды являются одними из наиболее информативных элемен-

тов с позиции биогеохимии и охраны окружающей среды не только в силу радиоактивности, но и потому, что присутствуют в биосфере менее века и ранее в природе не существовали. Одним из наиболее важных для изучения техногенных радионуклидов является  $^{137}\text{Cs}$ , который в силу своей геохимической аналогичности биогенному элементу калию присутствует во всех компонентах биосферы.

Работы по изучению поступления и распределения техногенных радионуклидов в пойме Енисея ведутся с начала 90-х гг. XX в. Наиболее сильное загрязнение биогеоценоза речной поймы наблюдается в непосредственной близости от Красноярского горнохимического комбината (ГХК), в так называемой ближней зоне влияния ГХК (25 км ниже точки сброса охлаждающих вод прамочных реакторов) [3, 4], но значительные следы прослеживаются вплоть до Карского моря [5–7]. Так, по оценкам С. М. Вакуловского и др. [8], запас  $^{137}\text{Cs}$ , обусловленный работой ГХК, в пойме Енисея протяженнос-

Кропачева Марья Юрьевна  
Чугуевский Алексей Викторович  
Мельгунов Михаил Сергеевич  
Богущ Анна Александровна

тью 1900 км на 1975 г. составлял ~ 20 ТБк. Уменьшение запаса происходит только за счет радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$ . На момент остановки прямооточных реакторов в 1991 г. плотность загрязнения пойменных почв по  $^{137}\text{Cs}$  вблизи ГХК составляла 260–350 кБк/м<sup>2</sup> [6, 9]. После 1992 г. удельная активность в сбросных водах комбината короткоживущих радионуклидов составляла не более 4 Бк/л, а долгоживущих – не более сотых долей Бк/л, что в 100–1000 раз меньше активности этих радионуклидов до 1992 г. [6, 7]. Тем не менее продолжающийся сброс радионуклидов подтверждается наличием в водных растениях многих изотопов, включая изотопы плутония [10], а также короткоживущих изотопов  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  [11].

Цель работы – выявление возможных путей миграции и механизмов перераспределения  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва – материал ризосферы – прибрежные растения на примере ближней зоны влияния Красноярского ГХК.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для изучения выбраны пойменные почвы и наиболее распространенные в пойме макрофиты рода Осока (*Carex* L.). Пробы отобраны на пяти участках (рис. 1). Участок М-0, расположенный в 5 км выше по течению от сброса радиоактивных вод, принят за местный фоновый. Участок М-1 находится на косе Атамановской, расположенной в 5 км ниже сброса. Участки М-2, М-3 и М-4 расположены ниже сброса соответственно в 6 (о-в Атамановский), 14 (о-в Березовый) и 17 км (Балчуговская протока). Участки М-1, М-2 и М-3 характеризуются повышенным промывным режимом во время весенне-летних паводков. Балчуговская протока представляет собой застойный болотистый залив с краткосрочным проточным режимом в высокие паводки, когда образуется дополнительная протока, в силу чего здесь создаются условия для накопления радионуклидов, переносимых на взвезях [9, 12].

Для обеспечения достаточного для анализа содержания радиоцезия в растениях с помощью дозиметра СРП-68-01 на каждом участке выбирали площадки с максимальной активностью. С участка площадью 1,5 м<sup>2</sup> сре-

