

УДК 539.163:631.8:635.656

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АГРОХИМИКАТОВ НА ПОСТУПЛЕНИЕ ^{137}Cs В РАСТЕНИЯ ГОРОХА© 2022 г. О. Ю. Баланова¹, Д. Г. Свириденко¹, А. Н. Ратников^{1,*}, С. П. Арышева¹, А. В. Панов¹, Л. И. Ратникова¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: ratnikov-51@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 28.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

В вегетационном опыте на загрязненной ^{137}Cs дерново-подзолистой почве с горохом (*Pisum sativum* L.) сорт Фараон проведена сравнительная оценка влияния органо-минерального удобрения СУПРОДИТ-М, органо-минерального комплекса ГЕОТОН и минеральных удобрений (NPK и азофоски) на содержание форм радионуклида в почве, продуктивность и качество гороха, и биологическую активность почвы. Минеральные удобрения и СУПРОДИТ-М вносили в почву, препаратом ГЕОТОН обрабатывали растения 2 раза за вегетационный период. Действие различных видов агрохимикатов оценивали по содержанию форм ^{137}Cs в почве, по коэффициенту накопления (K_n) ^{137}Cs в растениях, по изменению потенциальной активности дыхания (скорость эмиссии CO_2 в почве), потенциальной активности денитрификации почвы, урожаю и показателям качества зерна и вегетативной массы гороха. Применение СУПРОДИТ-М способствовало снижению содержания в почве наиболее доступных для растений обменной и подвижной форм ^{137}Cs по сравнению с использованием минеральных удобрений. Известно, что зерновые бобовые культуры (сем. *Fabaceae*) в условиях радиоактивного загрязнения почв накапливают в урожае ^{137}Cs до 10 раз больше, чем яровые и озимые зерновые. Внесение в почву NPK стимулировало скорость эмиссии CO_2 в почве под горохом по сравнению с контролем. Применение СУПРОДИТ-М и азофоски снижало потенциальную активность денитрификации почвы. Внесение СУПРОДИТ-М повышало урожай зерна и вегетативной массы гороха. Обработка вегетирующих растений препаратом ГЕОТОН по фону СУПРОДИТ-М дополнительно повышала урожайность гороха по сравнению с вариантом без обработки и относительно контроля. СУПРОДИТ-М ограничивал поступление ^{137}Cs из почвы в растения по сравнению с минеральными удобрениями. Внесение СУПРОДИТ-М способствовало значительному уменьшению выноса ^{137}Cs зерном гороха относительно контроля. Применение ГЕОТОНа по фону СУПРОДИТ-М дополнительно снижало вынос ^{137}Cs зерном и вегетативной массой по сравнению с вариантом без обработки и относительно абсолютного контроля.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, органо-минеральные удобрения, сельскохозяйственная продукция, коэффициент накопления, формы радионуклидов, биологическая активность почвы

DOI: 10.31857/S0869803122010039

Загрязнение сельскохозяйственных угодий радиоактивными веществами в результате аварии на Чернобыльской АЭС зафиксировано на территории 21 субъекта РФ, в наибольшей степени в Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областях [1].

Важнейшими задачами агропромышленного производства на радиоактивно загрязненных угодьях являются получение экологически безопасной продукции, соответствующей существующим нормативам по содержанию в ней радионуклидов (РН) [2–4], а также сохранение и повышение плодородия почв. В технологиях возделывания сельскохозяйственных культур ведущая роль принадлежит созданию почвенных барьеров на пути транс-

порта РН из почвы в растения за счет их селективной сорбции минеральной частью почвенного поглощающего комплекса (ППК) и агрохимическим приемам, направленным на получение стабильных урожаев [5].

Уменьшение в последние годы объемов проведения агрохимических реабилитационных мероприятий на радиоактивно загрязненных угодьях приводит к необходимости поиска новых путей снижения подвижности РН в почве, ограничения их перехода из почвы в растения, а также дополнительных возможностей поддержания почвенного плодородия.

Для усовершенствования технологий возделывания сельскохозяйственных культур в условиях радиоактивного загрязнения были использованы разработанные и апробируемые в настоящее время на различных культурах и типах почв во ВНИИ радиологии и агроэкологии органо-минеральное удобрение СУПРОДИТ-М и органо-минеральный комплекс ГЕОТОН.

СУПРОДИТ-М состоит из двух компонентов: минерального и органического. Минеральный компонент представляет собой высокоселективный синтетический сорбент (КС) на основе трепела, содержащий элементы минерального питания растений и микроэлементы. Сырьем для органического компонента служит низинный торф, содержащий N, P₂O₅, K₂O и биологически активные вещества – гуматы калия.

