

УДК 502.521:628.4.047
AGRIS F40

ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДОСТУПНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕ

©*Дайнеко Н. М.*, SPIN-код: 7065-6098, канд. биол. наук,
Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
г. Гомель, Беларусь, *Dajneko@gsu.by*

©*Тимофеев С. Ф.*, канд. с.-х. наук, Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь, *sertimo@mail.ru*

©*Жадько С. В.*, SPIN-код: 6490-8876, Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Беларусь, *Zhadkosv@mail.ru*

ASSESSMENT OF BIOLOGICAL AVAILABILITY OF RADIONUCLIDES IN THE SOIL

©*Daineka M.*, SPIN-code: 7065-6098, Ph.D., F. Skorina Gomel State University,
Gomel, Belarus, *Dajneko@gsu.by*

©*Timofeev S.*, Ph.D., F. Skorina Gomel State University,
Gomel, Belarus, *sertimo@mail.ru*

©*Zhadko S.*, SPIN-code: 6490-8876, F. Skorina Gomel State University,
Gomel, Belarus, *Zhadkosv@mail.ru*

Аннотация. В статье приводятся результаты оценки биологической доступности радионуклидов в почве. Целью работы является выявление форм нахождения цезия-137 в почве и установление их количественного соотношения спустя 30 лет после катастрофы на АЭС в Чернобыле. Для определения подвижности радиоцезия в почве применяли метод последовательного экстрагирования. Результаты исследований выявили существенные различия концентраций радиоцезия в применяемых растворителях. Содержание радиоцезия в водной вытяжке варьировало от 0,4 Бк до 5,5 Бк, ацетатно-аммонийной — (0,3–2,8) Бк; наиболее существенные переходы радиоцезия наблюдали при использовании соляной кислоты. При использовании 1М соляной кислоты содержание составило (0,4–4,2) Бк, при концентрации 6М — (2–88) Бк. Анализ динамики содержания радиоцезия в водной вытяжке свидетельствует об уменьшении размеров перехода радионуклида по всем почвам. Для супеси за 2017 и 2018 гг. средние показатели составили 2,3% и 1,8%, песчаной почвы 4,3% и 2,2%, и торфяника 0,8% и 0,3%. Для ацетатно-аммонийной вытяжки на супесях имело место увеличение перехода с 1,3% до 2,5%. На песке и торфе имело место уменьшение доступности соответственно (7,6–4,5) и (1,8–0,7)%. При экстрагировании соляной кислотой 1М концентрации на супеси переход радионуклида уменьшился с 2,9% до 2,2%. На песке выявлено увеличение доступности с 4,4% до 5,2%. На торфянике изменения доступности минимальные. Обработка почвы 6М соляной кислотой увеличила переход радионуклида на супеси и на торфянике. Увеличение количества радиоцезия в 6М кислоте может означать дальнейшее закрепление радионуклида почвенным поглощающим комплексом. *Методы исследования:* метод последовательного экстрагирования.

Abstract. This article presents the results of the assessment of the biological availability of radionuclides in the soil. The object of this work is to identify the forms of cesium-137 in the soil and to establishing their quantitative ratio 30 years after the disaster at the Chernobyl nuclear power plant. We were determined the mobility of radiocaesium in the soil, a sequential extraction method was used. *Research methods:* Research revealed significant differences in the concentration of

radiocaesium in the solvents used. The content of radiocaesium in the aqueous extract varied from 0.4 Bq to 5.5 Bq, ammonium acetate varied from 0.3 Bq to 2.8 Bq. The most significant radiocaesium transitions were observed using hydrochloric acid. When we were using 1M hydrochloric acid, radiocaesium content was (0.4–4.2) Bq, at a concentration of 6M (2–88) Bq. Analysis of the dynamics of the content of radiocaesium in the aqueous extract indicates a decrease in the size of the radionuclide transition overall soils. Average rates for sandy loam were 2,3% and 1.8%, sandy soil 4.3% and 2.2%, and peat bog 0.8% and 0.3% for 2017–2018 years. For the ammonium acetate extract on sandy loops, there was an increase in the transition from 1.3% to 2.5%. On sand and peat there was a decrease in availability, respectively (7.6–4.5)% and (1.8–0.7)%. The radionuclide transition decreased from 2.9% to 2.2%, when extracting with hydrochloric acid (1M concentration) on sandy loam. On the sand revealed an increase in availability from 4.4% to 5.2%. Accessibility changes have occurred minimal, on the moor. Soil treatment with 6M hydrochloric acid increased the radionuclide transfer to sandy loam and peatlands. An increase the amount of radiocaesium in 6=M acid means further fixation of the radionuclide by the soil absorbing complex.

Ключевые слова: биологическая доступность, почва, цезий-137, вытяжка.

Keywords: bioavailability, soil, cesium-137, extract.

Одним из негативных последствий катастрофы на ЧАЭС является радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных угодий. В настоящее время наибольшие радиологические проблемы выявлены для заливных лугов.

Кормовые угодья на территории Гомельской области характеризуются большим разнообразием почвенного покрова, плодородия и влагообеспеченности почв, качества и продуктивности травостоев.

Основным дозообразующим продуктом питания для населения, проживающего на загрязненной радионуклидами территории, было и остается в настоящее время коровье молоко. За счет его формируется основная часть среднегодовой индивидуальной дозы внутреннего облучения.