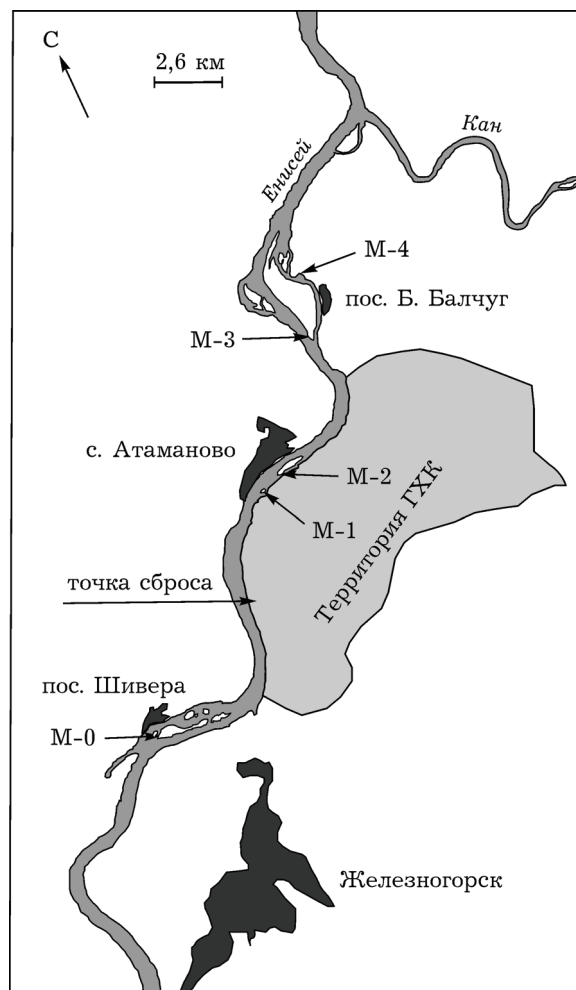


Рис. 1. Схема района опробования. М-0 – о-в напротив пос. Шивера, фон, М-1 – коса Атамановская, М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока

зали все надземные части растений. На скошенных площадках на расстоянии 60–70 см друг от друга извлекали два куба почвы размером 40 × 40 × 40 см. Свежий почвенный ком разделяли на растительные корневища с прилегающей к ним ризосферой и пустую почву. Материал ризосферы высушивали вместе с корнями и отделяли от последних уже в сухом виде. Таким образом, пробы почвы и материала ризосферы были большеобъемные. В материал ризосферы при высушивании неизбежно попадали мелкие корни. Крупные корни промывали для лучшего очищения от минеральных частиц и также высушивали.

Скошенную надземную часть растений промывали енисейской водой и ополаскива-

ли дистиллятом на месте отбора. Там же из половины надземной части мобильным ручным прессом под давлением 150 атм отжимали вакуолярный сок и эстрагировали водорастворимые соединения протоплазмы кипячением в течение 1 мин согласно методике, описанной в работе [13]. Остаток представлял собой нерастворимые компоненты клетки (целлюлозу и органеллы, ассоциированные с клеточной стенкой растения). На конечной стадии пробоподготовки все части отобранных растений сушили и озоляли по стандартной методике [14, 15].

Для количественной оценки вовлечения  $^{137}\text{Cs}$  во вторичную миграцию на не подвергавшейся воздействию летнего паводка территории на косе Атамановской выбирали два поросших свежей осокой участка площадью 3,75 (М-1а) и 2,25 м<sup>2</sup> (М-1б). Надземную часть растений также полностью срезали. В первом случае материал рассматривали целиком, во втором – разделяли на стебли, зеленые и подсохшие листья и колосья. Все растительные пробы высушивали.

Пробы почвы и ризосферы с о-ва Атамановского и Балчуговской протоки подвергали гранулометрическому фракционированию. Фракции 0,01–0,05 мм отделялись после 1 мин отстаивания, <0,01 мм – после 10 мин отстаивания. Фракции 0,05–0,16, 0,16–0,25, 0,25–0,5 и >0,5 мм разделяли путем рассеивания на стандартных ситах [16]. Воду, применяющуюся при отмучивании, упаривали до объема 60 мл. Вещество почвы и ризосферы в обеих точках представляет собой песок и ил с примесью растительных остатков. В ризосфере даже в самой мелкой фракции частицы прочно сцементированы с растительным веществом. Также проводилось химическое фракционирование с выделением следующих фракций: 1) водорастворимой (20 мл Н<sub>2</sub>О, Т 25 °С, t 1 ч); 2) ионообменной (20 мл 1 М НН<sub>4</sub>ОАс, рН 7, Т 25 °С, t 1 ч); 3) карбонатной (20 мл 1 М НН<sub>4</sub>ОАс, рН 5 буфер. (НОАс), Т 25 °С, t 5 ч); 4) органической (20 мл 30 % Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> с небольшой добавкой 0,02 М ННО<sub>3</sub> до рН 3,5, либо без добавки, смесь оставляется на ночь, затем 2–3 ч на песчаной бане); 5) связанной с оксидами и гидрооксидами Fe и Mn (20 мл 2 М НН<sub>2</sub>ОН · НСl в 25 % НОАс, рН 2, Т 96 °С, t 6 ч); 6) остаточной (кислотное разложение: HF–НСlО<sub>4</sub>–НСl) [17].