СУПРОДИТ-М имеет повышенную сорбционную способность по отношению к загрязняющим почву веществам, в том числе к РН техногенного происхождения (¹³⁷Cs). Минералогический состав содержащегося в удобрении комплексного сорбента (КС), %: цеолит – 50, монтмориллонит – 15, мусковит – 4, SiO₂ – 4, аморфные алюмосиликаты – 27. КС имеет высокую емкость поглощения (126 ± 2 смоль(+)/кг). В его составе преобладают энергетически однородные сорбционные центры, характеризующиеся невысокой селективностью по отношению к ¹³⁷Cs. Емкость этих участков, тем не менее, очень велика (1050 смоль(+)/кг), и КС способен эффективно извлекать ионы ¹³⁷Cs⁺ из нейтральных и слабокислых водных растворов [6].

Элементный состав СУПРОДИТ-М (%): N – 11,4; P₂O₅ – 12; K₂O – 18; Ca – 0.33; Mg – 0.92; органическое вещество – 30. Содержание микроэлементов (мг/кг): В – 1200; Мо – 1400. Удобрение обладает пролонгированным действием, применяется в дозах 650–1000 кг/га, общепринятых для минеральных удобрений в Нечерноземной зоне РФ [7, 8]. СУПРОДИТ-М защищен патентом Российской Федерации [9].

ГЕОТОН представляет собой комплексный универсальный жидкий концентрат темного цвета без запаха. Основным сырьем для его производства является низинный торф, который подвергается щелочному гидролизу, нейтрализацией фосфорной кислотой, аммонификации и введением в препарат основных элементов минерального питания растений. Элементный состав ГЕОТОН (%): N – 9–14, P – 23–25, K – 23–29; содержание органического вещества 32–45, в том числе гуматов калия 9–12. ГЕОТОН безвреден при использовании, хорошо растворим в воде, совместим с большинством используемых минеральных удобрений и средств защиты растений.

ГЕОТОН предназначен: а) для предпосевной обработки семян, корне- и клубнеплодов; б) для

поверхностной обработки вегетирующих растений: 1–2 раза за вегетационный период (зерновые, овощные, кормовые, технические культуры) с целью повышения устойчивости растений к воздействию неблагоприятных факторов, улучшения качества производимой продукции, в том числе снижения содержания РН. ГЕОТОН защищен патентом Российской Федерации № 2490241 [7, 8].

Цель исследования – оценить влияние СУПРОДИТ-М и ГЕОТОН на фоне применения различных минеральных удобрений на подвижность ¹³⁷Cs в почве, накопление его в зерне, на продуктивность и качество гороха, а также показатели биологической активности почвы, загрязненной ¹³⁷Cs.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Горох (*Pisumsativum* L.) сорт Фараон выращивали в вегетационном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве с внесением ¹³⁷Cs. Агрохимическая характеристика почвы: гумус – 1.2%; рН_{KCl} 4.7; Нг – 4.12 и сумма поглощенных оснований – 1.80 смоль(+)/кг почвы соответственно; содержание P₂O₅ и K₂O – 124 и 135 мг/кг почвы, Са и Mg – 1.17 и 0.21 смоль(+)/кг почвы соответственно.

Схема опыта: 1) ¹³⁷Cs – контроль; 2) ¹³⁷Cs + NPK; 3) ¹³⁷Cs + СУПРОДИТ-М; 4) ¹³⁷Cs + Азофоска (АЗФК); 5) ¹³⁷Cs + NPK + ГЕОТОН; 6) ¹³⁷Cs + СУПРОДИТ-М + ГЕОТОН; 7) ¹³⁷Cs + АЗФК + ГЕОТОН.

В сосуды помещали 6 кг почвы.

Высота сосуда 17 см, площадь поверхности – 359.5 см².

Радионуклид вносили в виде раствора ¹³⁷CsCl (74 кБк/кг почвы) – 13.7 г/л раствора. СУПРОДИТ-М и АЗФК (16: 16: 16) вносили в почву (100 мг/кг почвы) в сухом виде в сопоставимых количествах с дозой внесения минеральных удобрений (СУПРОДИТ-М – 1.0 г/кг почвы; АЗФК – 0.7 г/кг почвы, в сухом виде). Удобрения (N₁₀₀P₁₂₀K₁₈₀) (мг/кг) применяли в виде растворов солей NH₄NO₃, KH₂PO₄, KCl (5%-ный раствор). Обработку ГЕОТОНом растений гороха проводили дважды: в фазу конца стеблевания (5–6 листьев) и через 10 дней после первой обработки (в фазу начала бутонизации). Повторность опыта 4-кратная.

