

Научная статья/Research Article

УДК 504.054:631.4:539.16

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-34-44

**Дмитрий Владимирович Дементьев¹, Александр Яковлевич Болсуновский²,
Вадим Игоревич Вахрушев³**

^{1,2,3}Институт биофизики СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹dementyev@gmail.com

²radecology@gmail.com

³vavadbka@yandex.ru

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ЯГОДНЫХ КУСТАРНИКАХ И ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЯХ В РАЙОНАХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ БАСЕЙНА РЕКИ ЕНИСЕЙ

Цель исследования – определение накопления радионуклидов в распространенных видах лесных растений, включая травянистые, в 30-км зоне Горно-химического комбината (ГХК) после остановки реакторного завода и оценка радиационной безопасности растений для использования населением. Объекты исследования – почва, травянистые и кустарниковые растения лесов бассейна р. Енисей, расположенные вблизи ГХК ГК Росатом (г. Железногорск). Измерения удельной активности ⁷Be, ⁴⁰K и техногенного ¹³⁷Cs в пробах проводили на полупроводниковых γ-спектрометрах Canberra и Ortec (США). Были определены удельные активности радионуклидов ⁷Be, ⁴⁰K и техногенного ¹³⁷Cs в наземной фитомассе травянистых и кустарниковых растений, а также в почвенном профиле на разных участках в зоне влияния ГХК. Содержание техногенного ¹³⁷Cs в почвах на затопляемых участках поймы р. Енисей при продолжающихся водных сбросах ГХК остается высоким (до 1060 Бк/кг). На незатопляемых и контрольных участках содержание ¹³⁷Cs в почвах ниже на 1–2 порядка. Выявленная линейная зависимость уровней содержания ¹³⁷Cs в растениях и почвах приводит к тому, что в изученных видах лесных растений максимальные уровни удельной активности ¹³⁷Cs (до 34 Бк/кг) получены для растений с затопляемых участков поймы реки Енисей. Рассчитанные значения коэффициентов накопления ¹³⁷Cs максимальны для ягод шиповника и травянистых растений и лежат в диапазоне 0,05–0,17. Полученные максимальные значения ¹³⁷Cs для ягод шиповника и травянистых растений не превышают уровни предельных нормативных значений ¹³⁷Cs, установленных санитарными нормами для пищевой продукции, и не представляют радиационной опасности при использовании растений населением.

Ключевые слова: радионуклиды, почва, травянистые растения, кустарники, лесные экосистемы, коэффициент накопления радионуклидов, река Енисей

Для цитирования: Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я., Вахрушев В.И. Накопление радионуклидов в ягодных кустарниках и травянистых растениях в районах радиоактивного загрязнения бассейна реки Енисей // Вестник КрасГАУ. 2026. № 4. С. 34–44. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-34-44.

Финансирование: государственное задание Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0024).

**Dmitry Vladimirovich Dementyev¹, Alexander Yakovlevich Bolsunovsky²,
Vadim Igorevich Vakhrushev³**

^{1,2,3} Institute of Biophysics SB RAS – a separate division of the FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹dementyev@gmail.com

²radecology@gmail.com

³vavadbka@yandex.ru

**ACCUMULATION OF RADIONUCLIDES IN BERRY SHRUBS AND HERBACEOUS PLANTS
IN RADIOACTIVELY CONTAMINATED AREAS OF THE YENISEI RIVER BASIN**

The objective of the study is to investigate the accumulation of radionuclides in common forest plant species, including herbaceous plants, within a 30-km zone of the Mining and Chemical Combine (MCC) after the shutdown of the reactor plant and to assess the radiation safety of plants for public use. The objects of the study were soil, herbaceous and shrubby plants of the forests of the Yenisei River basin, located near the MCC of the Rosatom State Corporation (Zheleznogorsk). Measurements of the specific activity of ^7Be , ^{40}K and technogenic ^{137}Cs in samples were carried out using Canberra and Ortec semiconductor γ -spectrometers (USA). The specific activities of ^7Be , ^{40}K and technogenic ^{137}Cs were determined in the aboveground phytomass of herbaceous and shrubby plants, as well as in the soil profile at different sites within the MCC influence zone. The content of technogenic ^{137}Cs in soils in flooded areas of the river floodplain. The Yenisei River remains high (up to 1060 Bq/kg) despite continued water discharges from the Mining and Chemical Combine. In flood-free and control areas, ^{137}Cs levels in soils are one to two orders of magnitude lower. The identified linear relationship between ^{137}Cs levels in plants and soils results in the highest levels of ^{137}Cs specific activity (up to 34 Bq/kg) observed in the studied forest plant species for plants from flooded areas of the Yenisei River floodplain. The calculated ^{137}Cs accumulation factors are highest for rose hips and herbaceous plants and range from 0.05 to 0.17. The obtained maximum ^{137}Cs values for rose hips and herbaceous plants do not exceed the maximum standard values for ^{137}Cs established by sanitary standards for food products and do not pose a radiation hazard when consumed by the population.