Аналитические работы выполнены в Институте геологии и минералогии СО РАН методом  $\gamma$ -спектрометрии с использованием колодезного коаксиального HPGe ППД с низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция) и коаксиального Ge(Li) ППД ДГДК-100В (Дубна). Доля выхода золы (порядка 10 %) позволяла измерять весь объем растительного материала без разбиения на параллельные пробы, почву и материал ризосферы измеряли 3–7-ю параллельными пробами массой 250–350 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что местные фоновые значения  $^{137}\text{Cs}$  в почве, ризосфере, корнях и различных органах растений низкие, почти одинаковые и обусловлены, вероятно, глобальными выпадениями. Кроме  $^{137}\text{Cs}$  на фоновом участке других  $\gamma$ -излучающих техногенных радионуклидов не обнаружено. Ниже точки сброса ГХК удельная активность радиоцезия превышает фоновые в десятки и сотни раз.

**Почва и ризосфера.** Распределение удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в почве и ризосфере крайне неравномерное (табл. 1), что согласуется с данными предшествующих исследований [3, 6, 7, 10], и имеет сходный характер. Исключением служат образцы из Балчуговской протоки (участок М-4) (рис. 2). Для косы Атамановской, о-вов Атамановского и Березового (участки М-1, М-2 и М-3) характерны близкие значения удельной активности радиоцезия для почвы и ризосферы, в то время как в Балчуговской протоке (М-4) наблюдается заметная разница в содержании  $^{137}\text{Cs}$  в почве и ризосфере. Причиной такого различия, скорее всего, является целый комплекс факторов, важнейший из которых – различные гидрологические условия.

Содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве и ризосфере в трех ближайших к сбросу точках близки и перекрываются границами разброса (см. рис. 2). Практически одинаковые на косе Атамановской и о-ве Березовом (343 и 345; 189 и 224 Бк/кг соответственно), они различны на о-ве Атамановском (211 и 256 Бк/кг), но не

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве и материале ризосферы, Бк/кг воздушно-сухой массы

Место отбора проб	Почва	Материал ризосферы
М-0, пос. Шивера	$\frac{3,1}{2,8-3,4}$ (3)	$\frac{3,5}{3,1-4,1}$ (6)
М-1, коса Атамановская	$\frac{343}{322-358}$ (7)	$\frac{345}{301-411}$ (4)
М-2, о-в Атамановский	$\frac{211}{185-246}$ (4)	$\frac{256}{238-269}$ (3)
М-3, о-в Березовый	$\frac{189}{168-251}$ (5)	$\frac{224}{214-240}$ (3)
М-4, Балчуговская протока	$\frac{1270}{928-1882}$ (7)	$\frac{624}{498-881}$ (4)

П р и м е ч а н и е. В числителе – средние содержания, в знаменателе – пределы содержаний, в скобках – количество определений.

столь заметно, если принять во внимание неоднородность распределения удельных активностей. В Балчуговской протоке, несмотря на большой разброс значений (для почвы 928–1882 при среднем 1270 Бк/кг, для ризосферы 498–881 при среднем 624 Бк/кг), явно видна значительная разница между удельной активностью почвы и ризосферы. В среднем в ризосфере удельная активность радиоцезия значительно ниже, чем в почве, хотя известно, что цезий в почве связан с органическим веществом и активностью микробиоты [18, 19]. Возможно, одна из причин в

том, что цезий, как химический аналог калия, активно поглощается растением, что приводит к уменьшению его содержания в ризосфере.

Распределение проб почв и материала ризосферы на участках М-2 и М-5 по гранулометрическому составу имеет в целом сходный характер с небольшими вариациями. По массовым процентам преобладают средние фракции 0,05–0,16 и 0,16–0,25 мм (75–90 мас. % в сумме). На каждую из остальных фракций приходится не более 8 мас. % (табл. 2).

