

Влияние агроメリоративных и агрохимических мероприятий на продуктивность полевых культур, подвижность ^{90}Sr в почве и его поступление в растения

С. П. Арышева¹, Д. Г. Свириденко¹, А. Н. Ратников¹, К. В. Петров¹, В. Н. Мазуров², П. С. Семешкина²✉

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

²Калужский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Калужская область, Россия

✉ E-mail: polina.semeshkina@gmail.com

Аннотация. На основе полевых экспериментов на радиоактивно-загрязненных дерново-подзолистых почвах Новозыбковского и Красногорского районов Брянской области дана оценка эффективности мероприятий по снижению поступления ^{90}Sr в продукцию растениеводства. Внесение извести на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ приводило к снижению Kn^{90}Sr овсом в 1,4–2,2, ячменем – в 1,3–2,65 раза. Эффективность действия мартеновского и электроплавильного шлаков равноценна действию извести; накопление ^{90}Sr в зерне на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ снижалось в 2,1–2,6 раза. При внесении в почву $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ и шлаков содержание ^{90}Sr в зерне ячменя в 3,7–4,2 раза ниже, чем на контроле, а Kn^{90}Sr зерном овса при совместном внесении P_{240} и шлаков снижался в 3,1 раза. Вынос ^{90}Sr с зерном при этом снижался в 1,9–2,5 раза. Внесение P_{240} на фоне шлаков привело к снижению подвижных форм ^{90}Sr в почве в 1,3 раза и к повышению необменных форм в 4,2–4,7 раза. Эффект сохранялся на 2-й год. Количество доступного ^{90}Sr во всех вариантах опыта снижалось в 1,2 раза, необменного возрастало по сравнению с фоном в 2,9–3,3 раза. Применение калийных удобрений повысило урожай зерна ячменя в 1,2–1,4, озимой ржи – в 1,7–2,6, клубней картофеля – в 1,3–1,5 раза. Внесение $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ снижало переход ^{90}Sr в растения ржи, картофеля и ячменя – в 1,5–2,2 раза. Вынос ^{90}Sr с зерном ячменя снижался в 1,6–1,8 раза. Применение калийных удобрений приводило к уменьшению выноса ^{90}Sr с урожаем клубней в 1,3–2,0 раза, Kn^{90}Sr снизился в 1,8–4,6 раза. Накопление ^{90}Sr в зерне и клубнях при внесении $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{240}$ уменьшилось в 1,4–3,0 раза. Увеличение дозы фосфора до 240 кг/га в составе полного минерального удобрения повышало урожайность ржи в 1,4–1,6 раза и снижало Kn^{90}Sr зерном в 2 раза. Внесение $\text{P}_{160-240}$ обеспечило снижение поступления ^{90}Sr в урожай ячменя в 2,4–3,0 раза, вынос ^{90}Sr с зерном ячменя снижался в 1,8–2,1 раза. Накопление ^{90}Sr в урожае ячменя и картофеля при внесении P_{240} и K_{240} в 3,5–5,2 раза меньше, чем на неудобренной почве.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, ^{90}Sr , коэффициент накопления, подвижность радионуклида, сельскохозяйственные культуры, шлаки, минеральные удобрения, агроメリоративные и агрохимические мероприятия.

Для цитирования: Арышева С. П., Свириденко Д. Г., Ратников А. Н., Петров К. В., Мазуров В. Н., Семешкина П. С. Влияние агроメリоративных и агрохимических мероприятий на продуктивность полевых культур, подвижность ^{90}Sr в почве и его поступление в растения // Аграрный вестник Урала. 2019. № 8 (187). С. 8–15. DOI: 10.32417/article_5d908b8596ff29.11846820.

Дата поступления статьи: 26.04.2019.

Постановка проблемы (Introduction)

Радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных угодий на территории РФ обусловлено долгоживущими радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые поступили в окружающую среду в результате крупных радиационных аварий на химкомбинате «Маяк» (Южный Урал), Чернобыльской АЭС, АЭС «Фукусима-1» в Японии, а также испытаний ядерного оружия. До аварии на ЧАЭС плотность загрязнения почвенного покрова в Брянской, Тульской, Калужской и Орловской областях составляла: ^{137}Cs – 1,11–1,48 кБк/м², ^{90}Sr – 1,48–3,33 кБк/м². Плотность загрязнения почвы ^{90}Sr на начало 1992 г. в отдельных районах Брянской области возросла до 108, в Орловской – до 28, в Калужской – до 11, в Тульской – до 9 кБк/м². Были загрязнены и населенные пункты. К примеру, почти через 18 лет после аварии, на 01.01.2015 г., плотность загрязнения ^{90}Sr некоторых населенных пунктов наиболее ра-

диоактивно загрязненного Гордеевского района Брянской области достигала 0,45 Ки/км² (16,65 кБк/м²) [1].

Система защитных мероприятий в агропромышленном комплексе планировалась с ориентацией на плотность загрязнения почв ^{137}Cs . Было показано, в частности, что при расчете кадастровой стоимости значительной части радиоактивно загрязненных земель сельскохозяйственного назначения Новозыбковского, Клинцовского, Гордеевского и Злынковского районов Брянской области с плотностью загрязнения ^{137}Cs свыше 555 кБк/м² расходы, связанные с использованием земли, превышали доход. Производство сельскохозяйственной продукции на данных участках оказалось нерентабельным [2].

Основной принцип в ликвидации последствий аварии в Японии на АЭС «Фукусима-1» существенно различается от подходов к решению аналогичных задач по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, где основную роль игра-

ли изменения отраслей агропромышленного комплекса на землях сельскохозяйственного назначения, интенсивная химизация, использование специальных сорбентов в кормлении животных и размещение отраслей сельского хозяйства на площадях с учетом плотности загрязнения ^{137}Cs , а также временное исключение наиболее загрязненных земель из использования. Главным направлением ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» была деконтаминация (очистка) почвенно-растительного покрова, которая достигалась удалением верхнего, наиболее загрязненного горизонта почвы (4–5) [3].