В каждый сосуд высевали по 10 замоченных семян гороха, после появления всходов оставляли по шесть растений/сосуд.

Перед закладкой опыта и после уборки урожая отбирали образцы почвы для определения форм нахождения ¹³⁷Cs и агрохимических показателей.

Агрохимические показатели почвы определяли: pH_{KCl} – потенциометрическим методом в суспензии почвы (1 моль/дм³ раствор KCl при соотношении твердой и жидкой фаз 1 : 2.5), гидrolитическую кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО, гумус – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО, подвижный P_2O_5 и обменный K_2O – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО [10].

Определение форм ^{137}Cs в почве проводили методом последовательных вытяжек: 1 н CH_3COONH_4 – буфером $pH = 7$ (обменная), раствором 1 н HCl (подвижная), раствором 3 н HCl (кислоторастворимая) и остаточная (прочносвязанная) при соотношении почва: раствор = 1 : 10 [11]. Содержание ^{137}Cs в почве, растворах и растительном материале измеряли методом полупроводниковой гамма-спектрометрии с использованием детектора из сверхчистого германия “HPGe, ORTEC (США)” и анализатора спектра “IN 1200 GROUPE INTERTECHNIQUE” (Франция). Продуктивность гороха оценивали, используя показатели воздушно-сухой массы растений и зерен. Качество зерна и вегетативной массы гороха оценивали по содержанию сухого вещества, сырого протеина, клетчатки и жира (ГОСТ Р 50817–95). Коэффициент накопления ^{137}Cs (K_n) рассчитывали как отношение содержания ^{137}Cs (Бк/кг) в сухой массе растений (зерно гороха) к содержанию его (Бк/кг) в почве.

В опыте оценивали действие удобрений (NPK, СУПРОДИТ-М, АЗФК) на показатели микробиологической активности почвы: потенциальная активность дыхания (скорость эмиссии CO_2 из почвы) и потенциальная активность денитрификации в почве под горохом [10]. Отбор проб почвы для определения показателей биологической активности был произведен сразу после уборки урожая гороха (в фазу полной спелости).

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили с использованием программы MS Excel 2019 с 95%-ным уровнем значимости результатов. Полученные экспериментальные данные представлены в виде средних арифметических, стандартных отклонений и наименьших существенных различий (HCp_{05}) ($p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подвижность ^{137}Cs в почве. Биологическая доступность ^{137}Cs определяется содержанием РН в обменной форме – наиболее легкодоступной для корневого усвоения растениями [12, 13].

Ранее в вегетационном опыте на радиоактивно загрязненной дерново-подзолистой супесчаной почве под кукурузой было выявлено, что внесение СУПРОДИТ-М способствовало снижению количества обменной и подвижной форм ^{137}Cs на

35 и 26% по сравнению с применением NPK. Суммарное количество доступного ^{137}Cs (обменный + подвижный) при внесении СУПРОДИТ-М снижалось по сравнению с контролем (почва без удобрений) на 70%. Отмечено увеличение доли фиксированной формы ^{137}Cs на 7% по сравнению с использованием АЗФК [14].

Исследования на дерново-подзолистой почве с горохом показали, что содержание обменной формы ^{137}Cs в вариантах с внесением NPK на 52–56, а подвижной – на 32–38% ниже, чем в контроле без удобрений (рис. 1).

СУПРОДИТ-М оказывал более заметное влияние на подвижность ^{137}Cs , чем минеральные удобрения. Внесение СУПРОДИТ-М в почву способствовало снижению количества обменной и подвижной форм ^{137}Cs на 22–29 и 19–26% соответственно по сравнению с использованием АЗФК и NPK. Количество доступного для растений ^{137}Cs (суммарное содержание обменной и подвижной форм) при внесении СУПРОДИТ-М снижалось по сравнению с контролем на 60, а при внесении NPK – на 44–49%. Количество кислоторастворимой формы ^{137}Cs в вариантах применения минеральных удобрений – в 1.7, а СУПРОДИТ-М – в 2.1 раза выше, чем в контроле. Содержание прочносвязанной формы возрастало до 1.4 раза по сравнению с контролем. Величина сорбции ^{137}Cs при внесении СУПРОДИТ-М по сравнению с NPK возросла на 6%.

Показатели биологической активности дерново-подзолистой супесчаной почвы. Одним из наиболее масштабных этапов в круговороте углерода является его высвобождение из различных органических соединений в виде углекислоты, так называемое “дыхание почвы”. К аэробному дыханию способно такое большое число микроорганизмов, что по этому показателю судят об общей биологической активности почвы. Интенсивность дыхания почвы характеризует процессы минерализации органического вещества. Денитрификация почвы – процесс, играющий важнейшую роль в поддержании азотного баланса почвы [10].