Keywords: radionuclides, soil, herbaceous plants, shrubs, forest ecosystems, radionuclide accumulation coefficient, Yenisei River

For citation: Dementyev DV, Bolsunovsky AYa, Vakhrushev VI. Accumulation of radionuclides in berry shrubs and herbaceous plants in areas of radioactive contamination of the Yenisei River basin. *Bulletin of KSAU*. 2026;(4):34-44 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-34-44.

Funding: state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FWES-2024-0024).

Введение. Красноярский край является одним из наиболее лесных регионов Российской Федерации. Площадь его лесного фонда составляет 168,1 млн га и покрывает 69 % территории. Кроме древесины леса располагают большими дикорастущими ресурсами: грибами, ягодами, травами. На территории центральной части Красноярского края в г. Железногорске более 60 лет действует Горно-химический комбинат (ГХК) ГК Росатом, который является источником поступления техногенных радионуклидов в окружающую среду. За время деятельности ГХК, связанной с эксплуатацией реакторного и радиохимического заводов, часть территории санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и зоны наблюдения (ЗН) была загрязнена радионуклидами. Основные причины загрязнения этих территорий были следующие: 1) сброс радиоактивных вод охлаждения двух прямоточных реакторов в р. Енисей; 2) ветровой вынос радионуклидов с поверхности открытых бассейнов-хранилищ радиоактивных отходов, расположенных на промышленной площадке комбината [1]. После

остановки ядерных реакторов и радиохимического завода ГХК существенно сократились поступления техногенных радионуклидов в окружающую среду. В настоящее время на ГХК запущены в действие ряд предприятий (производство МОКС-топлива, переработка отработанного ядерного топлива и др.), которые осуществляют выбросы техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , изотопы плутония) в окружающую среду [1, 2]. Поступление техногенных радионуклидов происходит как через выбросы в атмосферу, так и через водные выпуски ГХК в р. Енисей [1]. Следовательно, поступление радионуклидов в результате деятельности ГХК на ближние незатапливаемые лесные территории СЗЗ происходит с аэрозольными выпадениями, а на затапливаемые участки поймы р. Енисей возможно как аэрозольное, так и водное поступление радионуклидов, в т. ч. вторичное поступление через вынос загрязненных радионуклидами донных отложений во время паводков [3]. Леса занимают значительную часть территорий, находящихся в зоне воздействия ГХК. Высшие

растения и грибы являются важными компонентами биоты в лесных экосистемах и играют ключевую роль в мобилизации и переносе веществ, в т. ч. радионуклидов [4]. Ранее на этой территории проводили исследование накопления ^{137}Cs в плодовых телах макромицетов. Было показано, что во время работы реакторного завода ГХК (до 2010 г.) удельная активность ^{137}Cs в грибах на незатапливаемых лесных участках в 30-км зоне ГХК достигала 370 Бк/кг (сухой массы), на затапливаемых лесных участках, расположенных на островах р. Енисей, содержание ^{137}Cs в грибах возрастало на порядок и достигало 10000 Бк/кг (сухой массы) [5]. Изучение накопления радионуклидов растениями до остановки реакторного завода ГХК в основном проводилось для древесного яруса, как основного объекта лесопользования, и кустарниковых растений [6, 7]. Максимальное накопление ^{137}Cs было зарегистрировано в органах кустарника черной смородины – в листьях и ягоде до 60 Бк/кг (сухой массы) [7]. Ранее травянистым растениям не уделяли должного внимания, но эти растения регулярно используются в качестве лекарственных трав и продуктов питания. Кустарниковые растения также могут интенсивно накапливать техногенные радионуклиды [8, 9], что в условиях продолжающихся газоаэрозольных выбросов и водных сбросов новых предприятий ГХК (производство МОКС-топлива и др.) [1, 2] делает актуальным их изучение в лесных экосистемах. Кроме того, для использования ягод и травянистых растений в качестве растительного сырья и продуктов питания населением необходимо определить их соответствие санитарным нормативам по радиационным показателям.

Цель исследования – определение накопления радионуклидов в распространенных видах лесных растений, включая травянистые, в 30-км зоне ГХК остановки реакторного завода и оценка радиационной безопасности растений для использования населением.

Объекты и методы. Район исследования расположен в 30 км зоне ГХК, что обусловлено первоначальной границей ЗН за газоаэрозольными выбросами, определенной для ГХК регламентирующими документами как круг радиу-

сом 30 км [1]. Наличие водного сброса радионуклидов обуславливает разделение районов исследования на затапливаемые и незатапливаемые участки. Точки отбора (рис. 1) возле с. Атаманово – А1 (затапливаемая) и А2 (незатапливаемая) расположены рядом с границей СЗЗ ГХК; точки А3 (незатапливаемая) и возле с. Балчуг – Б (затапливаемая) – на удалении от СЗЗ, но в пределах ЗН ГХК. Поступление радионуклидов в почву на исследованных участках может происходить: на незатапливаемых участках только с аэрозольными выпадениями радионуклидов, на пойменных территориях – с водным и аэрозольным поступлением радионуклидов. В качестве контроля были выбраны участки около г. Красноярска (К1) и К2 около с. Частоостровское (в границах стационарного участка, заложенного Центром защиты леса Красноярского края). В летне-осенний период были отобраны пробы почвы и лесных растений на указанных участках.