Миграция радионуклидов на сенокосно–пастбищных угодьях имеет существенные различия по сравнению с пашней. На естественных лугах основная часть радионуклидов продолжает оставаться в слое до 5 см. Это приводит к усиленному поглощению радионуклидов луговыми растениями.

Второй немаловажной особенностью естественных лугов является режим увлажнения. Периодическое затопление способствует не только интенсивному передвижению радионуклидов по почвенному профилю, но и усилению накопления ^{137}Cs травами.

Радиоцезий, или ^{137}Cs — основной дозообразующий радионуклид на территории Гомельской области.

Старение радионуклида или уменьшение его доступности связано с его способностью к обменному и к необменному поглощению почвеннопоглощающим комплексом. Старение радионуклида объясняется вхождением в межпакетные пространства и закрепление ионов Cs^+ кристаллической решеткой вторичных глинистых минералов. Фиксированные ионы Cs^+ становятся менее доступными для большинства сельскохозяйственных культур.

На подвижность и доступность ^{137}Cs воздействует множество параметров, среди которых можно выделить следующие: влажность почвы, формы нахождения радионуклидов в почве, гранулометрический и минералогический составы, содержание органического

вещества, содержание обменных катионов и емкость катионного обмена, а также кислотность почвы.

Немаловажное влияние на размеры перехода радионуклидов в звене «почва–растение» имеют формы нахождения радионуклидов в почве. Под формами радионуклидов подразумевается оценка прочности связи радионуклида с почвой. Прочность связи оценивают, как правило, с помощью воды, ацетата аммония, и кислот разной концентрации. Таким образом, выделяют водорастворимые, обменные, подвижные и фиксированные формы.

Как известно, почва представлена различным фазовым и химическим составами, следовательно, радионуклиды закрепляются с различной прочностью. В связи с этим можно предположить, что между различными формами радионуклидов поддерживается динамическое равновесие. Отсюда следует, что доступность радиоцезия может изменяться.

Особое внимание уделялось вопросам оценки форм нахождения радионуклидов в первые годы ликвидации последствий катастрофы.

Так, по мнению Ю. А. Иванова с соавторами, ^{137}Cs в почве находится в прочнофиксированной форме, как в составе твердых топливных частиц, так и в составе аэрозолей (конденсационных выпадений). Это зависит как от удаленности от места выбросов, так и от времени [1], что подтверждается исследованиями Ю. И. Голикова и другими [2].

В начальный период ликвидации катастрофы биологическая доступность ^{137}Cs в почвах 30 км зоны в 1988–1989 годах оценена П. Ф. Бондарем с соавторами на уровне 59%, а за ее пределами — 74% по сравнению со свеживнесенным водорастворимым ^{137}Cs [3].

В литературе имеют место факты о взаимосвязи содержания радиоцезия в растениях с количеством доступных форм радионуклида в почве. По мнению Г. С. Мешалкина, А. Н. Архипова, Н. П. Архипова высокое содержание ^{137}Cs в «фиксированной» форме в пределах 76–98% определяет размеры поступления радионуклидов в растения [4].

По данным Н. И. Смяна, Е. П. Петряева, количество фиксированного ^{137}Cs оценивается в 80–98% [5–6]. В. Ю. Агеец с соавторами считают, что содержание обменного ^{137}Cs в зависимости от типа почв варьирует для дерново–глеевых и торфяно–болотных почв — 21,7–66,4%; для дерново-подзолистых — 45,4–67,7%; для пойменных — 90,1%, соответственно [7].

По данным П. М. Орлова и А. В. Кузнецова в зависимости от прочности связи радионуклида с дерново-подзолистой супесчаной почвой содержание ^{137}Cs варьирует от 3,7% до 45,3%. С течением времени, на четвертый год после загрязнения, количество прочносвязанного ^{137}Cs для дерново–подзолистой песчаной почвы составляло до 60%, в аллювиальной дерновой глеевой песчаной до 80%, для торфяно-болотной до 98% [8].

Таким образом, имеет место снижение содержания обменных форм радиоцезия и увеличение прочнофиксированных форм. Причем этот процесс зависит от увлажнения почв. Для гидроморфных почв этот процесс происходит гораздо быстрее. Безусловно, одной из причин является закрепление радионуклида в межпакетных пространствах вторичных глинистых минералов.

Имеющиеся различия по содержанию форм радионуклидов объясняются многочисленными учтенными и неучтенными факторами. Это и пестрота почвенного покрова, степень гидроморфности, расстояния от источника выброса, гранулометрического состава и других [9].

Существенное значение на соотношения форм радиоцезия оказывают такие факторы как обработка почвы и системы удобрений.

Установлено, что применение агротехнических способов улучшения естественных лугов способствует повышению в почве обменных и подвижных форм радионуклидов. Так, по данным М. И. Ильина проведение улучшения торфянистого типа луга, расположенного на лугово-аллювиальной супесчаной почве, при помощи дискования привело к увеличению обменного ^{137}Cs в 1,5 раза, а обменного ^{90}Sr — в 2,1 раза [10].

Одним из факторов снижения доступных форм радиоцезия в почве является увеличение количества органического вещества [11]. Еще в 1984 г. И. Т. Моисеев и Л. А. Рерих отмечали, что повышение содержания гумуса в дерново-подзолистых супесчаных почвах от минимального (1,0–1,5%) до оптимального (2,0–3,0%) сопровождалось снижением в 1,5 раза поступления ^{90}Sr и в 2–5 раз ^{137}Cs в урожай многолетних злаковых трав.