Радиационный контроль качества продукции по содержанию ^{90}Sr не проводился; полагалось, что все мероприятия одновременно будут улучшать радиационную обстановку в регионе и по отношению к ^{90}Sr . ^{90}Sr как тугоплавкий изотоп выпал, в основном, в ближней зоне аварии на Чернобыльской АЭС и представлял опасность для ряда районов Беларуси и Украины. Хотя коэффициенты перехода ^{90}Sr из всех типов почв в растениеводческую продукцию выше, чем ^{137}Cs , поступление из рациона животных в животноводческую продукцию для ^{90}Sr ниже, чем для ^{137}Cs (для молока в 5–10 раз, а для мяса приблизительно в 100 раз) и не превышало допустимый уровень уже в первые годы после аварии [4].

Особенностью отдаленного периода после аварии на ЧАЭС является постепенное ужесточение санитарно-гигиенических нормативов по содержанию радионуклидов в продукции, получаемой на загрязненной территории. Поэтому получение сверхнормативно загрязненной продукции растениеводства возможно при относительно невысокой плотности загрязнения почвы ^{90}Sr . К изучению закономерностей поведения ^{90}Sr в сельскохозяйственных и луговых экосистемах в зависимости от природных особенностей, времени взаимодействия радионуклида с почвами, на территории РФ приступили значительно позже, чем в Украине и Республике Беларусь.

Была рассмотрена деятельность радиологических подразделений агрохимической службы страны по обследованию сельхозугодий и снижению последствий радиоактивного загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Описаны и оценены агрохимические, агротехнические и мелиоративные мероприятия в Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областях с 1986 по 1995 гг. Рассмотрена радиационная ситуация в названных областях в настоящее время. Описаны результаты полевых опытов, проведенных на Новозыбковской государствен-

ной сельскохозяйственной опытной станции и на сельскохозяйственных угодьях, подвергшихся интенсивному загрязнению радиоактивными выпадениями [5].

При значительном уменьшении финансовых инвестиций в защитные мероприятия получение экологически безопасной продукции растениеводства будет определяться внедрением эффективных приемов и технологий по ограничению накопления радиоактивных веществ в первом звене (почва – растения) в цепочке миграции радионуклидов, ведущей к их поступлению в организм человека. Применение защитных мероприятий в агропромышленном комплексе, направленных на уменьшение содержания радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства, производимой на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, служит эффективным способом снижения дозы внутреннего облучения населения. Следует подчеркнуть, что ограничение доз внутреннего облучения часто экономически более эффективно, чем уменьшение дозы внешнего облучения (в расчете затрат на предотвращение коллективной дозы).

Целью наших исследований является изучение поступления ^{90}Sr в продукцию растениеводства в зависимости от типа почвы и радиологическое обоснование наиболее перспективных защитных мероприятий, гарантирующих получение продуктов питания, соответствующих СанПиН 2.3.2. 2650-10.

Методология и методы исследований (Methods)

Полевые опыты по оценке влияния агрономелиоративных и агрохимических мероприятий на поступление ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры проводились на дерново-подзолистых почвах Новозыбковского и Красногорского районов Брянской области при плотности загрязнения почвенного покрова ^{90}Sr 8,4–80,0 кБк/м².

В опыте изучали влияние известки – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (вносили 5,4 т/га = 1 Нг для снижения кислотности почвенного раствора), мартеновского (МШ) – 7,8 т/га и электроплавильного (ЭШ) – 6 т/га шлаков (таблица 1) на подвижность ^{90}Sr в дерново-подзолистой супесчаной почве и поступление ^{90}Sr в растения овса и ячменя.

Агрохимические показатели почвы до внесения известковых материалов: $\text{pH}_{\text{KCl}} - 4,1$; Нг – 4,5 смоль (экв) / 100 г почвы; содержание гумуса 0,98 %; P_2O_5 и $\text{K}_2\text{O} - 78$ и 51 мг / 1 кг почвы соответственно; обменного Ca – 1,7 смоль (экв) / 100 г почвы. Схема опыта: 1) $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ – контроль; 2) $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{Ca}(\text{OH})_2$; 3) $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{МШ}$; 4) $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{ЭШ}$; 5) $\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80} + \text{МШ}$; 6) $\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80} + \text{ЭШ}$. Размер опытной делянки – 6 м². Повторность опыта трехкратная.

Таблица 1
Химический состав шлаков (%)

Шлаки	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂
МШ	40,0	8,2	6,8	4,7	14,0	6,2	0,99	14,3
ЭШ	52,1	6,0	1,0	–	–	–	0,14	17,0

Table 1
Chemical composition of slags (%)

Slags	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂
Open-hearth slag (OHS)	40,0	8,2	6,8	4,7	14,0	6,2	0,99	14,3
Electric smelting slag (ESS)	52,1	6,0	1,0	–	–	–	0,14	17,0