Пробы почвы отбирали методом конверта на каждом участке, где были отобраны пробы растений. Незатапливаемые районы характеризуются дерново-слабоподзолистыми почвами, затапливаемые участки – аллювиальными дерновыми почвами. Пробы вырезали почвенным цилиндрическим пробоотборником с рабочим диаметром 4 см и длиной 30 см послойно по 5 см. Предварительно в точке отбора почвы для анализа срезался слой дерна. В лаборатории отобранные образцы очищали от крупных корней (кроме дерна) и камней и перемешивали. Всего было отобрано 22 интегральные пробы почвы. Образцы высушивали в сушильном шкафу при 65 °С до постоянной массы. После сушки образцы помещали в пластиковый калиброванный контейнер для измерений. Отобранные пробы растений разделяли по видам, кустарники разделяли на органы. Всего было отобрано 45 проб растений. Все пробы сушили при 65 °С в сушильном шкафу и определяли сухую массу образцов. Сухие пробы растений и дернины озольяли в муфельной печи последовательно при 300 и 450 °С, после чего определяли их коэффициент зольности для дальнейшего перерасчета определяемых значений на сухую массу.

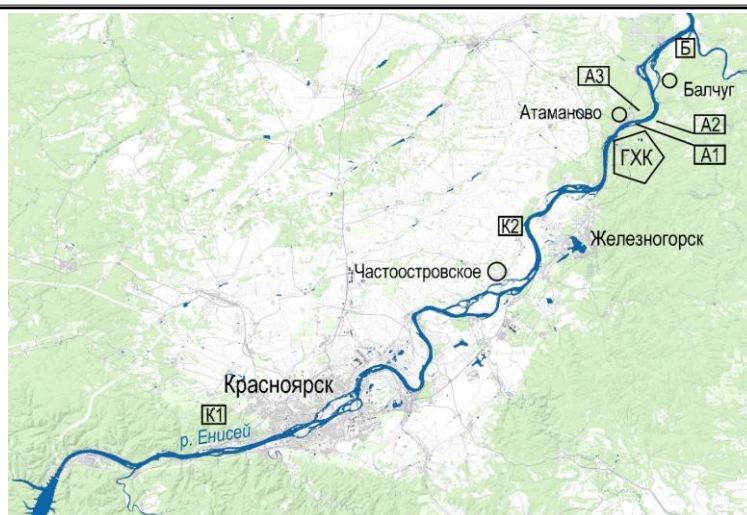


Рис. 1. Участки отбора проб почвы и растений: К1 – Красноярск (контроль 1); К2 – Частоостровское (контроль 2); А1 – Атаманово-1 (затапливаемый); А2, А3 – Атаманово-2, 3 (незатапливаемые); Б – Балчуг (затапливаемый)
Soil and plant sampling sites: K1 – Krasnoyarsk (control 1); K2 – Chastoostrovskoye (control 2); A1 – Atamanovo-1 (flooded); A2, A3 – Atamanovo-2, 3 (non-flooded); Б – Balchug (flooded)

Исследованные виды растений:

- Кустарники
- Шиповник – *Rosa cinnamomea* L.
- Смородина черная – *Ribes nigrum* L.
- Малина – *Rubus idaeus* L.
- Калина – *Viburnum opulus* L.
- Травянистые
- Борщевик сибирский – *Heracleum sibiricum* L.
- Крапива двудомная – *Urtica dioica* L.
- Купена лекарственная – *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce
- Медуница мягкая – *Pulmonaria mollis* J.F.Wolff ex Hornem.
- Папоротник орляк – *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn
- Подорожник средний – *Plantago media* L.
- Хвощ полевой – *Equisetum arvense* L.

Определение удельной активности радионуклидов в пробах проводили в Институте биофизики СО РАН в лаборатории радиозологии на γ -спектрометрах Canberra и Ortec (США) с коаксиальными сверхчистыми германиевыми детекторами с относительной эффективностью 23 и 45 % соответственно. Калибровка спектрометров проводилась с использованием эталонного образца, содержащего ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am (РИТВЕРЦ, Россия) в геометриях, соответствующих образцам. Обработку γ -спектров проводили с помощью программного

обеспечения GENIE-2000 (Canberra, США) и SpectraLineGP (ЛСРМ, Россия). Время измерения составляло от 12 000 до 172 000 с в зависимости от активности радионуклидов в пробе. Все значения удельных активностей ^7Be , ^{40}K и ^{137}Cs приведены в Бк/кг для воздушно-сухой массы образцов. Рассчитанные активности радионуклидов корректировались на дату отбора проб, если измеренное значение ниже минимальной детектируемой активности (МДА), то приведено значение МДА.