Помимо форм радионуклидов существенное влияние на содержание радионуклидов в растениях оказывают их биологические особенности [13–15].

По мнению ряда авторов, основными факторами, определяющими высокие размеры перехода радионуклидов в растительность пойменных лугов, являются агрохимические свойства и водный режим почв, климатические условия (годовое количество осадков и их распределение по месяцам вегетативного периода, теплообеспеченность), а также особенности формирования ботанического состава травостоя [16–17].

Целью работы является выявление форм нахождения цезия-137 в почве и установить их количественное соотношение спустя 30 лет после катастрофы на АЭС в Чернобыле.

Методика исследований

Для определения подвижности радиоцезия в почве или прочности связи с почвой применяли метод последовательного экстрагирования. В качестве экстрагентов использовали дистиллированную воду, ацетат аммония и 1М, и 6М соляную кислоту. Отношение экстрагента к почве составляло 1:10. Вытяжки готовили путем добавления к 50 г почвы 500 мл экстрагента. Перед экстрагированием проводили определение содержания радиоцезия в почве.

Пробы почвы отбирали в 2017–2018 гг. В образцах почвы 2017 г содержание радиоцезия в пробах почвы составляло от 18 Бк до 227 Бк. Перерасчет на 1 кг почвы и единицу площади составили соответственно 360 Бк/кг и 4540 Бк/кг, или 86,4 кБк/м² (2,3 Ки/км²) и 1089,6 кБк/м² (29,4 Ки/км²).

Для анализа условно разделили почвы на 3 группы по типам и разновидностям: аллювиальная супесчаная или супесь, аллювиальная песчаная или песок и торфяно-болотная или торфяник.

Результаты исследований

Для супесей содержание радиоцезия в почве варьировало от 36 Бк до 227 Бк, песчаной почвы 18 Бк и для торфяника — 21–160 Бк. В процентном отношении содержание радиоцезия в почвенных вытяжках в 2017 г. представлено в Таблице 1.

Результаты исследований выявили существенные различия по концентрации радиоцезия в используемых растворителях. Содержание радиоцезия в водной вытяжке варьировало от 0,4 Бк до 5,5 Бк. Для супеси параметр составлял 0,4–5,5 Бк, песка 0,8 Бк и торфа 0,2–0,8 Бк.

Таблица 1.
СОДЕРЖАНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ В ПОЧВЕННЫХ ВЫТЯЖКАХ, 2017 г. в %/пробу

Шифр пробы	Место отбора проб	Горизонт почвы, см	Грануло-метрический состав почвы	Содержание ^{137}Cs в почве,	H_2O , %	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, %	1 М НСl, %	6М НСl, %	Σ ^{137}Cs в растворах, %
1	Чечерск Объект 1	0–20	Аллювиальная супесчаная	79,95	2,2	0,5	1,1	28	31,8
2	Чечерск Объект 2	0–20	Аллювиальная супесчаная	50,48	2,2	0,5	1,8	27,9	32,4
3	Чечерск Объект 3	0–20	Аллювиальная супесчаная	108,4	5,5	3	4,2	47,4	60,1
4	Чечерск Объект 4	0–5	Аллювиальная супесчаная	74,95	1	0,3	1,4	26,4	29,1
5	Чечерск Объект 5	0–5	Аллювиальная супесчаная	227,1	1,1	1,7	3	88,2	94
6	Шерстин Объект 1	0–5	Аллювиальная супесчаная	34,85	0,4	0,3	1,3	13,1	15,1
7	Шерстин Объект 1	5–10	Аллювиальная супесчаная	44,3	0,5	0,7	1,1	15	17,3
8	Шерстин Объект 2	0–5	Аллювиальная супесчаная	37,85	0,9	0,6	1,5	13,8	16,8
9	Шерстин Объект 2	5–10	Аллювиальная супесчаная	35,5	0,8	0,7	1,5	13	16
10	Демьянки Объект 1	0–20	Аллювиальная песчаная	18,4	0,8	1,4	0,8	7,7	10,7
11	Немиров Объект 1	0–10	Торф	159,6	0,8	2,8	2,6	28	34,2
12	Немиров Объект 1	10–20	Торф	21,4	0,23	0,4	0,4	2,4	3,43

В процентном выражении эти данные составили соответственно 0,5–5,1%, 4,35% и 0,5–1,1% (Таблица 2). Среднее содержание радиоцезия в водной вытяжке составило для супеси — 1,6%, песка — 0,8% и торфа — 0,5%.

Содержание радиоцезия в ацетатно-аммонийной вытяжке было в пределах 0,3–2,8 Бк. Для первой группы почв это было 0,3–1,7 Бк, второй 1,4 Бк и третьей 0,4–2,8 Бк. В процентном отношении соответственно 0,4–2,8%; 7,6% и 1,8–1,9%. Средние значения составили 1,3%; 7,6% и 1,8%.

Наиболее существенные переходы радиоцезия наблюдали при использовании соляной кислоты. При концентрации кислоты 1 М содержание радионуклида составило 0,4–4,2 Бк. По группам почв соответственно 1,1–4,2 Бк; 0,8 Бк и 0,4–2,6 Бк. В процентном отношении соответственно 1,4–4,2%; 4,4% и 1,6–1,9%. Средние значения составили 2,9%; 4,4% и 1,8%.

Максимальный переход радионуклида имел место при использовании 6М соляной кислоты.