Экспериментальная оценка влияния агрохимических мероприятий при возделывания сельскохозяйственных культур на переход и накопление ⁹⁰Sr в урожае проводилась в многофакторном полевом опыте на дерново-подзолистой песчаной почве. Агрохимические показатели почвы: рН_{KCl} – 5,9; Нг – 0,64 смоль (экв) / 100 г почвы; содержание гумуса 1,82 %; содержание P₂O₅ и K₂O – 280 и 58 мг / 1 кг почвы; содержание обменного Са, Mg – 5,2 и 0,3 смоль(экв) / 100 г почвы, соответственно. Опытные культуры – озимая рожь сорта Пуховчанка, ячмень сорта Московский-2, картофель сорта Невский. Схема опыта включала: 1) контроль (без удобрений); 2) N₈₀ P₈₀ K₈₀; 3) N₈₀ P₈₀ K₁₆₀; 4) N₈₀ P₈₀ K₂₄₀; 5) N₈₀ P₁₆₀ K₈₀; 6) N₈₀ P₂₄₀ K₈₀; 7) N₈₀ P₂₄₀ K₂₄₀. Перед закладкой опыта на весь участок была внесена доломитовая мука в дозе 10 т/га. Плотность загрязнения почвы ⁹⁰Sr – 19 ± 4 кБк/м². Размер опытных делянок – 80 м². Повторность опыта трехкратная. Сельскохозяйственные культуры убирали в стадии технической спелости.

Агрохимические показатели почв определяли по общепринятым методикам: гранулометрический анализ почвы – по Н. А. Качинскому, гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО; обменную кислотность рН_{KCl} – потенциометрическим методом; гидролитическую кислотность – по Каппену; сумму поглощенных оснований – по Каппену – Гильковицу; P₂O₅ и K₂O – по Кирсанову;

Са и Mg – методом атомной абсорбции в пламенном варианте на приборе Varian Spektr AA 250+; степень насыщенности почв основаниями – расчетным методом. Содержание ⁹⁰Sr в почвенных и растительных образцах определялось радиохимическим методом, путем осаждения оксалатов ⁹⁰Sr и Са с радиометрическим определением на аттестованном низкофономом α-β-счетчике Canberra-2400. Определение форм нахождения ⁹⁰Sr в почвах проводили по соответствующей методике: подвижных форм радионуклида (суммарное количество извлекается дистиллированной водой и 1н СН₃COONH₄ рН 7,0) прочносвязанного ⁹⁰Sr (не извлекается 6н НСl).

Математическую обработку результатов исследований, включавшую расчет статистических оценок, выполняли с использованием программы Microsoft Excel 2007 с 95 % уровнем значимости результатов.

В качестве параметра миграции ⁹⁰Sr в системе «почва – растение» использовали коэффициент накопления (Кн) (соотношение концентрации ⁹⁰Sr в растениях и почвах). Кроме Кн⁹⁰Sr растениями использовали показатель V – вынос этого радионуклида с урожаем с единицы площади (Бк/м²) при плотности загрязнения 37 кБк/м². Применение этого параметра целесообразно для расчетов коллективных доз облучения населения за счет потребления пищевых продуктов, содержащих радионуклид.

Таблица 2

Влияние известковых материалов на накопление ⁹⁰Sr в растениях овса и ячменя и вынос радионуклида с урожаем

Вариант	Овес, зерно				Ячмень, зерно			
	Кн ⁹⁰ Sr		V ⁹⁰ Sr, Бк/м ²		Кн ⁹⁰ Sr		V ⁹⁰ Sr, Бк/м ²	
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀	0,93	3,82	31,8	174,0	0,69	2,78	13,8	67,3
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + Ca(OH) ₂	0,42	2,80	16,8	139,9	0,26	2,12	8,8	84,5
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + МШ	0,43	2,63	16,5	125,8	0,28	1,97	10,2	88,0
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + ЭШ	0,44	2,47	18,1	129,5	0,27	1,90	8,8	72,8
N ₈₀ P ₂₄₀ K ₈₀ + МШ	0,30	1,64	12,8	80,9	0,18	1,15	7,4	57,0
N ₈₀ P ₂₄₀ K ₈₀ + ЭШ	0,30	1,69	13,2	86,6	0,17	1,21	6,4	61,4
НСР ₀₅	0,07	0,15			0,08	0,33		

Примечание: V – вынос радионуклида (в этой и в следующей таблице).

Table 2

Influence of lime materials on the accumulation of ⁹⁰Sr in plants of oats and barley and removal of radionuclide with yield AC of ⁹⁰Sr (Bq kg⁻¹ plant)(Bq kg⁻¹ soil)⁻¹

Variant	Oats, grain				Barley, grain			
	Accumulation coefficient (AC of ⁹⁰ Sr)		R ⁹⁰ Sr, Bq/m ²		AC of ⁹⁰ Sr		R ⁹⁰ Sr, Bq/m ²	
	grain	straw	grain	straw	grain	straw	grain	straw
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀	0,93	3,82	31,8	174,0	0,69	2,78	13,8	67,3
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + Ca(OH) ₂	0,42	2,80	16,8	139,9	0,26	2,12	8,8	84,5
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + OHS	0,43	2,63	16,5	125,8	0,28	1,97	10,2	88,0
N ₈₀ P ₈₀ K ₈₀ + ESS	0,44	2,47	18,1	129,5	0,27	1,90	8,8	72,8
N ₈₀ P ₂₄₀ K ₈₀ + OHS	0,30	1,64	12,8	80,9	0,18	1,15	7,4	57,0
N ₈₀ P ₂₄₀ K ₈₀ + ESS	0,30	1,69	13,2	86,6	0,17	1,21	6,4	61,4
LSD ₀₅	0,07	0,15			0,08	0,33		

Note: R – radionuclide removal, in this and the following table.