Результаты и их обсуждение. По результатам лабораторных спектрометрических измерений на участках в 30-км зоне ГХК только с аэрозольным поступлением радионуклидов А2, А3 (незатапливаемые участки Атаманово) и контрольных участках в почве из техногенных радионуклидов зарегистрирован только ^{137}Cs . Удельная активность ^{137}Cs в почвах для незатапливаемых участков в зоне ГХК максимальна в верхнем слое 0–5 см и достоверно регистрируется до глубины 25 см (табл. 1). На контрольном участке максимум ^{137}Cs находится также в слое 0–5 см, но его общее содержание в почвенном профиле в 1,5 раза ниже. Распределение ^{137}Cs на незатапливаемых участках в 30-км зоне ГХК соответствует распределениям ^{137}Cs в почвах как при глобальных выпадениях, так и при аэрозольных выпадениях после чернойбыльской аварии [10–12].

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в пробах почвы, Бк/кг сухой массы
Specific activity of radionuclides in soil samples, Bq/kg dry mass

Глубина, см	⁴⁰ K, Бк/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг
Красноярск (контроль К1)		
0–5	486±29	39±2
5–9	472±28	12,4±0,7
9–14	497±30	5,5±0,4
Частоостровское (контроль К2)		
0–7 (дерн)	409±21	33±2
0–5	510±27	25±1
5–10	512±27	3,8±0,3
10–15	548±27	< 1*
15–20	523±27	< 1
20–28	534±27	< 1
Атаманово-2, 3 (незатапливаемый)		
0–5 (дерн)	246±17	49±2
0–5	450±22	43±2
5–10	465±23	3,6±0,2
10–15	470±23	0,8±0,1
15–20	470±24	0,2±0,1
20–25	474±23	0,2±0,1
Атаманово-1 (затапливаемый)		
0–5	436±26	230±6
5–10	740±37	500±20
10–14	457±27	193±5
Балчуг (затапливаемый)		
0–5 (дерн)	431±26	612±18
0–5	474±43	647±26
5–10	452±32	777±23
10–15	462±32	1060±30
15–20	462±32	75±3
20–25	452±32	24±1
25–29	510±41	13,7±1,0

* – значение ниже минимальной детектируемой активности (МДА).

Проведенные исследования почв затапливаемых участков А1 (Атаманово) и Б (Балчуг) показали, что максимальная удельная активность ¹³⁷Cs находится на глубине 5–15 см и достигает 1060 Бк/кг (см. табл. 1). На этих участках по всему исследованному почвенному профилю содержание ¹³⁷Cs на 1–2 порядка выше, чем на участках А2, А3 и К1, К2. Также на затапливаемых участках определяется содержание радионуклида ¹⁵²Eu: на участке Б в дерне – 52 Бк/кг (Балчуг); в слоях почвы этого участка, до глубины 20 см, с максимумом в слое 0–5 см – 30 Бк/кг; в слоях почвы на участке А1 – 33–62 Бк/кг ¹⁵²Eu. В отличие от техногенных радионуклидов, содержание природного ⁴⁰K в почвах изменяется незначительно, средняя удельная

активность ⁴⁰K на разных участках лежит в небольших пределах 470–525 Бк/кг (см. табл. 1).

Накопление радионуклидов исследовали в ягодных кустарниках (4 вида) и 7 видах травянистых растений. На всех исследованных участках в растениях зарегистрированы природные радионуклиды ⁷Be, ⁴⁰K и техногенный ¹³⁷Cs (табл. 2). Поскольку ⁷Be является космогенным радионуклидом ($T_{1/2} = 53,2$ сут), образующимся в атмосфере, его накопление в надземных органах растений зависит от их поверхностной площади, времени, прошедшего с начала вегетации, и количества осадков. Накопление ⁴⁰K происходит вместе со стабильным калием и зависит от физиологии растений и обеспеченности почвы калием. Среднее значение содержания ⁴⁰K в травянистых лесных растениях было

(1520 ± 590) Бк/кг, что в 3,5–9,7 раза выше, чем в листьях, ягодах и ветках кустарников.