Содержание радиоцезия в 6М соляной кислоте составляло от 2 Бк до 88 Бк. Для первой группы почвы варьирование составляло (13–88) Бк; второй группы около 8 Бк, и для третьей группы (2,4–28) Бк. В процентном выражении среднее содержание составляло 39%; 42% и 14%.

Общий переход радиоцезия в почвенные вытяжки составил в среднем для супеси 46%, песка 58% и торфа 19% (Таблица 2).

Таблица 2.
СОДЕРЖАНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ В ПОЧВЕННЫХ ВЫТЯЖКАХ, 2017 г. в %/пробу

Шифр пробы	Место отбора проб	Горизонт почвы, см	Грануло-метрический состав почвы	Содержание ^{137}Cs в почве	H_2O , %	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, %	1 М НСl, %	6М НСl, %	$\sum ^{137}\text{Cs}$ в растворах, %
1	Чечерск объект 1	0–20	Аллювиальная супесчаная	79,95	2,75	0,62	1,38	35,02	39,77
2	Чечерск объект 2	0–20	Аллювиальная супесчаная	50,48	4,35	0,99	3,57	55,27	64,18
3	Чечерск объект 3	0–20	Аллювиальная супесчаная	108,4	5,07	2,77	3,87	43,73	55,44
4	Чечерск объект 4	0–5	Аллювиальная супесчаная	74,95	1,33	0,40	1,87	35,22	38,83
5	Чечерск объект 5	0–5	Аллювиальная супесчаная	227,1	0,48	0,79	1,32	38,84	41,39
6	Шерстин объект 1	0–5	Аллювиальная супесчаная	34,85	1,15	0,86	3,73	37,59	43,33
7	Шерстин объект 1	5–10	Аллювиальная супесчаная	44,3	1,13	1,58	2,48	33,86	39,05
8	Шерстин объект 2	0–5	Аллювиальная супесчаная	37,85	2,38	1,58	3,96	36,46	44,39
9	Шерстин объект 2	5–10	Аллювиальная супесчаная	35,5	2,25	1,97	4,23	36,62	45,07
10	Демьянки объект 1	0–20	Аллювиальная песчаная	18,4	4,35	7,61	4,35	41,85	58,15
11	Немиров объект 1	0–10	Торф	159,6	0,50	1,75	1,63	17,54	21,43
12	Немиров объект 1	10–20	Торф	21,4	1,08	1,87	1,87	11,21	16,03

В 2018 г. отбор проб почвы производили также на супесчаной и песчаной почвах, а также на низинном торфянике. Содержание радиоцезия в почвах составляло от 38 Бк/пробу до 208 Бк/пробу (Таблицы 3–4). Для супеси амплитуда колебания была в пределах 38–61 Бк, песчаной почвы 207–209 Бк, и для торфяника 60–112 Бк.

Содержание радиоцезия в водной вытяжке составляло 0,1–5 Бк или 0,1–2,6%. По изучаемым группам почв эти параметры составили соответственно 1,1–2,6%; 1,9–2,4%; 0,1–0,5%. Средние значения по группам почв 1,8%; 2,2%; 0,3%.

По содержанию радионуклида в ацетатно-аммонийной вытяжке получили следующие результаты. Пределы варьирования 0,3–6,1%. По группам соответственно 0,8–6,1%; 4,4–4,5%; 0,3–1,2%. Средние значения составили 2,5%; 4,4%; 0,7%.

Для кислотной вытяжки использовали 1М соляную кислоту. Содержание радионуклида в вытяжке составляло 0,5–8,2 Бк/пробу. В процентном отношении количество радиоцезия по группам почв составляло 1,1–3,4%; 3,9–6,5% и 1,1–2,2%. Средние значения представлены следующими данными — 2,2%; 5,2%; 1,6%.

Таблица 3.
 СОДЕРЖАНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ В ПОЧВЕННЫХ ВЫТЯЖКАХ, 2018 г. в %/пробу

Проба	Объект	Горизонт почвы, см	Гранулометрический состав почвы	Содержание ^{137}Cs в почве,	H_2O , %	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, %	1 М НСl, %	6М НСl, %	$\sum ^{137}\text{Cs}$ в растворах, %
13	Ветковский Шерстин 1	0–20	Аллювиальная супесчаная	61,1 ±7,7	0,7 ±0,1	0,5 ±0,1	1,1 ±0,3	11,9 ±2,9	14,2
15	Ветковский Шерстин 2.Оз. Кривое	0–20	Аллювиальная супесчаная	38,35 ±4,9	0,6 ±0,2	0,9 ±0,2	0,9 ±0,2	14,3 ±2,0	16,7
17	Ветковский Шерстин 3	0–20	Аллювиальная супесчаная	53,7 ±6,8	0,9 ±0,2	3,3 ±0,6	1,8 ±0,3	48,6 ±6,5	54,6
19	Ветковский Шерстин 6	0–20	Аллювиальная супесчаная	46,55 ±5,8	1,2 ±0,3	0,4 ±0,1	0,5 ±0,1	28,8 ±2,9	30,9
3	Добрушский Вылево 2	0–20	Аллювиальная песчаная	207,4 ±26,1	4,0 ±0,6	9,1 ±1,1	13,5 ±1,7	132,0 ±16,6	158,6
5	Добрушский Вылево 3	0–20	Аллювиальная песчаная	208,6 ±26,3	5,0 ±0,7	9,3 ±1,3	8,2 ±1,1	11,5 ±14,6	34,0
27	Добрушский Немир 1	0–20	Торф	60 ±7,6	0,3 ±0,1	0,7 ±0,2	1,3 ±0,2	17,4 ±2,3	19,7
29	Добрушский Немир 2	0–20	Торф	107,2 ±13,5	0,3 ±0,1	0,8 ±0,1	1,3 ±0,2	18,8 ±2,6	20,4
31	Добрушский Немир 3	0–20	Торф	71,9 ±9,4	0,1 ±0,08	0,5 ±0,1	1,3 ±0,2	17,6 ±2,2	19,5
33	Добрушский Немир 4	0–20	Торф	111,7 ±14,0	0,1 ±0,07	0,3 ±0,1	1,2 ±0,2	17,4 ±2,2	19,0