Средневзвешенные значения удельной активности почв и материала ризосферы хорошо соответствуют валовым значениям. Наибольшая удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  наблюдается во фракции <0,01 мм, где значения достигают 4514 Бк/кг (почва Балчуговской протоки). Из литературных источников [20] известно, что в эту фракцию уходит до 94 % фракционного запаса  $^{137}\text{Cs}$  аллювиальных почв, что обусловлено наличием в ней глинистых минералов. Почвы Балчуговской протоки содержат больше глинистого вещества, чем почвы косы Атамановской, на которой те представляют собой в основном смесь песка и ила. В ризосфере присутствуют органические кислоты, которые способны мобилизовать радиоцезий из глинистых минералов в Балчуговской протоке и перевести его в подвижные формы. Активность постепенно снижается с увеличением размера фракции, резко уменьшается во фракции 0,05–0,16 мм и

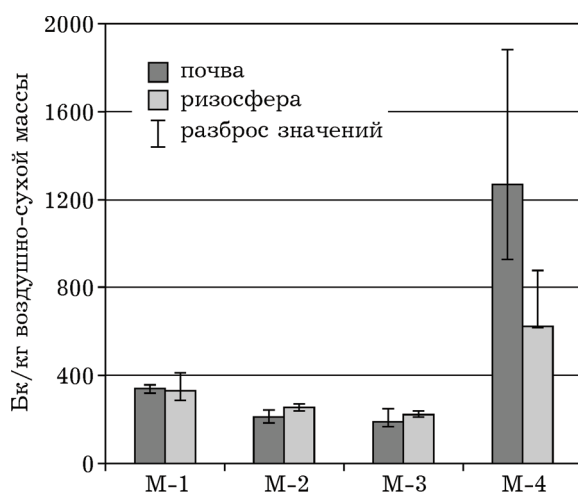


Рис. 2. Средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве и ризосфере с указанием максимальных и минимальных значений. М-1 – коса Атамановская, М-2 – о-в Атамановский, М-3 – о-в Березовый, М-4 – Балчуговская протока

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в гранулометрических фракциях, Бк/кг воздушно-сухой массы

Фракция	Коса Атамановская		Балчуговская протока	
	Почва	Ризосфера	Почва	Ризосфера
Средневзвешенная по пробе	281	274	1449	481
Водорастворимая фракция	30	11	173	14,3
Доля водорастворимой фракции, %	2,2	0,9	2,8	1,5
< 0,01 мм	1474	1491	4514	1048
0,01–0,05 мм	1141	1225	3336	747
0,05–0,16 мм	251	246	807	395
0,16–0,25 мм	175	188	378	523
0,5–0,25 мм	476	623	1580	404
> 0,5 мм	440	420	209	378
Мелкие корни	310	367	644	180
<i>Распределение фракций по массе, %</i>				
< 0,01 мм	1,7	1,3	5,3	6,5
0,01–0,05 мм	2,2	1,7	7,2	4,2
0,05–0,16 мм	50	51	72	9,1
0,16–0,25 мм	39	39	13	66
0,5–0,25 мм	4,0	3,7	1,5	8,0
> 0,5 мм	1,7	1,5	0,5	1,2
Мелкие корни	1,0	0,9	0,5	1,5

заметно увеличивается в крупных фракциях 0,5–0,25 и > 0,5 мм. Такие вариации, скорее всего, связаны с присутствием в этих фракциях большого количества растительных остатков, сцементированных с минеральными частицами, что подтверждает высокая удельная активность в мелких корнях, которые являются наиболее активной поглощающей частью корневой системы растений.

Хотя литературные источники [3, 8] указывают, что радионуклиды в воде Енисея содержатся в основном в виде взвесей, проведенный эксперимент показал присутствие  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой фракции, причем в виде растворимых органических соединений. Поступление  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимую фракцию составляет до 2,8 % от исходной удельной активности, что в масштабах загрязнения поймы составляет весьма значимую величину. Характерно, что содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой фракции ризосферы меньше, чем в почвенной. Из литературных данных известно, что в обогащенных гумусом почвах радиоцезий сорбируется в больших

количествах, чем в обедненных гумусом [18]. Таким образом, радиоцезий связан в ризосфере прочнее в силу большего содержания в ней органического вещества. Данные химического фракционирования проб с косы Атамановской показывают, что основная часть  $^{137}\text{Cs}$  связана с алюмосиликатами (до 92 %), с гидроксидами железа (до 10 %), с органическим веществом (до 1,5 %). На обменную и карбонатную фракции в ризосфере приходится 0,9 и 0,7 % радиоцезия, в почве – 0,8 и 0,6 % соответственно. Таким образом, в обменной и карбонатной фракциях ризосферы радиоцезий несколько более подвижен.