Результаты исследований и их обсуждение (Results)

Наблюдения за поведением ^{90}Sr и ^{137}Cs глобальных выпадений и после аварии на Южном Урале показали, что накопление радионуклидов растениями из почв зависит от комплекса факторов, среди которых выделяются 4 основные группы: физико-химические свойства радионуклидов и их концентрация в почве; агрохимическая характеристика почв; биологические особенности растений; технологии возделывания культур. Основное количество ^{90}Sr продолжительное время находится в легкодоступном состоянии, так как поглощается почвами в ионообменной форме. Известно, что такие свойства почвы, как гранулометрический и минералогический состав, реакция почвенного раствора, емкость поглощения, содержание гумуса, состав поглощенных оснований, оказывают значительное влияние на прочность закрепления ^{90}Sr в почве. Интенсивность миграции ^{90}Sr в системе «почва – растения» определяется типом почвы, степенью ее окультуренности и природно-климатическими условиями среды.

Кислая реакция почвенной среды является одной из главных причин низких урожаев сельскохозяйственных культур. Известкование позволяет снизить кислотность почвенного раствора, улучшает агрофизические и физико-химические свойства почвы, способствуя значительному увеличению урожая.

Внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ приводило к снижению Kn^{90}Sr овсом в 1,4–2,2 раза. Накопление ^{90}Sr в урожае ячменя, оцененное по Kn , при известковании почвы снижалось в 1,3–2,65 раза (таблица 2).

Орлов с соавторами [6] отмечают целесообразность внесения в почву, особенно на ранних стадиях работ по снижению последствий радиационных аварий, мелиорантов с высоким содержанием калия и низким содержанием стабильного цезия, имеющих активные сорбционные центры, в том числе металлургического шлака. Это должно способствовать стабилизации ^{137}Cs и ^{90}Sr в мелиорантах и, вероятно, дополнительному снижению накопления радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур [6].

Эффективность действия МШ и ЭШ, используемых в качестве известковых материалов, по ограничению поступления ^{90}Sr в растения равноценна действию $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Накопление ^{90}Sr в зерне яровых зерновых культур при внесении МШ и ЭШ в почву на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ снижалось в 2,1–2,6 раза. Внесение повышенной дозы фосфора в составе полного минерального удобрения и шлаков приводило к дальнейшему уменьшению перехода ^{90}Sr из почвы в растения. Содержание ^{90}Sr в зерне ячменя при внесении $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ и шлаков в 3,7–4,2 раза ниже, чем в контроле. Kn^{90}Sr зерном овса при совместном внесении повышенной дозы фосфора и шлаков снизился в 3,1 раза (таблица 2).

Эффективность известкования на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ по снижению перехода ^{90}Sr в ячмень и овес, оцениваемая по выносу, была несколько ниже, чем по Kn . Вынос ^{90}Sr с зерном ячменя и овса с единицы площади при внесении шлаков и повышенных доз фосфорных удобрений (P_{240}) снижался в 1,9–2,5 раза по сравнению с фоном. Уменьшение поступления ^{90}Sr в растения при известковании почвы происходило за счет повышения прочности сорбции радионуклида.

Таблица 3
Влияние известкования на соотношение форм нахождения ^{90}Sr в почве

Вариант	1-й год опыта			2-й год опыта		
	Водорастворимая	Обменная	Необменная	Водорастворимая	Обменная	Необменная
	% от общего количества в почве					
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$	12,1	80,2	6,1	10,6	81,7	5,9
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	9,4	73,2	14,5	8,0	70,9	17,2
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{МШ}$	8,5	72,0	16,5	7,0	67,5	19,6
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{ЭШ}$	7,5	69,6	19,6	7,8	68,8	18,4
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80} + \text{МШ}$	6,1	63,0	25,7	5,6	63,5	25,9
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80} + \text{ЭШ}$	6,2	62,5	28,5	6,4	60,9	26,5

Table 3
Influence of liming on the ratio of forms of ^{90}Sr in soil

Variant	1st year of experience			2nd year of experience		
	Watersoluble	Exchange	Nonexchange	Watersoluble	Exchange	Nonexchange
	% of the total content in the soil					
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$	12,1	80,2	6,1	10,6	81,7	5,9
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	9,4	73,2	14,5	8,0	70,9	17,2
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{OHS}$	8,5	72,0	16,5	7,0	67,5	19,6
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80} + \text{ESS}$	7,5	69,6	19,6	7,8	68,8	18,4
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80} + \text{OHS}$	6,1	63,0	25,7	5,6	63,5	25,9
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80} + \text{ESS}$	6,2	62,5	28,5	6,4	60,9	26,5

При известковании кислой дерново-подзолистой супесчаной почвы ^{90}Sr более прочно сорбируется почвой, но значительное количество радионуклида находится в легкодоступной для корневого усвоения растениями форме (таблица 3).

При внесении в почву извести и шлаков наблюдалось уменьшение доли обменной формы ^{90}Sr , увеличение не-обменной и прочно связанной. Под влиянием шлаков и извести доля необменного ^{90}Sr увеличилась в 2,4–3,2 раза. Внесение повышенных доз фосфорных удобрений (P_{240}) на фоне шлаков приводит к снижению подвижных форм радионуклида в 1,3 раза по сравнению с контролем. Содержание необменных форм ^{90}Sr при повышенных дозах фосфорных удобрений возрастало в 4,2–4,7 раза. Влияние высоких доз фосфорных удобрений и шлаков на подвижность ^{90}Sr проявилось и на 2-й год опыта. Отмечено, что количество необменного ^{90}Sr при внесении $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ и известковых материалов возрастало по сравнению с $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ в 2,4–2,9 раза. С течением времени содержание ^{90}Sr , наиболее доступного для корневого усвоения растениями, во всех вариантах опыта снизилось в 1,2 раза. Доля прочносвязанного ^{90}Sr в 1-й год наблюдений колебалась в пределах 1,6–5,2 %, а через 2 года составляла 1,8–6,2 % от общего количества радионуклидов. Основным минеральным компонентом, принимающим участие в образовании прочных органоминеральных связей, в песчаных и супесчаных почвах могут быть только полуторные окислы Fe и Al или гидрослюды. Уменьшение подвижности ^{90}Sr при внесении $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обусловлено сдвигом

равновесия в сторону гуминовых кислот с уменьшением содержания фульвокислот, что, в свою очередь, ведет к снижению миграционной способности ^{90}Sr . Степень закрепления ^{90}Sr в твердой фазе зависит от соотношения мобильных и малоподвижных форм гумуса.