Наибольшее количество радионуклида было выявлено в почвенной вытяжке, где в качестве экстрагента была 6М соляная кислота. Содержание радиоцезия в вытяжке варьировало в пределах 12–132 Бк/пробу или 5,5–90%. Для супеси, песка и торфа варьирование данного параметра было в следующих пределах — 20–90%; 5,5–64%; 16–29% при средних значениях — 52,3%; 34,6%; 21,7%.

Всеми экстрагентами из почвы было извлечено от 16% до 100% радионуклида. Для супесей варьирование составило 23,2–100,0%; песков 16,3–76,5%; торфа 17,0–32,8%.

Средние значения соответственно 58,7%; 46,4%; 24,0%. Для анализа динамики перехода радионуклида в растворы целесообразно произвести анализ по вертикали и по горизонтали.

Вертикальный анализ проводится отдельно по водной, ацетатно-аммонийной и кислотным вытяжкам.

Анализ по горизонтали означает сравнение параметров перехода в вытяжки между собой.

Анализ динамики содержания радиоцезия в водной вытяжке свидетельствует об уменьшении размеров перехода радионуклида по всем почвам (Таблица 5). Для супеси за два года, 2017 и 2018 гг., средние показатели составили 2,3% и 1,8%, песчаной почвы 4,3% и 2,2%, и торфяника 0,8% и 0,3%.

Таблица 4.
СОДЕРЖАНИЕ РАДИОЦЕЗИЯ В ПОЧВЕННЫХ ВЫТЯЖКАХ, 2018 г. в %/пробу

Проба	Объект	Горизонт почвы, см	Гранулометрический состав почвы	Содержание ^{137}Cs в почве,	H_2O , %	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, %	1 М HCl, %	6М HCl, %	Σ ^{137}Cs в растворах, %
13	Ветковский Шерстин 1	0–20	Аллювиальная супесчаная	61,1±7,7	1,1	0,8	1,8	19,5	23,2
15	Ветковский Шерстин 2. оз. Кривое	0–20	Аллювиальная супесчаная	38,35±4,9	1,6	2,3	2,3	37,3	43,5
17	Ветковский Шерстин 3	0–20	Аллювиальная супесчаная	53,7±6,8	1,7	6,1	3,4	90,5	101,7
19	Ветковский Шерстин 6	0–20	Аллювиальная супесчаная	46,55±5,8	2,6	0,9	1,1	61,9	66,4
3	Добрушский. Вылево 2	0–20	Аллювиальная песчаная	207,4±26,1	1,9	4,4	6,5	63,6	76,5
5	Добрушский Вылево 3	0–20	Аллювиальная песчаная	208,6±26,3	2,4	4,5	3,9	5,5	16,3
27	Добрушский Немир 1	0–20	Торф	60±7,6	0,5	1,2	2,2	29,0	32,8
29	Добрушский Немир 2	0–20	Торф	107,2±13,5	0,3	0,7	1,2	17,5	19,0
31	Добрушский Немир 3	0–20	Торф	71,9±9,4	0,1	0,7	1,8	24,5	27,1
33	Добрушский Немир 4	0–20	Торф	111,7±14,0	0,1	0,3	1,1	15,6	17,0

Таблица 5.
ДИНАМИКА ФОРМ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОЦЕЗИЯ В ПОЧВЕННЫХ ВЫТЯЖКАХ, в %

Год	Разновидность и тип почвы	Содержание ^{137}Cs в почве,	H_2O , %	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, %	1 М HCl, %	6М HCl, %	Σ ^{137}Cs в растворах, %
2017	Супесь	34,85–227,1	0,48–5,07	0,4–2,77	1,32–4,23	33,86–55,27	38,83–64,18
		77,0	2,3	1,3	2,9	39,2	45,7
2018	Супесь	38,35–61,1	1,1–2,6	0,8–6,1	1,1–3,4	19,5–90,5	23,2–101,7
		49,925	1,75	2,52	2,15	52,3	58,7
2017	Песчаная	18,4	4,35	7,61	4,35	41,85	58,15
2018	Песчаная	207,4–208,6	1,9–2,4	4,4–4,5	3,9–6,5	5,5–63,6	16,3–76,5
		208	2,15	4,45	5,2	34,55	46,4
2017	Торф	21,4–159,6	0,5–1,08	1,75–1,87	1,63–1,87	11,21–17,54	16,03–21,43
		90,5	0,79	1,81	1,75	14,375	18,73
2018	Торф	60–111,7	0,1–0,5	0,3–1,2	1,1–2,2	15,6–29,0	17,0–32,8
		87,7	0,3	0,7	1,6	21,7	24,0

Примечание: в числителе минимальное и максимальное значения, в знаменателе средние значения.