**Надземные части растений.** Исследования показали, что в верхних частях растений из техногенных  $\gamma$ -излучающих радионуклидов присутствует только  $^{137}\text{Cs}$ , причем его содержание уменьшается по мере удаления от источника загрязнения. Превышение над фоновыми значениями колеблется от 300 (коса Атамановская) до 43 раз (Балчуговская протока) (табл. 3). Удельная активность ожидаемо выше в корневой системе растений, и в

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в растениях поймы Енисея, Бк/кг воздушно-сухой массы

Место отбора пробы	Верхние части растений	Корни растений
М-0, пос. Шивера (местный фон)	0,8	1,1
М-1, коса Атамановская	243	280
М-2, о-в Атамановский	160	205
М-3, о-в Березовый	81	142
М-4, Балчуговская протока	34	733

Балчуговской протоке корневая система растений, судя по всему, служит барьером, не позволяющим попадать  $^{137}\text{Cs}$  в верхние репродуктивные части растения.

Для верхних частей растений фракционирование показало, что в вакуолярном соке доля общей активности радиоцезия заметно снижается при удалении от источника загрязнения и соответствует распределению валовых удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в верхних частях растений. Если в ближайшей к месту сброса точке эта доля составляет 22 %, то на о-ве Атамановском – около 10 %, а на о-ве Березовом – уже 7 % (рис. 3). Примечательно, что наименьшая доля  $^{137}\text{Cs}$  в вакуолярном соке (5 %) наблюдается в Балчуговской протоке, где в корнях фиксируется наибольшая его удельная активность. Доля активности в водорастворимых соединениях протоплазмы остается примерно одинаковой вне зависимости от степени загрязненности субстрата.

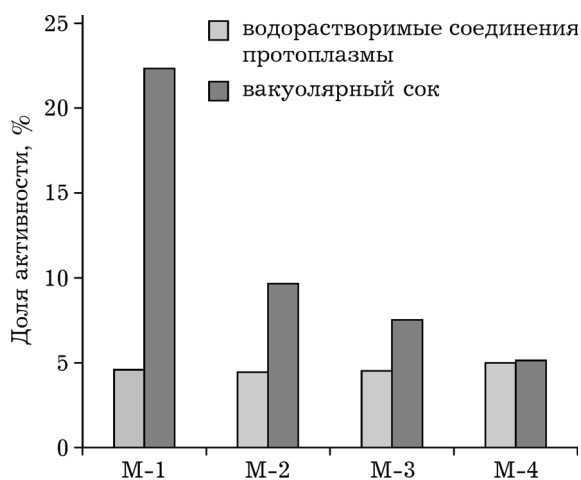


Рис. 3. Изменение доли активности  $^{137}\text{Cs}$  при удалении от источника загрязнения

По массовым процентам и долям активности рассчитаны коэффициенты концентрации для вакуолярного сока и клетчатки по формуле  $K_k = \%_{\text{активности}} / \%_{\text{массы}}$ , где первое значение – активность в клетчатке или в вакуолярном соке по отношению к общей активности растения, а второе – масса клетчатки или вакуолярного сока по отношению к общей сырой массе растения. Если данный коэффициент равен 1, то удельная активность отдельной части растения равна удельной активности всего растения. Изменение данных коэффициентов с удалением от источника загрязнения носит прямо противоположный характер. Если коэффициент вакуолярного сока с увеличением расстояния уменьшается с 0,7 до 0,2, то для клетчатки коэффициент увеличивается с 1,1 до 1,3 (рис. 4).

После установления возможности вовлечения  $^{137}\text{Cs}$  во вторичную миграцию проведена попытка количественной оценки этого процесса (в пределах косы Атамановской).