Наиболее существенное значение для повышения урожая сельскохозяйственных культур имеют удобрения, содержащие питательный элемент, недостаток которого ограничивает урожай на данной почве.

Вид и сорт зерновых культур оказывают существенное влияние на аккумуляцию ^{90}Sr в зерне. Экспериментальная оценка влияния различных видов и доз минеральных удобрений на поступление ^{90}Sr в продукцию растениеводства проведена на дерново-подзолистой песчаной почве. Внесение полного минерального удобрения в почву в дозе $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ приводило к снижению перехода ^{90}Sr в растения в 1,5–2,2 раза в зависимости от их биологических особенностей (таблица 4).

По данным [7], внесение фосфорных удобрений приводит к уменьшению усвоения ^{90}Sr растениями на всех типах пахотных почв, загрязненных радионуклидом. При загрязнении почв ^{90}Sr наиболее эффективным является внесение повышенных (двойных) доз фосфорных удобрений. Накопление радионуклида в урожае уменьшилось в 1,2–3,5 раза. При этом рекомендуется применение повышенных (двойных) доз калийных удобрений и азотных удобрений под запланированный урожай. Накопление ^{90}Sr в урожае может быть уменьшено до 3 раз [7]. Изменение поглощения ^{90}Sr под влиянием добавления фосфора

Таблица 4

Влияние минеральных удобрений на накопление ^{90}Sr в урожае сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистой песчаной почве

Вариант	Рожь озимая, зерно		Картофель, клубни		Ячмень, зерно	
	Кн ^{90}Sr	V ^{90}Sr , Бк/м ²	Кн ^{90}Sr	V ^{90}Sr , Бк/м ²	Кн ^{90}Sr	V ^{90}Sr , Бк/м ²
Контроль	0,384	8,3	0,093	23,8	0,451	11,6
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$	0,256	9,5	0,051	17,7	0,208	6,5
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{160}$	0,226	10,0	0,036	13,1	0,220	7,2
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{240}$	0,274	15,6	0,030	11,5	0,200	7,1
$\text{N}_{80}\text{P}_{160}\text{K}_{80}$	0,194	9,9	0,024	9,4	0,185	6,3
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80}$	0,190	11,6	0,020	8,2	0,150	5,6
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{240}$	0,135	8,6	0,018	7,4	0,128	5,3
HCP ₀₅	0,020		0,003		0,015	

Table 4

The influence of mineral fertilizers on the accumulation of ^{90}Sr in crop yields on soddy-podzolic sandy soil

Variant	Winter rye, grain		Potatoes, tubers		Barley, grain	
	AC of ^{90}Sr	R ^{90}Sr , Bg/m ²	AC of ^{90}Sr	R ^{90}Sr , Bg/m ²	AC of ^{90}Sr	R ^{90}Sr , Bg/m ²
Control	0,384	8,3	0,093	23,8	0,451	11,6
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$	0,256	9,5	0,051	17,7	0,208	6,5
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{160}$	0,226	10,0	0,036	13,1	0,220	7,2
$\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{240}$	0,274	15,6	0,030	11,5	0,200	7,1
$\text{N}_{80}\text{P}_{160}\text{K}_{80}$	0,194	9,9	0,024	9,4	0,185	6,3
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{80}$	0,190	11,6	0,020	8,2	0,150	5,6
$\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{240}$	0,135	8,6	0,018	7,4	0,128	5,3
LSD ₀₅	0,020		0,003		0,015	

в почву объясняется дефицитом подвижных его форм в почве как одного из важных элементов питания растения, образованием труднорастворимых соединений ^{90}Sr и P , а также изменением метаболизма в отношении усвоения щелочных металлов при внесении фосфорных удобрений. Увеличение дозы фосфора с 80 до 240 кг/га в составе полного минерального удобрения снижало Kn^{90}Sr зерном озимой пшеницы в 2 раза. Внесение P_{240} относительно варианта $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ увеличивало урожайность озимой ржи в 1,4–1,6 раза, и, как следствие, вынос ^{90}Sr с зерном возрастал в 1,2 раза (таблица 4). Ратников с соавторами отмечают, что для снижения поступления ^{90}Sr в продукцию растениеводства соотношение $\text{N}:\text{P}$ должно быть 1:2 [8].

Добавление в дерново-подзолистую почву фосфорных удобрений в двойной и тройной дозе обеспечивало снижение поступления ^{90}Sr в урожай ячменя в 2,4–3,0 раза. Вынос ^{90}Sr с зерном ячменя при внесении в почву возрастающих доз фосфорных удобрений снижался в 1,8–2,1 раза. Внесение двойной и тройной дозы фосфора (P_{160} и P_{240}) под картофель обуславливало уменьшение Kn^{90}Sr клубнями в 2,1–2,65 раза по сравнению с фоном $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$. Эффективность добавления повышенных доз фосфорных удобрений в почву на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}$ по критерию выноса ^{90}Sr с урожаем картофеля с единицы площади меньше, чем по Kn^{90}Sr , и составила 1,9–2,2 раза.