Для ацетатно-аммонийной вытяжки на супесях имело место увеличение перехода с 1,3% до 2,5%. На песке и торфе имело место уменьшение доступности соответственно 7,6–4,5% и 1,8–0,7%.

При экстрагировании соляной кислотой 1М концентрации на супеси переход радионуклида уменьшился с 2,9% до 2,2%. На песке выявлено увеличение доступности с 4,4% до 5,2%. На торфянике изменения доступности минимальные. Обработка почвы 6М соляной кислотой увеличила переход радионуклида на супеси и на торфянике. Увеличение количества радиоцезия в 6М кислоте может означать дальнейшее закрепление радионуклида почвенным поглощающим комплексом.

Суммарное количество радионуклида, переходящего в вытяжки, наиболее велико в минеральных почвах, то есть супеси и песке (Рисунок).

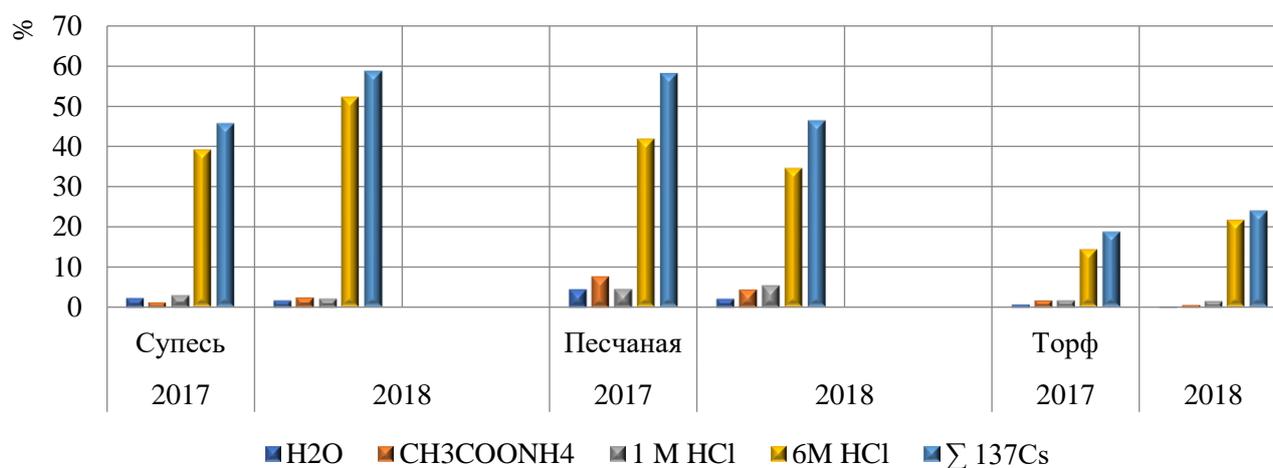


Рисунок. Динамика содержания радиоцезия в почвенных вытяжках.

Заключение

Суммарный процент средних величин по водной, ацетатно-аммонийной и 1М кислотной варьирует в пределах от 2,6% для торфа до 16,3% для песка. Различия по количеству радионуклидов, находящихся в водной, ацетатно-аммонийной и 1М кислотной и 6М кислотной вытяжкой, составили для супеси от 6 до 8 раз, для песка 2,6–2,9 раза, и для торфа 3,3–8,3 раза. Различия между количеством радионуклида в водной, ацетатно-аммонийной и 1М кислотной вытяжкой относительно небольшие по сравнению с 6М кислотной вытяжкой.

Общее суммарное, количество радионуклида, переходящего в вытяжки, наиболее велико в минеральных почвах, то есть супеси и песке. Для торфяника переход радионуклида в вытяжки существенно меньше, что может объясняться фиксирующей ролью органического вещества.

Список литературы

1. Иванов Ю. А., Кашпаров В. А., Лазарев Н. М. Физико-химические формы выпадений выброса на ЧАЭС и долговременная динамика поведения радионуклидов выброса в компонентах агросистем // Чернобыль-94. Итоги 8 лет работ по ЛПА на ЧАЭС: сб. докл. IV междунар. конф., Чернобыль, 1996. Т. 1. С. 256-269.
2. Голиков Ю. Н., Дацкевич П. И., Долгов В. М. Радиоактивная загрязненность и радиационная обстановка ландшафтных комплексов Гомельской и Могилевской областей //

Респ. науч.-практ. конф. по радиобиологии и радиоэкологии (Минск, 20-21 декабря 1990 г.): тез. докл. / Акад. наук БССР, Ин-т радиобиологии АН БССР. Минск, 1990. С. 55.

3. Бондарь П. Ф., Зайка В. В., Дутов А. И. Накопление цезия-137 в урожае сельскохозяйственных культур на производственных почвах в зависимости от удобрений и мелиорантов // I междунар. конф. «Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на ЧАЭС»: докл. Зеленый мыс. 1990. Т. 2. Ч. 2. С. 252.

4. Мешалкин Г. С., Архипов А. Н., Архипов Н. П., Буров Н. И. Особенности соотношения физико-химической подвижности, биологической доступности миграции радиоактивных нуклидов в почвах зоны аварии на ЧАЭС // I междунар. конф. «Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на ЧАЭС»: докл. Зеленый мыс. 1990. Т. 2. Ч. 2. С. 253-266.