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в пробах лесной продукции, Бк/кг сухой массы
Specific activity of radionuclides in forest product samples, Bq/kg dry mass

Участок	Вид	⁷ Be, Бк/кг	⁴⁰ K, Бк/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг
1	2	3	4	5
Кустарники				
Частоостровское (контроль 2)	Смородина черная: лист	—*	1356±99	1,34±0,45
	ветки	64±10	152±11	0,06±0,06
Атаманово-1 (затаплив.)	Смородина черная: ягода	54±14	456 ±46	2,02±0,24
	листья	470±33	421±29	2,05±0,20
	ветки	81±6	149±10	0,84±0,07
Балчуг (затаплив.)	Смородина черная: ягода	17±2	533±29	5,70±0,58
	листья	169±7	494±24	7,95±0,38
	ветки	25±1	209±10	3,17±0,15
Красноярск (контроль 1)	Малина: листья	351±19	481±35	0,43±0,13
	ветки	24±3	141±10	0,18±0,04
Атаманово-1 (затаплив.)	Малина: ягода	107±14	428±34	7,3±1,3
	листья	313±35	436±26	5,9±0,6
	ветки	45±5	161±11	2,6±0,3
Атаманово-1 (затаплив.)	Калина: ягода	20±6	303±30	9,7±0,8
	листья	262±21	449±27	25,5±1,3
	ветки	57±6	215±13	6,8±0,3
Красноярск (контроль 1)	Шиповник: ягода	40±3	374±21	0,29±0,16
	лист	441±22	381±21	0,76±0,11
	ветки	60±4	87±7	0,09±0,04
Частоостровское (контроль 2)	Шиповник: ягода	42±2	493±24	< 0,7**
Атаманово-3 (аэрозоль.)	Шиповник: ягода	39±3	442±25	< 2**
Атаманово-1 (затаплив.)	Шиповник: ягода	77±10	357±36	18,0 ± 0,9
Балчуг (затаплив.)	Шиповник: ягода	—*	283±20	34,0±1,9
	листья	266±20	6±23	27,2±2,1
	ветки	208±18	140±13	13,9±1,3
Травянистые				
Частоостровское (контроль 2)	Борщевик	179±7	2160±100	< 0,5
	Медуница	314±12	2380±115	< 0,7
Атаманово-3 (аэрозоль.)	Борщевик	93±4	1520±70	0,32±0,11
	Борщевик	158±7	2360±115	0,28±0,14
	Крапива двудомная	480±20	1310±60	0,54±0,14
Балчуг (затаплив.)	Крапива двудомная	438±17	1010±50	10,3±0,5

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Атаманово-2 (аэрозоль.)	Купена лекарственная	73±3	1630±80	0,44±0,10
	Купена лекарственная	81±3	1550±75	0,19±0,08
Атаманово-3 (аэрозоль.)	Медуница	349±14	3060±150	0,86±0,22
Атаманово-2 (аэрозоль.)	Папоротник орляк	66±3	1090±50	0,56±0,06
Атаманово-3 (аэрозоль.)	Папоротник орляк	91±4	1280±60	1,32±0,10
	Папоротник орляк	345±13	1310±60	0,28±0,09
	Папоротник орляк	170±7	1110±50	1,01±0,11
Балчуг (затаплив.)	Папоротник орляк	590±24	980±50	12,9±0,6
Атаманово-3 (аэрозоль.)	Подорожник	461±15	990±50	2,50±0,58
Атаманово-3 (аэрозоль.)	Хвощ	159±41	1215±54	1,45±0,15
Атаманово-2 (аэрозоль.)	Хвощ	323±98	1169±189	0,63±0,24

* – измерение после распада ⁷Be; ** – значение ниже МДА.

Накопление техногенного ¹³⁷Cs в растениях имеет выраженную видоспецифичность и зависимость от формы поступления ¹³⁷Cs. Так, на контрольных участках содержание ¹³⁷Cs в некоторых травянистых видах и ягодах шиповника было ниже предела обнаружения (см. табл. 2). На незатапливаемых участках в 30-км зоне ГХК с аэрозольным поступлением радионуклидов А2, А3 более высокое накопление ¹³⁷Cs характерно для травянистых растений: максимальное содержание было в хвоще, папоротнике и подорожнике – 1,0–2,5 Бк/кг. На затапливаемых участках удельная активность ¹³⁷Cs возрастает в несколько раз: для травянистых растений максимальные значения получены в папоротнике – до 12,9 Бк/кг, для кустарников – в ягодах шиповника – 34 Бк/кг. На рисунке 2 показан общий вид зависимости накопления ¹³⁷Cs в растениях от его содержания в почве. Средняя удельная ак-

тивность в растениях на затапливаемых участках А1 и Б (9–15 Бк/кг) на порядок выше, чем на незатапливаемых участках (0,7 Бк/кг). Прослеживается линейная зависимость возрастания накопления ¹³⁷Cs во всех видах растений с увеличением содержания ¹³⁷Cs в почве.

В работе [6] по изучению последствий фукусимских выпадений радионуклидов на территории Красноярского края ранее было получено, что для древесных растений (сосна) содержание ¹³⁷Cs в ветвях и иголках максимально на затапливаемых участках в 30 км зоне ГХК (23–32 Бк/кг) по сравнению с содержанием ¹³⁷Cs на незатапливаемых участках (0,6 Бк/кг). Похожие зависимости от формы поступления радионуклидов ранее были показаны для районов, пострадавших в результате чернобыльской аварии [8, 9].