Накопление ^{90}Sr в зерне и клубнях картофеля при внесении K_{240} на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}$ уменьшалось в 1,4–3,0 раза. Чем выше доза вносимого калия (K_{160} , K_{240}), тем сильнее было выражено снижение поступления ^{90}Sr в растения. Максимальное снижение Kn^{90}Sr растениями при внесении K_{240} отмечено для картофеля и составляло 2,6–3,0 раза. Добавление калийных удобрений при возделывании озимой ржи, картофеля и ячменя вело к заметному увеличению урожая: зерна ячменя – в 1,2–1,4 раза, озимой ржи – в 1,7–2,6 раза, клубней картофеля – в 1,3–1,5 раза. Если оценивать эффективность внесения калийных удобрений по выносу ^{90}Sr , то наблюдается та же закономерность, что и при оценке ее по Kn . Но за счет добавления удобрений увеличилась урожайность и, как следствие, увеличился вынос ^{90}Sr с урожаем. Вынос ^{90}Sr с зерном ячменя при внесении калийных удобрений на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}$ снижался в 1,6–1,8 раза, причем максимальный эффект (в 1,8 раза) получен при внесении $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$. Применение калийных удобрений при возделывании картофеля на дерново-подзолистой песчаной почве приводило к снижению выноса ^{90}Sr с урожаем клубней в 1,3–2,0 раза. Величина выноса ^{90}Sr с единицы площади с урожаем озимой ржи при внесении калийных удобрений на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}$ возросла по сравнению с контролем в 1,1–1,9 раза (таблица 4).

Из литературных данных известно, что наибольший эффект по снижению накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs в растениях, особенно на почвах легкого гранулометрического состава, отмечается при комплексном применении органических (40–80 т/га) и минеральных удобрений ($\text{N}_{60-120}\text{P}_{60-120}\text{K}_{90-180}$) [8].

В работах [9, 10] говорится о том, что по результатам 4-летнего полевого опыта на радиоактивно загрязненной торфяной почве Гомельской области Республики Беларусь было установлено, что поступление ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственные корма (бобовые культуры (кле-

вер, лядвенец, галега) + овсяница + костреч + тимopheвка) зависит от уровня азотного и калийного питания и метеорологических условий вегетационных периодов. Оптимальный уровень обеспеченности элементами минерального питания для получения высокого урожая сена и существенного снижения поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в продукцию составляет $\text{N}_{30}\text{P}_{60}\text{K}_{180}$.

В наших опытах максимальный положительный эффект по ограничению поступления ^{90}Sr в урожай озимой ржи, ячменя и картофеля получен при совместном внесении тройной дозы фосфора и калия ($\text{N}_{80}\text{P}_{240}\text{K}_{240}$). Накопление ^{90}Sr в урожае ячменя и картофеля при внесении повышенных доз фосфорных и калийных удобрений в 3,5–5,2 раза меньше, чем на неудобренной почве. Эффективность агрохимического мероприятия, оцениваемая по выносу ^{90}Sr с урожаем зерна ячменя и клубнями картофеля, была ниже, чем по Kn , и составила 2,2–3,2 раза.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

1. Известкование дерново-подзолистой супесчаной почвы на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ приводило к снижению Kn^{90}Sr овсом в 1,4–2,2 раза, ячменем – в 1,3–2,65 раза. Накопление ^{90}Sr в зерне яровых зерновых культур на фоне $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ снижалось в 2,1–2,6 раза. При внесении в почву $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ и шлаков содержание ^{90}Sr в зерне ячменя в 3,7–4,2 раза ниже, чем на контроле, а Kn^{90}Sr зерном овса при совместном внесении повышенной дозы фосфорных удобрений (P_{240}) и шлаков снижался в 3,1 раза.

2. Вынос ^{90}Sr с зерном ячменя и овса при внесении шлаков и P_{240} снижался в 1,9–2,5 раза по сравнению с фоном.

3. При совместном применении извести и шлаков наблюдалось уменьшение доли обменной формы ^{90}Sr в 1,3 раза и увеличение необменной в 2,4–3,2 раза. Внесение P_{240} на фоне шлаков приводило к снижению подвижных форм радионуклида в 1,3 раза и к повышению необменных форм ^{90}Sr в 4,2–4,7 раза по сравнению с контролем.

4. На 2-й год опыта количество доступного ^{90}Sr в почве снизилось в 1,2 раза, необменного – возросло по сравнению с фоном в 2,9–3,3 раза.

5. Внесение калийных удобрений привело к заметному увеличению урожая: зерна ячменя – в 1,2–1,4, озимой ржи – в 1,7–2,6, клубней картофеля – в 1,3–1,5 раза. Вынос ^{90}Sr с зерном ячменя при внесении $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ снижался в 1,6–1,8 раза, с урожаем клубней – в 1,3–2,0 раза, Kn^{90}Sr клубнями уменьшался в 1,8–4,6 раза.

6. Внесение в дерново-подзолистую песчаную почву $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ приводило к снижению перехода ^{90}Sr в растения озимой ржи, картофеля и ячменя – в 1,5–2,2 раза. Накопление ^{90}Sr в зерне и клубнях при внесении $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{240}$ уменьшилось в 1,4–3,0 раза.

7. Увеличение дозы фосфора с 80 до 240 кг/га в составе полного минерального удобрения повышало урожайность озимой ржи в 1,4–1,6 раза и снижало Kn^{90}Sr зерном в 2 раза.

8. Внесение в почву двойной и тройной дозы фосфора обеспечило снижение поступления ^{90}Sr в урожай ячменя в 2,4–3,0 раза и снижение выноса ^{90}Sr с зерном в 1,8–2,0 раза. Накопление ^{90}Sr в урожае ячменя и картофеля при внесении повышенных доз фосфорных и калийных удобрений было в 3,5–5,2 раза меньше, чем на неудобренной почве.