Результаты эксперимента показали, что потенциальная активность дыхания почвы под горохом при внесении минеральных удобрений была на 22% выше, чем почвы без удобрений. При внесении СУПРОДИТ-М и АЗФК скорость эмиссии CO_2 из почвы в целом оставалась на уровне контроля (табл. 1). Потенциальная активность денитрификации в почве в варианте с минеральными удобрениями была на 14.3% выше, чем при внесении СУПРОДИТ-М, и на 33.3% больше, чем при применении АЗФК (табл. 1). Внесение NPK стимулировало активность денитрификации на 14% по сравнению с контролем. Применение СУПРОДИТ-М и АЗФК достоверно

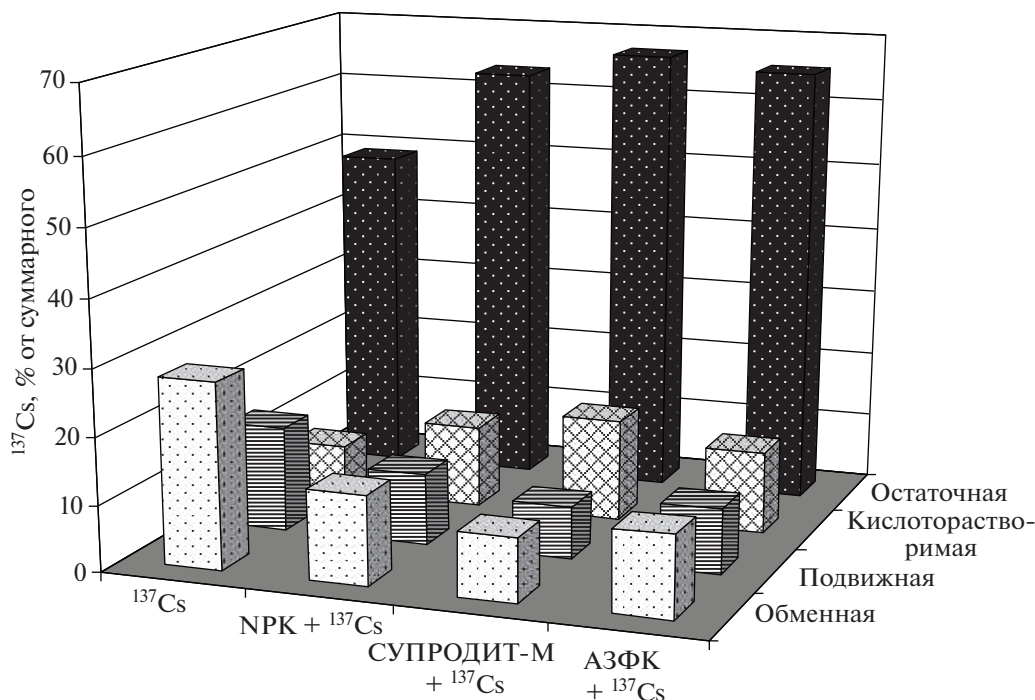


Рис. 1. Формы нахождения ¹³⁷Cs в почве после внесения различных агрохимикатов.
Fig. 1. Forms of ¹³⁷Cs occurrence in the soil after the introduction of various agrochemicals.

снижало непродуцируемые потери азота почвой. Внесение в почву NPK стимулировало скорость эмиссии CO₂ из почвы под горохом на 22% по сравнению с контролем.

Продуктивность гороха. При внесении СУПРОДИТ-М в почву урожай зерна гороха повысился на 25%, вегетативной массы на 12% по сравнению с контролем. Применение АЗФК обеспечило рост урожайности на 34–35%. Наибольший положительный эффект в повышении урожая зерна и вегетативной массы получен в варианте с внесением NPK (табл. 2).

Урожай зерна гороха при обработке растений ГЕОТОН повысился на 15–17%, вегетативной

массы – на 8–37% по сравнению с вариантами без применения препарата. Наибольший положительный эффект действия ГЕОТОН на формирование урожайности гороха получен в варианте с внесением АЗФК. Урожай зерна гороха при использовании ГЕОТОН на фоне СУПРОДИТ-М на 15% выше, чем в варианте без обработки и на 43% (в 1.4 раза) относительно абсолютного контроля. При обработке растений препаратом ГЕОТОН на фоне СУПРОДИТ-М урожай вегетативной массы был такой же, как и без применения препарата. Урожай вегетативной массы в варианте СУПРОДИТ-М + ГЕОТОН на 8% выше по сравнению с абсолютным контролем.