5. Смян Н. И., Лисица В. Д., Сергеенко В. Т. Минералого-микроморфологическая интерпретация поведения ^{137}Cs в почве // I съезд Белорусского общества почвоведов «Почвы, их эволюция, охрана и повышение производительной способности в современных социально-экономических условиях»: материалы. Минск, Гомель, 1995. С. 261-262.

6. Петряев Е. П., Овсянникова С. В., Соколик Г. А. Об изменении форм нахождения радионуклидов на загрязненной территории БССР // IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по программе АЭС-ВО «Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере»: тез. докл. Гомель, 1990. С. 54.

7. Агеец В. Ю., Шугля Н. Н., Шмигельский А. А. Миграция искусственных радионуклидов цезия и стронция в различных типах почв Белоруссии // V конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по программе АЭС-ВО «Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере»: тез. докл. Пушино, 1991. С. 26.

8. Орлов П. М., Кузнецов А. В., Андриевский Е. И. Формы соединений цезия-137 в почве и его накопление в урожае сельскохозяйственных культур // I Всесоюзный радиобиологический съезд (Пушино, 21-27 августа 1989 г.): тез. докл. Пушино, 1989. Т. 2. С. 491-492.

9. Гребенщикова Н. В., Фирсакова С. К., Тимофеев С. Ф. Исследование закономерностей поведения радиоцезия в почвенно-растительном покрове Белорусского Полесья после аварии на ЧАЭС // Агрехимия. 1992. №1. С. 91-99.

10. Ильин М. И., Перепелятников Г. П., Пристер Б. С. Влияние приемов коренного улучшения торфянистого луга на переход цезия-137 из почвы в травостой // Третья Всесоюзная конференция по сельскохозяйственной радиологии: тез. докл. Обнинск. 1990. Т. I. С. 42.

11. Йохансон К. Й., Долгилевич М. И., Васенков Г. И. Функции органического вещества, определяющие поведение радиоцезия в системе почва - растение // Вістник аграрної науки. 1997. №3. С. 52-54.

12. Моисеев И. Т., Рерих Л. А. Влияние свойств почв, межвидовых различий растений и времени укоса на динамику накопления ^{90}Sr многолетними травами // Агрехимия. 1984. №12. С. 95-98.

13. Подоляк А. Г., Тимофеев С. Ф., Гребенщикова Н. В., Перскова Т. Ф. Динамика перехода Cs-137 и Sr-90 в травостой пойменных лугов в зависимости от биологических особенностей растений // Природные ресурсы. 2001. №4 С. 103-107.

14. Тимофеев С. Ф., Чертко Н. К., Мышлен Т. А. Проблемы сельскохозяйственного использования пойменных ландшафтов, загрязненных цезием-137 в результате аварии на ЧАЭС // Белорусское сельское хозяйство. 2002. №5. С. 40-42.

15. Тимофеев С. Ф., Тимофеева Т. А. Влияние ландшафтно-геохимических условий на аккумуляцию ^{137}Cs и ^{90}Sr травостоем пойменного луга // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. 2005. №6 (33). С. 105-110.

16. Богдевич И. М., Тарасюк С. В., Новикова И. И., Довнар В. А., Карпович И. Н., Третьяков Е. С. Вертикальная миграция радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах земель запаса и доступность их растениям // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2013. №3. С. 58-70.

17. Воронов С. И. Закономерности миграции радионуклидов в природных биогеоценозах и аграрных экосистемах на территории Московской области // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. №9. С. 154-159.

References:

1. Ivanov, Yu. A., Kashparov, V. A., & Lazarev, N. M. (1996). Fiziko-khimicheskie formy vypadenii vybrosa ChAES i dolgovremennaya dinamika povedeniya radionuklidov vybrosa v komponentakh agroekosistem. In: *Chernobyl'-94: Tez. dokl. IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Itogi 8 let rabot po likvidatsii posledstviu avarii na ChAES"*. 256.

2. Golikov, Yu. N., Datskevich, P. I., & Dolgov, V. M. (1990). Radioaktivnaya zagryaznennost' i radiatsionnaya obstanovka landshaftnykh kompleksov Gomel'skoi i Mogilevskoi oblastei. In: *Resp. nauch.-prakt. konf. po radiobiologii i radioekologii: Tez. dokl., Minsk, 20-21 dekabrya 1990 g. Akad. nauk BSSR, In-t radiobiologii AN BSSR. Minsk, 55.*

3. Bondar, P. F., Zaika, V. V., & Dutov, A. I. (1990). Nakoplenie tseziya-137 v urozhae sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na proizvodstvennykh pochvakh v zavisimosti ot udobrenii i meliorantov. In: *Biologicheskie i radioekologicheskie aspekty posledstviu avarii na Chernobyl'skoi atomnoi stantsii: Tez. dokl. I Mezhdunar. konf. "Zelenyi mys". Moscow, 252.*

4. Meshalkin, G. S., Arkhipov, A. N., Arkhipov, N. P., & Burov, N. I. (1990). Osobennosti sootnosheniya fiziko-khimicheskoi podvizhnosti, biologicheskoi dostupnosti migratsii radioaktivnykh nuklidov v pochvakh zony avarii na ChAES. In: *Dokl. I mezhdunar. konf. "Biologicheskie i radioekologicheskie aspekty posledstviu avarii na ChAES". Zelenyi mys. V. 2, 2. 253-266.*