Библиографический список

1. Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239-240}\text{Pu}$ / Под ред. С. М. Вакуловского. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 225 с.
2. Кречетников В. В., Ратников А. Н., Титов И. Е., Шубина О. А., Прудников П. В., Свириденко Д. Г. Научное обоснование методологии оценки кадастровой стоимости радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных земель // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 3 (67). С. 12–17.
3. Ратников А. Н., Алексахин Р. М., Кочетков И. В., Свириденко Д. Г. Радиоэкологические аспекты реабилитации сельскохозяйственных угодий после аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС «Фукусима-1» // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2015. № 2. С. 21–24.
4. Панов А. В., Прудников П. В., Титов И. Е., Кречетников В. В., Ратников А. Н., Шубина О. А. Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 1. С. 25–35.
5. Сычев В. Г., Лунев М. И., Орлов М. М., Белоус Н. М. Чернобыль: радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв. М.: ВНИИА. 2016. 183 с.
6. Орлов П., Аканова Н., Шпахавцев А. Радиохимические и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв // Международный сельскохозяйственный журнал. 2017. № 2. С. 42–46.
7. Ратников А. Н., Сапожников П. М., Санжарова Н. И., Свириденко Д. Г., Жигарева Т. Л., Попова Г. И., Панов А. В., Козлова И. Ю. Кадастровая стоимость земель в условиях радиоактивного загрязнения // Почвоведение, 2016. № 1. С. 130–140.
8. Ратников А. Н., Перволоцкий А. Н., Фесенко С. В., Исамов Н. Н., Санжарова Н. И., Панов А. В., Свириденко Д. Г. Глава 9. Защитные и реабилитационные мероприятия в лесном и сельском хозяйстве в зоне аварии на Чернобыльской АЭС // Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. 2018. С. 203–231.
9. Рекомендации по возделыванию многолетних бобово-злаковых многокомпонентных травосмесей на загрязненных радионуклидами торфяных почвах / Т. В. Ласько [и др.]. Минск: Институт радиологии, 2015. 33 с.
10. Подоляк А., Ласько Т., Тагай С. Многолетние бобово-злаковые травосмеси – резерв повышения продуктивности полей // Наука и инновации. 2018. № 10 (188). С. 80–84.

Об авторах:

Светлана Петровна Арышева¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
 Дмитрий Георгиевич Свириденко¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
 Александр Николаевич Ратников¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник
 Константин Владимирович Петров¹, научный сотрудник
 Владимир Николаевич Мазуров², кандидат сельскохозяйственных наук, директор
 Полина Сергеевна Семешкина², кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора, +7 910 869-72-03,
polina.semeshkina@gmail.com

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

²Калужский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Калужская область, Россия

Effect of agromeliorative and agrochemical measures on productivity, mobility of ^{90}Sr in soil and its admission to the plant

S. P. Arysheva¹, D. G. Sviridenko¹, A. N. Ratnikov¹, K. V. Petrov¹, V. N. Mazurov², P. S. Semeshkina² 

¹Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

²Kaluga Research Institute of Agriculture, Kaluga region, Russia

 E-mail: polina.semeshkina@gmail.com

Abstract. On the basis of field experiments on radioactively contaminated soddy-podzolic soils of Novozybkov and Krasnogorsk districts of the Bryansk region the efficiency of measures to reduce ^{90}Sr input into crop production is estimated. The introduction of lime on the background of $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ led to a decrease in Accumulation coefficient ^{90}Sr (AC) in oats by 1.4–2.2 times, barley 1.3–2.6 times. The effectiveness of open-hearth and electric slag is equivalent to the action of lime; the ^{90}Sr accumulation in grain on the background $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ decreased 2.1–2.6 times. When soil $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ and impurities content of ^{90}Sr in grain of barley in the 3.7–4.2 times lower than on control, and AC ^{90}Sr in grain oats in a joint introduction of P_{240} and slages decreased in 3, 1 times. The removal of ^{90}Sr with grain was decreased by 1.9–2.5 times. Making P_{240} on the background of the slag resulted in the reduction of mobile forms of radionuclide 1.3 times, increase non-exchange forms of ^{90}Sr and 4.2–4.7 times. This effect persisted to the 2nd year. The amount of ^{90}Sr available for root uptake by plants in all variants of experiment decreased by 1.2 times, non-exchange increased in comparison with the background by 2.9–3.3 times. The use of potash fertilizers increased yield of barley grains by 1.2–1.4, rye 1.7–2.6, potato tubers by 1.3–1.5 times. Application of $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{240}$ in soil led to the reduction of the transfer of ^{90}Sr in the plants of rye, potato and barley by 1.5–2.2 times. Removal of ^{90}Sr with bar-

ley grain decreased by 1.6–1.8 times. The use of potash fertilizers led to a decrease in the removal of ^{90}Sr with a yield of tubers by 1.3–2.0 times, AC^{90}Sr decreased by 1.8–4.6 times. Accumulation of ^{90}Sr in grain and potatoes when you make $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{240}$ decreased 1.4–3.0 times. Increasing the dose of phosphorus to 240 kg/ha in the composition of a complete fertilizer increased the yield of rye by 1.4–1.6 times, and reduced AC^{90}Sr grain by 2 times. Application of $\text{P}_{160-240}$ ensured the decrease of ^{90}Sr in barley crop of 2.4–3.0 times, removal of ^{90}Sr by barley grain decreased in 1.8–2.1 times. The accumulation of ^{90}Sr in the yield of barley and potatoes with the introduction of P_{240} and K_{240} 3.5–5.2 times less than in the inconvenient soil.

Keywords: soddy-podzolic soil, ^{90}Sr , accumulation factor, the mobility of the radionuclide, agricultural crops, wastes, mineral fertilizers, agroforestry and agro-chemical activities.