Таблица 1. Потенциальная активность дыхания и денитрификации в почве при применении различных агрохимикатов
Table 1. Potential respiration activity and soil denitrification in the application of various agrochemicals

Вариант	Потенциальная активность	
	дыхания, аС-CO ₂ , мг/кг почвы за сутки	денитрификации, аN-N ₂ O, мг/кг почвы за сутки
¹³⁷ Cs – контроль	501	2.8
¹³⁷ Cs + NPK	613	3.2
¹³⁷ Cs + СУПРОДИТ-М	524	2.3
¹³⁷ Cs + АЗФК	549	2.4
HCP ₀₅	23	0.2

Таблица 2. Влияние различных агрохимикатов на продуктивность гороха
Table 2. Effect of different agrochemicals on pea productivity

Вариант	Урожай зерна, г/сосуд	Урожай вегетативной массы, г/сосуд
^{137}Cs – контроль	10.9	10.3
^{137}Cs + НРК	15.3	13.6
^{137}Cs + СУПРОДИТ-М	13.6	11.5
^{137}Cs + АЗФК	14.7	13.8
^{137}Cs + НРК + ГЕОТОН	16.8	13.8
^{137}Cs + СУПРОДИТ-М + ГЕОТОН	15.6	11.1
^{137}Cs + АЗФК + ГЕОТОН	17.2	14.1
НСР ₀₅	1.0	1.1

Накопление ^{137}Cs в растениях гороха. Для прогнозирования накопления ^{137}Cs в урожае и сравнительной оценки эффективности агрохимических приемов по уменьшению перехода РН из почвы в растения использовали K_n ^{137}Cs . Известно, что зерновые бобовые культуры (сем. *Fabaceae*) в условиях радиоактивного загрязнения почв накапливают в урожае ^{137}Cs до 10 раз больше, чем яровые и озимые зерновые [13]. При выращивании гороха на дерново-подзолистой супесчаной почве наибольшее количество ^{137}Cs в зерне и вегетативной массе отмечено в контроле (рис. 2, 3). Применение минеральных удобрений и СУПРО-

ДИТ-М оказывало значительное влияние на переход ^{137}Cs из почвы в растения. K_n ^{137}Cs в зерне гороха при внесении НРК снижался в 1.4 раза и в вегетативной массе – в 1.2 раза по сравнению с контролем без удобрений (рис. 2). Использование АЗФК оказалось менее эффективно, содержание ^{137}Cs в зерне гороха снизилось в 1.2 раза, в вегетативной массе в 1.3 раза. СУПРОДИТ-М ограничивал поступление ^{137}Cs из почвы в растения в 1.8–2.0 раза по сравнению с контролем. Содержание ^{137}Cs в зерне и в вегетативной массе гороха при внесении СУПРОДИТ-М было в 1.5–1.8 и в

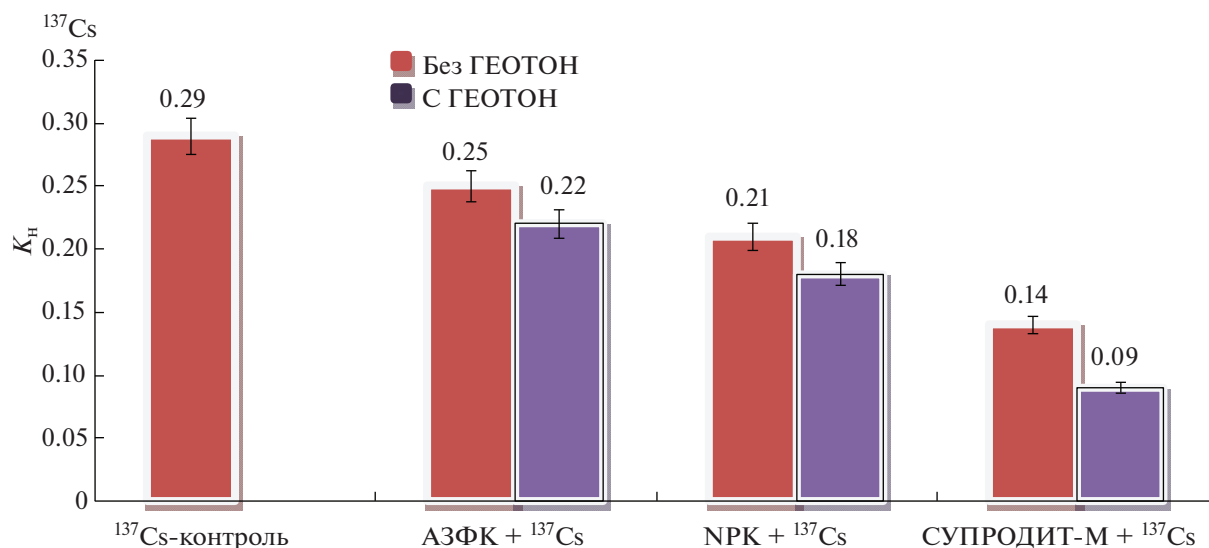


Рис. 2. Коэффициент накопления (K_n) ^{137}Cs в зерне гороха при использовании различных агрохимикатов на дерново-подзолистой почве, (Бк/кг)/(Бк/кг).