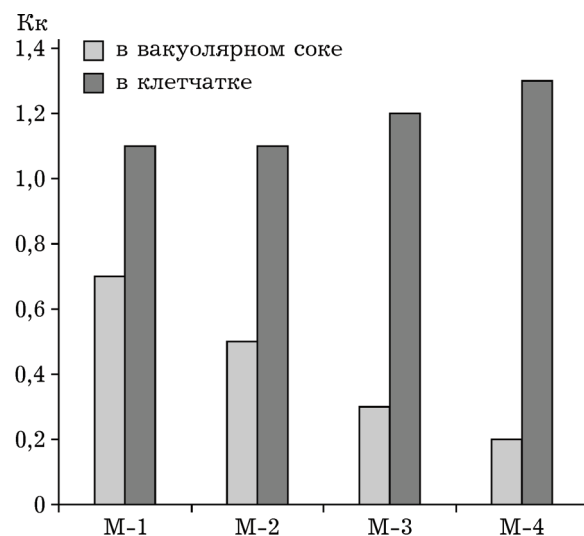


Рис. 4. Изменение коэффициентов концентрации  $^{137}\text{Cs}$  при удалении от источника загрязнения

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в растительных пробах на косе Атамановской

Объект опробования		$^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг воздушно-сухой массы	Масса на 1 м <sup>2</sup> , кг	Масса по всей косе, кг	Активность по косе в сезон, Бк
М-1а		682	0,192	2746	$1,87 \cdot 10^6$
М-1б	Растения целиком	154	0,229	3275	$4,75 \cdot 10^5$
	Стебли	65	0,16	2288	$1,5 \cdot 10^5$
	Молодые листья	286	0,045	644	$1,84 \cdot 10^5$
	Старые листья	142	0,016	229	$3,25 \cdot 10^4$
	Колосья	124	0,0073	104	$1,3 \cdot 10^4$

В табл. 4 приведены результаты измерения растительных проб. Как и в предыдущих случаях, для растений, не подвергавшихся длительному воздействию паводков, установлено наличие лишь  $^{137}\text{Cs}$ , данные по его концентрациям сопоставимы с ранее полученными и для точки М-1б на косе Атамановской лежат в пределах 65 – 286 Бк/кг (для разных частей растений). В точке М-1а значение удельной активности в целом для осоки существенно выше (в 4,5 раза и более) и составляет 682 Бк/кг. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в фоновой пробе не превышает 12 Бк/кг. В этой же таблице приведены оценочный объем вырастающей на косе осоки (за сезон) и количество накапливаемого растениями  $^{137}\text{Cs}$ . Площадь косы принималась равной 14 300 м<sup>2</sup>.

Из-за различия удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в растениях в этих двух случаях разнятся и оценки для количеств накапливаем

мого  $^{137}\text{Cs}$ . При пересчете на точку М-1а она составляет 390 тыс. Бк. При расчете по данным для точки М-1б достигает 1,87 млн Бк. Следует иметь в виду, что точка М-1а находится ближе к центру косы, в то время как точка М-1б – ближе к урезу воды и, следовательно, подвергается более длительному воздействию паводка.

**Лабораторный эксперимент.** С целью оценки скорости выноса накопленного растениями  $^{137}\text{Cs}$  проведен лабораторный эксперимент, в ходе которого 19 неозолненных навесок пробы М-1б на различные сроки помещали в воду. Минимальный срок составил 0,5 ч, максимальный – 19 сут. По окончании эксперимента воду сливали, полученные растворы фильтровали, упаривали и анализировали на содержание  $^{137}\text{Cs}$ . Активность  $^{137}\text{Cs}$  определялась также в высушенных остатках растений. Результаты эксперимента приведены