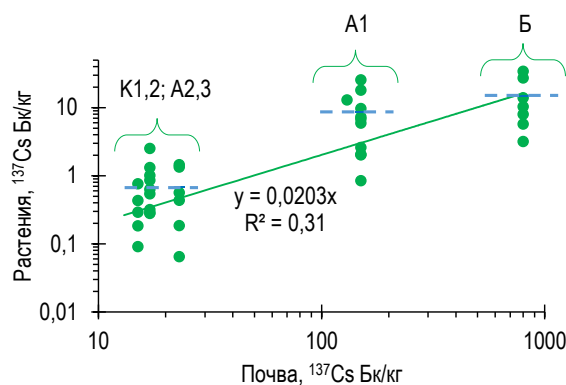


Рис. 2. Зависимость содержания ¹³⁷Cs в системе почва – растения (пунктирной линией обозначены средние значения)

Dependence of ¹³⁷Cs content in the soil – plant system (the dotted line indicates average values)

Показателем интенсивности миграции радионуклидов из почвы в растения является коэффициент накопления (КН), который рассчиты-

вается как отношение удельной активности радионуклида в растении (Бк/кг) к удельной активности радионуклида в почве (Бк/кг). На ри-

сунке 2 эта зависимость отражена линейной функцией с показателем угла наклона 0,02, который является усредненным КН ^{137}Cs по всей совокупности измеренных проб. На рисунке 3 показаны средние КН ^{40}K и ^{137}Cs в разных органах и видах исследованных лесных растений на участках с разными источниками поступления техногенного ^{137}Cs . Наиболее интенсивно в растениях происходит накопление ^{40}K . В травянистых растениях (средний КН ^{40}K = $3,3 \pm 1,2$) максимальные КН ^{40}K получены для борщевика (до 4,9) и медуницы (до 6,4), минимальные –

для хвоща, папоротника, крапивы, подорожника (2,1–2,7). В отличие от КН ^{40}K , значения КН ^{137}Cs для всех исследованных видов были меньше 1. Для ^{137}Cs максимальное значение КН рассчитано для ягод, листьев кустарников и травянистых растений, минимальное – для ветвей кустарников (рис. 3). Видами травянистых растений с максимальными КН ^{137}Cs являются папоротник и подорожник: для них получены максимальные значения КН ^{137}Cs 0,1–0,15, а также хвощ (0,06). Для остальных видов травянистых растений КН ^{137}Cs был в диапазоне 0,01–0,05.

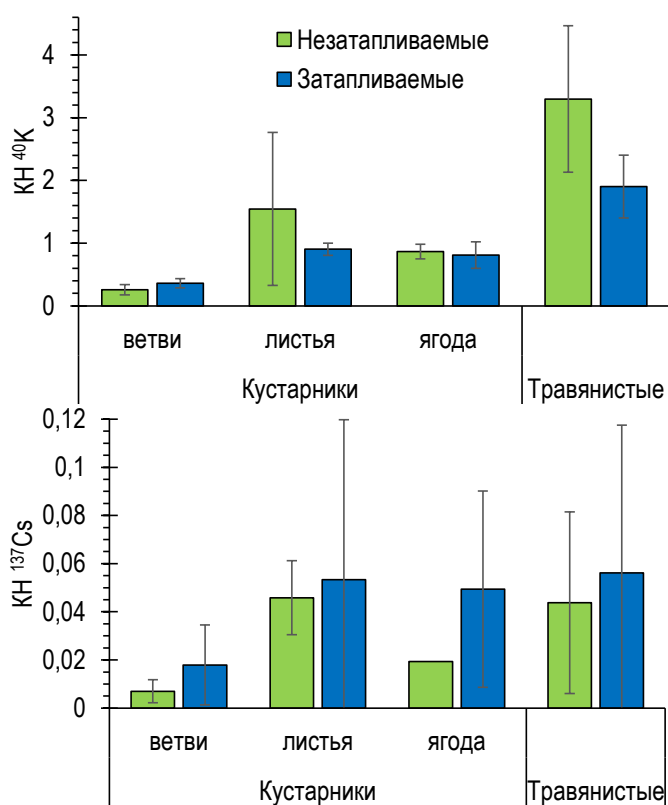


Рис. 3. Коэффициенты накопления (КН) ^{40}K и ^{137}Cs в растениях на незатапливаемых и затапливаемых участках (среднее \pm SD)
 Transfer factors (TF) of ^{40}K and ^{137}Cs in plants in non-flooded and flooded areas (mean \pm SD)

На незатапливаемых участках наблюдаются (см. рис. 3) более высокие средние значения КН ^{40}K по сравнению с затапливаемыми участками, и наоборот, на затапливаемых участках прослеживается тенденция увеличения средних КН ^{137}Cs в органах и видах лесных растений.