Примечание. На этом и следующем рисунках обозначено цифрами – среднее арифметическое и “усами – стандартное отклонение ($p < 0.05$).

Fig. 2. Transfer factor (T_f) ^{137}Cs in pea grain when using various agrochemicals on sod-podzolic soil, (Bq/kg)/(Bq/kg).

Note. This and the following figures indicate the arithmetic mean and the “mustache” standard deviation ($p < 0.05$).

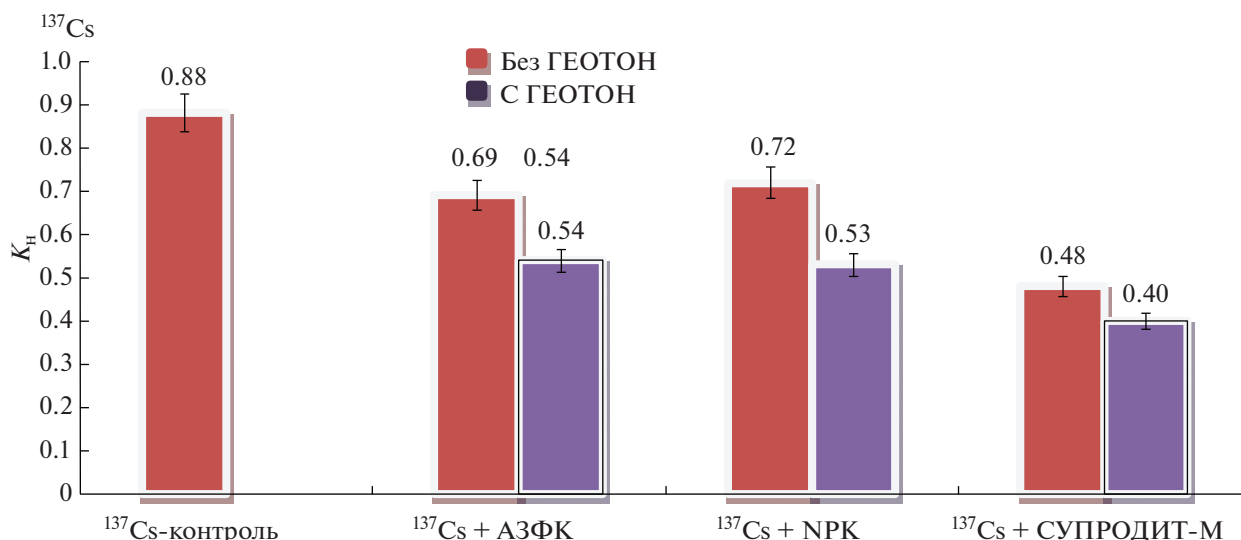


Рис. 3. Коэффициент накопления (K_n) ^{137}Cs в вегетативной массе гороха при использовании различных агрохимикатов, при использовании различных агрохимикатов на дерново-подзолистой почве.

Fig. 3. Transfer factor (T_f) ^{137}Cs in pea vegetative mass when using various agrochemicals on sod-podzolic soil.

1.4–1.5 раза ниже, чем в вариантах с минеральными удобрениями.

Обработка растений ГЕОТОН не только повышала продуктивность гороха, но и способствовала снижению накопления ^{137}Cs в урожае: на фоне АЗФК в 1.1 (зерно) и в 1.3 раза (вегетативная масса), а при внесении NPK в 1.2 и в 1.4 раза соответственно (рис. 2 и 3). K_n ^{137}Cs в зерне и вегетативной массе при внесении СУПРОДИТАМ и использовании ГЕОТОН в 1.6 и в 1.2 раза ниже, чем в варианте без обработки ГЕОТОН. Положительный эффект совместного применения АЗФК и ГЕОТОН по снижению перехода ^{137}Cs из почвы в растения и накопления в зерне и вегетативной массе гороха по сравнению с контролем составил 1.3 и 1.6 раза. При обработке растений ГЕОТОН на фоне СУПРОДИТ-М K_n ^{137}Cs в зерне и вегетативной массе в 2.4 и в 1.4 раза ниже, чем в варианте с АЗФК. Необходимо отметить, что снижение накопления ^{137}Cs в зерне при применении ГЕОТОНа происходило при увеличении вегетативной массы гороха.