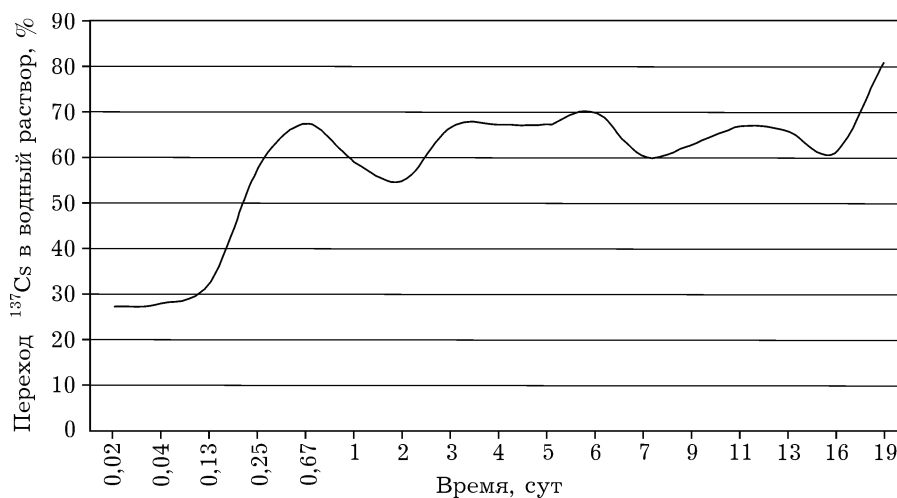


Рис. 5. Динамика перехода  $^{137}\text{Cs}$  из осоки в водный раствор по результатам лабораторного эксперимента

на рис. 5. Уже после получасовой выдержки в раствор переходит около 30 %  $^{137}\text{Cs}$ . В течение первых суток эта цифра достигает 60–70 %. На протяжении длительного времени количество переходящего в раствор цезия сохраняется на этом уровне и лишь в случае последней пробы (выдержка 19 сут) возрастает до 80 %. Таким образом, показан значительный вынос  $^{137}\text{Cs}$  из растений в условиях паводка, причем основная доля радиоцезия выносится в раствор в ближайшие сутки, т. е. процесс выноса происходит даже в кратковременные паводки.

**Оценка выноса  $^{137}\text{Cs}$  растениями.** По имеющимся литературным данным [6], во время паводка с 1 м<sup>2</sup> острова ближней зоны в сутки смывается 0,25 кг субстрата. На основании полученных данных оценена масса смываемой с косы почвы при средней продолжительности затопления 14 дней. Принимая за среднюю удельную активность верхних слоев почвы 170 Бк/кг, вынос  $^{137}\text{Cs}$  составляет 8,5 МБк. Таким образом, растениями выносятся ~ 22 %  $^{137}\text{Cs}$  от механического выноса с материалом косы. Причем поступление  $^{137}\text{Cs}$  из растений может происходить не одновременно, а на протяжении всего года под влиянием сезонных воздействий (дожди, паводки, талые воды).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований по распределению содержания и форм нахождения радиоцезия в различных частях растений в ризосфере и почве поймы Енисея в ближней зоне влияния Красноярского ГХК есть основания считать, что удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  на порядок и более превышает фоновые значения и что существенная доля  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва – ризосфера – растение находится в подвижных формах, благоприятных для поступления в трофические цепи. Хотя  $^{137}\text{Cs}$  в почве и ризосфере связан в основном с неподвижными формами (алюмосиликатами, гидроксидами железа и органическим веществом), доля водорастворимых форм в масштабах поймы достигает значимой величины. Лабораторным экспериментом подтвержден весьма активный вынос  $^{137}\text{Cs}$  из растений во время паводка. Расчеты

показали, что растения в состоянии выносить из почв до пятой доли радиоцезия от того количества, что механически сносится вместе с материалом почвы в паводки. Таким образом, в пойме Енисея складывается весьма сложная картина распределения  $^{137}\text{Cs}$  в системах пойменных биогеоценозов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10–05–00370. Авторы благодарят рецензента за конструктивную критику и ценные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gregory P. J., Hinsinger P. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: an overview // Plant and Soil. 1999. Vol. 211. P. 1–9.
2. McGrath S. P., Shen Z. G., Zhao F. J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils // Ibid. 1997. Vol. 88. P. 153–159.
3. Сухоруков Ф. В., Дегерменджи А. Г., Белолипецкий В. М. и др. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2004. 286 с.
4. Bolsunovsky A., Zotina T., Bondareva L. Accumulation and release of 241 Am by a macrophyte of the Yenisei River (*Elodea canadensis*) // J. of Environmental Radioactivity. 2005. Vol. 81. P. 33–46.
5. Кузнецов Ю. В., Ревенко Ю. А., Легин В. К. и др. К оценке вклада реки Енисей в общую радиоактивную загрязненность Карского моря // Радиохимия. 1994. Т. 36, № 6. С. 546–559.
6. Носов А. В. Исследование механизмов миграции радиоактивных веществ в пойме Енисея // Метеорология и гидрология. 1997. № 12. С. 84–91.
7. Носов А. В., Ашанин М. В., Иванов А. Б. и др. Радиоактивное загрязнение реки Енисей, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината // Атомная энергия. 1993. Т. 74, вып. 2. С. 144–150.
8. Вакуловский С. М., Тертышник Э. Г., Бородин Т. С., Искра А. А. Техногенные радионуклиды в реке Енисей // Радиоактивность после ядерных взрывов: тр. междунар. конф. СПб.: Гидрометеиздат, 2006. Т. 2. С. 294–299.
9. Линник В. Г., Сурков В. В., Потапов В. Н., Волосов А. Г., Коробова Е. М., Боргуис А., Браун Дж. Литолого-геоморфологические особенности распределения техногенных радионуклидов в пойменных ландшафтах Енисея // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 10. С. 1220–1234.
10. Сухоруков Ф. В., Мельгунов М. С., Ковалев С. И. Особенности распределения техногенных радионуклидов в аллювиальных почвах и донных осадках р. Енисей в ближней зоне Красноярского ГХК // Радиоактивность после ядерных взрывов: тр. Междунар. конф. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. Т. 1. С. 537–542.
11. Чугуевский А. В., Мельгунов М. С., Сухоруков Ф. В., Кропачева М. Ю. Миграция техногенных радионук-