5. Smeyan, N. I., Lisitsa, V. D., & Sergeenko, V. T. (1995). Mineralogomikromorfologicheskaya interpretatsiya povedeniya ^{137}Cs v pochve. In: *Pochvy, ikh evolyutsiya, okhrana i povyshenie proizvoditel'noi sposobnosti v sovremennykh sotsial'no-ekonomicheskikh usloviyakh: Materialy I s'ezda Belorusskogo obshchestva pochvovedov. Minsk, Gomel', 261-262.*

6. Petryaev, E. P., Ovsyannikova, S. V., & Sokolik, G. A. (1990). Ob izmenenii form nakhozheniya radionuklidov na zagryaznennoi territorii BSSR. In: *Geokhimicheskie puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v biosfere: Tez. dokl. IV konf. nauch. soveta pri GEOKhI AN SSSR po programme "AES-VO". Gomel', 54.*

7. Ageets, V. Yu., Shuglya, N. N., & Shmigel'skii, A. A. (1991). Migratsiya iskusstvennykh radionuklidov tseziya i strontsiya v razlichnykh tipakh pochv Belorussii. In: *Geokhimicheskie puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v biosfere: Tez. dokl. V konf. nauch. soveta pri GEOKhI AN SSSR po programme "AES-VO". Pushchino, 26.*

8. Orlov, P. M., Kuznetsov, A. V., & Andrievskii, E. I. (1989). Formy soedinenii tseziya-137 v pochve i ego nakoplenie v urozhae sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. In: *I Vsesoyuznyi radiobiologicheskii s'ezd: Tez. dokl., Pushchino, 21-27 avgusta 1989 g. Pushchino, (2). 491-492.*

9. Grebenshchikova, N. V., Firsakova, S. K., & Timofeev, S. F. (1992). Issledovanie zakonomernostei povedeniya radiotseziya v pochvenno-rastitel'nom pokrove Belorusskogo Poles'ya posle avarii na ChAES. *Agrokimiya*, (1), 91-99.

10. Ilyin, M. I., Perepelyatnikov, G. P., & Prister, B. S. (1990). Vliyanie priemov korenogo uluchsheniya torfyanistogo luga na perekhod tseziya-137 iz pochvy v travostoi. In: *Tret'ya Vsesoyuznaya konferentsiya po sel'skokhozyaistvennoi radiologii: tez. dokl. Obninsk. I. 42.*
11. Iokhanson, K. I., Dolgilevich, M. I., & Vasenkov, G. I. (1997). Funktsii organicheskogo veshchestva, opredelyayushchie povedenie radiotseziya v sisteme pochva-rastenie. *Visn. agrar. nauki*, (3), 52-54.
12. Moiseev, I. T., & Rerikh, L. A. (1984). Vliyanie svoystv pochv, mezhhvidovykh razlichii rastenii i vremeni ukosa na dinamiku nakopleniya ^{90}Sr mnogoletnimi travami. *Agrokhimiya*, (12), 95-98.
13. Podolyak, A. G., Timofeev, S. F., Grebenshchikova, N. V., & Persikova, T. F. (2001). Dinamika perekhoda Cs-137 i Sr-90 v travostoi poimennykh lugov v zavisimosti ot biologicheskikh osobennosti rastenii [The dynamics of ^{137}Cs and ^{90}Sr transfer to grasses in river meadows depending on biological features of plants]. *Prirodnye resursy*, (4), 103-107.
14. Timofeev, S. F., Chertko, N. K., & Myshlen, T. A. (2002). Problemy sel'skokhozyaistvennogo ispol'zovaniya poimennykh landshaftov zagryaznennykh tseziem-137 v rezul'tate avarii na ChAES. *Belorusskoe sel'skoe khozyaistvo*, (5), 40-42.
15. Timofeev, S. F., & Timofeeva, T. A. (2005). Vliyanie landshaftno-geokhimicheskikh uslovii na akkumulyatsiyu ^{137}Cs i ^{90}Sr travostoem poimennogo luga. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny*, (6), 33.
16. Bogdevitch, I. M., Tarasiuk, S. V., Novikova, I. I., Dovnar, V. A., Karpovich, I. N., & Tretyakov, E. S. (2013). Vertikal'naya migratsiya radionuklidov ^{137}Cs i ^{90}Sr v pochvakh zemel' zapasa i dostupnost' ikh rasteniyam [Vertical migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils of abandoned land and their availability to plants]. *Vestsi Nats. akad. navuk Belarusi. Ser. agrarnykh navuk*, (3), 58-70.
17. Voronov, S. I. (2017). Zakonomernosti migratsii radionuklidov v prirodnykh biogeotsenozah i agrarnykh ekosistemah na territorii Moskovskoy oblasti [The regularities of migration of radionuclides in natural biogeocenoses and agrarian ecosystems on the territory of the moscow region]. *Uspehi sovremennoy nauki*, 1(9), 154-159.

Работа поступила
в редакцию 22.10.2018 г.

Принята к публикации
26.10.2018 г.

Ссылка для цитирования:

Дайнеко Н. М., Тимофеев С. Ф., Жадько С. В. Оценка биологической доступности радионуклидов в почве // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №11. С. 39-50. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/daineka-timofeev-zhadko> (дата обращения 15.10.2018).

Cite as (APA):

Daineka, M., Timofeev, S., & Zhadko, S. (2018). Assessment of biological availability of radionuclides in the soil. *Bulletin of Science and Practice*, 4(11), 39-50. (in Russian).