Внесение АЗФК способствовало увеличению выноса ^{137}Cs зерном гороха на 16% (табл. 3). Обработка ГЕОТОН в варианте с АЗФК дополнительно увеличила вынос РН зерном на 5%, а в варианте с NPK – напротив, снизила на 6% по сравнению с вариантом без препарата. Относительно абсолютного контроля (^{137}Cs) этот показатель увеличился на 22% в варианте АЗФК + ^{137}Cs + ГЕОТОН и уменьшился на 4% в варианте NPK + ^{137}Cs + ГЕОТОН.

Внесение СУПРОДИТ-М способствовало значительному уменьшению выноса ^{137}Cs зерном

гороха на 39% относительно контроля. Применение ГЕОТОНа по фону СУПРОДИТ-М дополнительно снизило этот показатель на 26% по сравнению с вариантом без обработки, а относительно абсолютного контроля снизило на 55%.

Вынос ^{137}Cs вегетативной массой гороха был максимальный в варианте с NPK: на 9% выше, чем в контроле; с АЗФК – только на 4%. Минимальный вынос РН вегетативной массой был при внесении в почву СУПРОДИТ-М: на 39% ниже контрольного. Обработка растений ГЕОТОНом дополнительно снижала вынос ^{137}Cs вегетативной массой гороха: в варианте с АЗФК и СУПРОДИТ-М на 19%, с NPK – на 26% относительно варианта без обработки. В варианте СУПРОДИТ-М + ^{137}Cs + ГЕОТОН вынос РН вегетативной массой гороха оказался в 2 раза ниже относительно абсолютного контроля (^{137}Cs).

Так как питательные элементы для растений быстрее усваиваются из минеральных удобрений, чем из удобрения-сорбента, то и растения в этих вариантах растут и развиваются лучше, что, соответственно, увеличивает и урожай. Поэтому вынос ^{137}Cs урожаем (зерном и соломой) значительно выше при внесении в почву минеральных удобрений по сравнению с СУПРОДИТ-М.

Качество зерна и вегетативной массы гороха. При выращивании сельскохозяйственных культур на загрязненной радионуклидами почве важно контролировать не только содержание радионуклидов в растениях, но и качество получаемой продукции. В эксперименте оценивали качество зерна гороха по показателям: содержание сухого вещества, сырого протеина, клетчатки и жира

Таблица 3. Вынос ^{137}Cs с урожаем гороха при применении различных агрохимикатов
Table 3. The removal of ^{137}Cs with the yield of peas in the application of various agrochemicals

Вариант	Удельная активность ^{137}Cs в почве, Бк/кг	Вынос ^{137}Cs , Бк/сосуд	
		зерно	вегетативная масса
^{137}Cs – контроль	103960	232	371
^{137}Cs + НРК	109475	239	729
^{137}Cs + СУПРОДИТ-М	104625	141	409
^{137}Cs + АЗФК	107960	271	697
^{137}Cs + НРК + ГЕОТОН		223	540
^{137}Cs + СУПРОДИТ-М + ГЕОТОН		105	331
^{137}Cs + АЗФК + ГЕОТОН		284	565
НСР ₀₅		20	31

Таблица 4. Влияние агрохимикатов на качество зерна гороха
Table 4. Effect of agrochemicals on the quality of pea grain

Вариант	Содержание в зерне, %				
	зола	сырой протеин	жир	клетчатка	сухое вещество
^{137}Cs – контроль	2.02	17.01	2.47	3.72	89.32
^{137}Cs + НРК	2.06	18.28	2.57	3.90	89.34
^{137}Cs + СУПРОДИТ-М	2.18	17.81	2.40	4.37	89.55
^{137}Cs + АЗФК	2.07	17.69	2.50	3.88	89.38
НСР ₀₅	0.24	0.76	0.17	0.61	0.36

(табл. 4). Достоверных различий по содержанию сухого вещества и золы в зерне гороха на фоне минеральных удобрений и СУПРОДИТ-М не выявлено. Содержание клетчатки в варианте с СУПРОДИТ-М увеличилось по сравнению с контролем на 0.65%. При внесении СУПРОДИТ-М и АЗФК в почву содержание сырого протеина в зерне было на 0.68–0.80% выше, чем в контроле. Применение НРК в вегетационном опыте обеспечило получение зерна с наибольшим содержанием сырого протеина.

Внесение минеральных удобрений повысило урожай вегетативной массы гороха на 33–40%, а внесение СУПРОДИТ-М – на 25% по сравнению с контролем соответственно (табл. 2). Результаты определения качества вегетативной массы гороха свидетельствуют о том, что внесение в почву СУПРОДИТ-М привело к повышению содержания золы на 1.62% по сравнению с контролем,

при использовании АЗФК – на 1.26% выше, чем на контроле.