- лидов в аллювиальных отложениях и растительности островов реки Енисей (ближняя зона влияния Красноярского ГХК) // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: мат-лы IV Междунар. науч.-практ. конф. Семипалатинск: Изд-во СГПИ, 2006. Т. 1. С. 470–475.
12. Linnik V. G., Broun J. E., Dowdall M., Potapov V. N., Surkov V. V., Korobova E. M., Volosov A. G., Vakulovsky S. M., Tertyshnik E. G. Radioactive contamination of the Balchug (Upper Yenisey) floodplain, Russia in sedimentation processes and geomorphology // *Science of the Total Environment*. 2005. Vol. 399. P. 233–251.
  13. Страховенко В. Д., Щербов Б. Л., Хожина Е. И. Распределение радиоцезия и микроэлементов в системе лишайник – субстрат и в теле лишайника // *Геохимия*. 2008. № 2. С. 141–150.
  14. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии. М.: Химия, 1984. С. 19–266.
  15. Обухов А. И., Плеханов И. О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1991. С. 30–108.
  16. Ковриго В. П., Кауричев И. С., Бурлакова Л. М. Почвоведение с основами геологии. М.: Колос, 2000. 416 с.
  17. Bogush A., Lazareva E., Androsova N. Behavior of heavy metals in technogenic streams // *Abstract book of the William Smith meeting 2009 (Environment, Pollution and Human Health)*. 21–23 September. L.: Burlington House, 2009. P. 45.
  18. Моисеев А. А., Рамзаев П. В. Цезий-137 в биосфере. М.: Атомиздат, 1975. 184 с.
  19. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
  20. Попов В. Е. Эффект концентрирования  $^{137}\text{Cs}$  органоминеральными частицами крупнозернистых гранулометрических фракций песчаных почв, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Почвоведение*. 2006. № 3. С. 344–351.

## Behavior of $^{137}\text{Cs}$ in the System Soil – Rhizosphere – Plant for the Flood Land of the Yenisey as Example

M. Yu. KROPACHEVA, A. V. CHUGUEVSKY, M. S. MEL'GUNOV, A. A. BOGUSH

*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS  
630090, Novosibirsk, Academician Koptyug ave., 3  
marya@uiggm.nsc.ru*

$^{137}\text{Cs}$  speciation and distribution in such components of biogeocoenosis of the Yenisey's floodplain as soils, rhizosphere, and plants were studied. Investigation was carried out near the zones affected by the Krasnoyarsk KMCP. The change of the specific activity of radionuclides with an increase in the distance from the source of pollution was demonstrated, the ratio of the specific activities of radionuclides in soil and in the rhizosphere was followed, and their distribution in plant's body was revealed. The variety of forms of  $^{137}\text{Cs}$  occurrence including mobile ones was revealed. On the basis of the results of laboratory experiments, the amount of  $^{137}\text{Cs}$  carried out of plants during the flood was calculated.

**Key words:**  $^{137}\text{Cs}$ , soil, plants, rhizosphere, Krasnoyarsk KMCP, the Yenisey.