For citation: Arysheva S. P., Sviridenko D. G., Ratnikov A. N., Petrov K. V., Mazurov V. N., Semeshkina P. S. Vliyaniye agromeliorativnykh i agrokhimicheskikh meropriyatiy na produktivnost' polevykh kul'tur, podvizhnost' ^{90}Sr v pochve i ego postupleniye v rasteniya [Effect of agromeliorative and agrochemical measures on productivity, mobility of ^{90}Sr in soil and its admission to the plant] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2019. No. 8 (187). Pp. 8–15. DOI: 10.32417/article_5d908b8596ff29.11846820. (In Russian.)

References

1. Dannye po radioaktivnomu zagryazneniyu territorii naselennykh punktov Rossijskoj Federatsii ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239-240}\text{Pu}$ [Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239-240}\text{Pu}$] / Under the editorship of S. M. Vakulovsky. Obninsk: „Research and production association „Typhoon“, 2015. 225 p. (In Russian.)
2. Krechetnikov V. V., Ratnikov A. N., Titov I. E., Shubina O. A., Prudnikov P. V., Sviridenko D. G. Nauchnoe obosnovanie metodologii otsenki kadaastrovoj stoimosti radioaktivno zagryaznennykh sel'skokhozyajstvennykh zemel' [Scientific substantiation of the methodology for assessing the cadastral value of radioactively contaminated agricultural land] // Vestnik Bryanskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii. 2018. No. 3 (67). Pp. 12–17. (In Russian.)
3. Ratnikov A. N., Aleksakhin R. M., Kochetkov I. V., Sviridenko D. G. Radioekologicheskie aspekty reabilitatsii sel'skokhozyajstvennykh ugodij posle avarij na Chernobyl'skoj AEHS i na AEHS „Fukusima-1“ [Radiological aspects of rehabilitation of agricultural land after the accident at the Chernobyl NPP and NPP „Fukushima-1“] // Vestnik of the Russian Agricultural Sciences. 2015. No. 2. Pp. 21–24. (In Russian.)
4. Panov A. V., Prudnikov P. V., Titov I. E., Krechetnikov V. V., Ratnikov A. N., Shubina O. A. Radioekologicheskaya otsenka sel'skokhozyajstvennykh zemel' i produktsii yugo-zapadnykh rajonov Bryanskoj oblasti, zagryaznennykh radionuklidami v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj AEHS [Radioecological assessment of agricultural lands and products of the South-Western regions of the Bryansk region contaminated with radionuclides as a result of the Chernobyl accident] // Radiation Hygiene. 2019. Vol. 12. No. 1. Pp. 25–35. (In Russian.)
5. Sychev V. G., Lunev M. I., Orlov M. M., Belous N. M. Chernobyl': radiatsionnyj monitoring sel'skokhozyajstvennykh ugodij i agrokhimicheskie aspekty snizheniya posledstvij radioaktivnogo zagryazneniya pochv [Chernobyl: radiation monitoring of agricultural land and agrochemical aspects of reducing the effects of radioactive contamination of soils]. Moscow: VNIIA, 2016. 183 p. (In Russian.)
6. Orlov N., Akanov A., Shpakhavtsev A. Radiokhimicheskie i agrokhimicheskie aspekty snizheniya posledstvij radioaktivnogo zagryazneniya pochv [Radiochemical and agrochemical aspects of reducing the effects of radioactive contamination of soils] // Mezhdunarodnyj sel'skokhozyajstvennyj zhurnal. 2017. No. 2. Pp. 42–46. (In Russian.)
7. Ratnikov A. N., Sapozhnikov P. M., Sanzharova N. I., Sviridenko D. G., Zhigareva T. L., Popova G. I., Panov A. V., Kozlova I. Y. Kadaastrovaya stoimost' zemel' v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya [Cadastral value of land under radioactive contamination] // Eurasian Soil Science, 2016. No. 1. Pp. 130–140. (In Russian.)
8. Ratnikov A. N., Perevolotsky A. N., Fesenko S. V., Isamov N. N., Sanzharova N. I., Panov A.V., Sviridenko D. G. Glava 9. Zashhitnye i reabilitatsionnye meropriyatiya v lesnom i sel'skom khozyajstve v zone avarii na Chernobyl'skoj AEHS [Chapter 9. Protective and rehabilitation measures in forestry and agriculture in the Chernobyl accident zone] // Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AEHS: biologicheskie ehffekty, migratsiya, reabilitatsiya zagryaznennykh territorij. 2018. Pp. 203–231. (In Russian.)
9. Rekomendatsii po vzdelyvaniyu mnogoletnikh bobovo-zlakovykh mnogokomponentnykh travosmesej na zagryaznennykh radionuklidami torfyanykh pochvakh [Recommendations for the cultivation of perennial legume-cereal multicomponent mixtures on contaminated peat soils] / T. V. Lasko [et al.]. Minsk: Institute of radiology, 2015. 33 p. (In Russian.)
10. Podolyak A., Lasko T., Tagay S. Mnogoletnie bobovo-zlakovye travosmesi – rezerv povysheniya produktivnosti polej [Perennial legume-grass mixtures – a reserve for increasing the productivity of fields] // Nauka i innovatsii. 2018. No. 10 (188). Pp. 80–84. (In Russian.)

Authors' information:

Svetlana P. Arysheva¹, candidate of biological sciences, senior researcher

Dmitriy G. Sviridenko¹, candidate of biological sciences, senior researcher

Aleksandr N. Ratnikov¹, doctor of agricultural sciences, leading researcher, professor

Konstantin V. Petrov¹, researcher

Vladimir N. Mazurov², candidate of agricultural sciences, director

Polina S. Semeshkina², candidate of agricultural sciences, deputy director, +7 910 869-72-03, polina.semeshkina@gmail.com

¹ Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

² Kaluga Research Institute of Agriculture, Kaluga region, Russia