На исследованной территории содержание техногенного ^{137}Cs в почвах (см. табл. 1) максимально на затапливаемых участках в зоне влияния радиоактивных сбросов ГХК и достигает 1060 Бк/кг. На незатапливаемых и контрольных участках основное содержание ^{137}Cs ограничено поверхностным слоем почвы и не

превышает 43 Бк/кг. Коэффициент накопления ^{137}Cs отражает увеличение концентрации радионуклида в растениях с увеличением его концентрации в почве (рис. 2, 3). Кроме уровня загрязнения почвы ^{137}Cs на его накопление в растениях влияет множество факторов: физико-химическая форма, состав и свойства почвы, в т. ч. минералогический и гранулометрический, семейство и вид растений и т. д. [8, 13–16]. В изученных видах лесных растений максимальные уровни КН ^{137}Cs получены для ягод шиповника и травянистых растений и находятся в диапазоне 0,05–0,15, что соответствует

максимальным удельным активностям ^{137}Cs (до 34 Бк/кг), измеренным для этих видов на затопляемых участках. Полученные максимальные значения ^{137}Cs для ягод шиповника и отдельных видов травянистых растений в диапазоне 10–34 Бк/кг не превышают уровни предельных значений ^{137}Cs установленных СанПиН 2.3.2.1078-01 (свежие ягоды – 160 Бк/кг, сухие – 800 Бк/кг). В то же время в пойме реки Енисей имеются участки с высоким содержанием ^{137}Cs в почве [3], на которых накопление ^{137}Cs в лесной продукции, в частности в ягодах, потенциально может достигнуть предельных уровней.

Заключение

1. В условиях продолжающихся газоаэрозольных выбросов и водных сбросов ГХК содержание техногенного ^{137}Cs в почвах остается высоким (до 1060 Бк/кг) на затопляемых участках поймы р. Енисей. На незатопляемых и контрольных участках содержание ^{137}Cs в почвах ниже на 1–2 порядка и ограничено поверхностным слоем.

2. Выявленная линейная зависимость между содержанием ^{137}Cs в растениях и почвах приводит к тому, что в изученных видах лесных растений максимальные уровни удельной активнос-

ти ^{137}Cs (до 34 Бк/кг) получены для растений с затопляемых участков. На контрольных и незатопляемых участках в 30 км зоне ГХК содержание ^{137}Cs в растениях не превышало 2,5 Бк/кг из-за низкой активности ^{137}Cs в почвах. Полученные максимальные значения ^{137}Cs для ягод шиповника и травянистых растений не превышают уровни предельных нормативных значений ^{137}Cs , установленных СанПиН 2.3.2.1078-01, и не представляют радиационной опасности для населения при их использовании.

3. Травянистые растения на всех исследованных участках интенсивно накапливают природный ^{40}K – его средний КН = 3,3. Это объясняется тем, что калий является биогенным элементом и необходим для нормальной жизнедеятельности организмов. Коэффициент накопления ^{137}Cs отражает зависимость концентрации радионуклида в растениях от его концентрации в почве и других факторов. Максимальные значения КН ^{137}Cs получены для ягод и травянистых растений и лежат в диапазоне 0,05–0,15.

Благодарности: авторы благодарят научного сотрудника Всероссийского НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства (Пушкино) А.Д. Карпова за помощь в отборе проб.

Список источников

1. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2024 году. Обнинск: Тайфун, 2025. 345 с.
2. Отчет по экологической безопасности ФГУП «ГХК». Железногорск, 2024. 48 с. Доступно по: https://sibghk.ru/static-page/view?id_category=8&id=395. Ссылка активна на 11.11.2025.
3. Bolsunovsky A.Y., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event // Doklady Earth Sciences. 2021. Vol. 498, N 2. P. 514–518.
4. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: В сб.: Материалы 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 1999. 268 с.
5. Dementyev D., Bolsunovsky A. A long-term study of radionuclide concentrations in mushrooms in the 30-km zone around the Mining-and-Chemical Combine (Russia) // Isotopes in Environmental and Health Studies. 2020. Vol. 56. N 1. P. 83–92.
6. Bolsunovsky A. Dementyev D. Radioactive contamination of pine (*Pinus sylvestris*) in Krasnoyarsk (Russia) following fallout from the Fukushima accident // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 138. P. 87–91.
7. Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Накопление радионуклидов в ягодных кустарниках лесных экосистем бассейна реки Енисей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 1. С. 990–992.
8. Парамонова Т.А., Мамихин С.В. Корневое поглощение ^{137}Cs и его распределение между надземными и подземными органами растений: анализ литературы // Радиационная биология. Радиэкология. 2017. Т. 57, № 6. С. 646–662.

9. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Столбова В.В. Биодиагностика радиоактивного загрязнения природных систем // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. № 4. С. 43–49.
10. Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V. Spatial distribution of heavy metals and ^{137}Cs in spruce forest soil under conditions of regional pollution // Russian Journal of Ecology. 2018. Vol. 49, № 4. P. 312–319.
11. Tsvetnova O.B., Kononets O.P., Shcheglov A.I. Modern radioecological situation in forest and fallow ecosystems of Kaluga Oblast // Moscow University Soil Science Bulletin. 2020. Vol. 75, № 4-5. P. 176–183.
12. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Манахов Д.В. и др. Формы соединений ^{137}Cs в почвах лесных экосистем загрязненных территорий Брянского полесья в отдаленный период после чернобыльских выпадений // Проблемы агрохимии и экологии. 2021. № 3-4. С. 61–68.
13. Absalom J.P., Young S.D., Crout N.M.J., et al. Predicting the transfer of radiocaesium from organic soils to plants using soil characteristics // Journal of Environmental Radioactivity. 2001. N 52. P. 31–43.
14. Carini F. Radionuclide transfer from soil to fruit // Journal of Environmental Radioactivity. 2001. № 52. P. 237–279.
15. Ehlken S., Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review // Journal of Environmental Radioactivity. 2002. Vol. 58. P. 97–112.
16. Uematsu S., Smolders E., Sweeck L., et al. Predicting radiocaesium sorption characteristics with soil chemical properties for Japanese soils // Science of the Total Environment. 2015; Vol. 524-525. P. 148–156.

References

1. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2024 godu. Obninsk: Tayfun; 2025. 345 p.
2. Otchet po ekologicheskoi bezopasnosti FGUP "GKhK". (In Russ.). Available at: https://sibghk.ru/static-page/view?id_category=8&id=395. Accessed: 11.11.2025.
3. Bolsunovsky AY, Dementyev DV, Vakhrushev VI. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences*. 2021;498(2):514-518. DOI: 10.1134/S1028334X21060052.
4. Shcheglov AI. *Biogeokhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh*. In: *materialy 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na ChAES*, Moscow: Nauka; 1999. 268 p.
5. Dementyev D, Bolsunovsky A. A long-term study of radionuclide concentrations in mushrooms in the 30-km zone around the Mining-and-Chemical Combine (Russia). *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2020;56(1):83-92. DOI: 10.1080/10256016.2020.1718124.
6. Bolsunovsky A, Dementyev D. Radioactive contamination of pine (*Pinus sylvestris*) in Krasnoyarsk (Russia) following fallout from the Fukushima accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;138:87-91. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.08.003.
7. Dementyev DV, Bolsunovskii AY. Radionuclides accumulation by berry bushes in forest ecosystems of yenisei river basin. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011;13(1):990-992. (In Russ.).
8. Paramonova TA, Mamikhin SV. Root uptake of ^{137}Cs and its distribution between aboveand underground biomass of plants: analysis of the literature. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2017;57(6):646-662. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0869803117060091.
9. Shcheglov AI, Tsvetnova OB, Stolbova VV. Bioindication of radioactive contamination of natural ecosystems. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2013;4:43-49. (In Russ.). DOI: 10.3103/S0147687413040066.
10. Lipatov DN, Shcheglov AI, Manakhov DV. Spatial distribution of heavy metals and ^{137}Cs in spruce forest soil under conditions of regional pollution. *Russian Journal of Ecology*. 2018;49(4):312-319. DOI: 10.1134/S1067413618040100.

11. Tsvetnova OB, Kononets OP, Shcheglov AI. Modern radioecological situation in forest and fallow ecosystems of Kaluga Oblast. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2020;75(4-5):176-183. DOI: 10.3103/S0147687420040067.
12. Shcheglov AI, Tsvetnova OB, Manakhov DV, et al. Forms of ¹³⁷Cs in forest ecosystems soils of the Bryansk Polesie contaminated territories during a long period after the Chernobyl fallout. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2021;3-4:61-68. (In Russ.). DOI: 10.26178/AE.2021.32.98.005.
13. Absalom JP, Young SD, Crout NMJ, et al. Predicting the transfer of radiocaesium from organic soils to plants using soil characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;52:31-43. DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00098-9.
14. Carini F. Radionuclide transfer from soil to fruit. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;52:237-279. DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00035-7.
15. Ehlken S, Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;58:97-112. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00060-1.
16. Uematsu S, Smolders E, Sweeck L, et al. Predicting radiocaesium sorption characteristics with soil chemical properties for Japanese soils // *Science of the Total Environment*. 2015;524-525:148-156. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.028.

Статья принята к публикации 13.04.2026 / The article accepted for publication 13.04.2026

Информация об авторах:

Дмитрий Владимирович Дементьев, старший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии, кандидат биологических наук

Александр Яковлевич Болсуновский, главный научный сотрудник лаборатории радиоэкологии, заведующий лабораторией радиоэкологии, доктор биологических наук

Вадим Игоревич Вахрушев, младший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии, аспирант

Information about the authors:

Dmitry Vladimirovich Dementyev, Senior Researcher, Radioecology Laboratory, Candidate of Biological Sciences

Aleksandr Yakovlevich Bolsunovsky, Chief Researcher, Radioecology Laboratory, Head of the Radioecology Laboratory, Doctor of Biological Sciences

Vadim Igorevich Vakhrushev, Junior Researcher, Radioecology Laboratory, Postgraduate student