Достоверных различий по влиянию СУПРОДИТ-М и минеральных удобрений на такие показатели, как содержание жира и сухого вещества, во всех вариантах опыта не установлено (табл. 5). Но следует отметить, что при внесении СУПРОДИТ-М содержание жира в вегетативной массе было максимальным – 2.50%. Применение СУПРОДИТ-М и минеральных удобрений обеспечивает повышение содержания сырого протеина в вегетативной массе гороха на 1.38–2.71% по сравнению с контролем. Содержание сырого протеина в растениях в вариантах с СУПРОДИТ-М и НРК на 1.18–1.33% выше, чем при использовании АЗФК (табл. 5).

Использование СУПРОДИТ-М обеспечивает наибольший положительный эффект в получении более качественной продукции по содержанию сырого протеина.

Таблица 5. Влияние агрохимикатов на качество вегетативной массы гороха
Table 5. Effect of agrochemicals on the quality of pea vegetative mass

Вариант	Содержание в вегетативной массе, %				
	зола	сырой протеин	жир	клетчатка	сухое вещество
^{137}Cs – контроль	3.05	11.06	2.09	33.42	91.88
^{137}Cs + НРК	3.69	13.62	2.29	32.64	92.33
^{137}Cs + СУПРОДИТ-М	4.67	13.77	2.50	34.40	92.37
^{137}Cs + АЗФК	4.31	12.44	2.22	33.59	92.43
НСР ₀₅	0.76	1.08	0.46	2.21	0.81

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что применение СУПРОДИТ-М при выращивании гороха на дерново-подзолистой супесчаной почве оказало существенное влияние на подвижность ^{137}Cs в почве и его закрепление в почвенно-поглощающем комплексе. Снижение содержания наиболее доступных для растений обменной и подвижной форм ^{137}Cs в почве составило 22–29 и 19–26% соответственно по сравнению с использованием минеральных удобрений.

Внесение минеральных удобрений и СУПРОДИТ-М оказывало значительное влияние на переход ^{137}Cs из почвы в растения гороха. СУПРОДИТ-М ограничивал поступление ^{137}Cs в растения в 1.8–2.0 раза по сравнению с контролем. Эффективность СУПРОДИТ-М по снижению накопления ^{137}Cs в зерне гороха в 1.8 раза выше, чем азотоски.

Содержание ^{137}Cs в зерне и вегетативной массе гороха при внесении СУПРОДИТ-М было в 1.5–1.8 и 1.4–1.5 раза ниже, чем в вариантах с минеральными удобрениями. K_n ^{137}Cs зерном и вегетативной массой при внесении СУПРОДИТ-М и использовании комплекса ГЕОТОН в 1.6 и в 1.2 раза ниже, чем в варианте без обработки препаратом. При применении ГЕОТОН на фоне СУПРОДИТ-М K_n ^{137}Cs зерном и вегетативной массой в 2.4 и в 1.4 раза ниже, чем в варианте с азотоской.

При внесении СУПРОДИТ-М в почву урожай зерна гороха повысился на 25%, а вегетативной массы – на 12% по сравнению с контролем. Наибольший положительный эффект действия ГЕОТОН на продуктивность гороха получен при внесении азотоски. Урожай зерна при использовании ГЕОТОН на фоне СУПРОДИТ-М на 15% выше, чем в варианте без обработки, и на 43% – относительно контроля. Урожай вегетативной

массы в варианте СУПРОДИТ-М + ГЕОТОН на 8% выше по сравнению с контролем.

СУПРОДИТ-М оказывал положительное влияние на качество зерна гороха. Содержание сырого протеина в зерне увеличилось по сравнению с контролем на 0.80, клетчатки – на 0.65%. Содержание в вегетативной массе гороха сырого протеина, клетчатки, жира, золы было также наибольшим при применении СУПРОДИТ-М.

Потенциальная активность дыхания почвы под горохом при внесении минеральных удобрений на 22% выше, чем в контроле. СУПРОДИТ-М снижал непродуцируемые потери азота почвой.

Внесение СУПРОДИТ-М способствовало значительному уменьшению выноса ^{137}Cs зерном гороха на 39% относительно контроля. Применение ГЕОТОН на фоне СУПРОДИТ-М снизило вынос ^{137}Cs на 26% по сравнению с вариантом без обработки и на 55% относительно абсолютного контроля. Обработка ГЕОТОНом по фону СУПРОДИТ-М снижала вынос ^{137}Cs вегетативной массой гороха на 19% относительно варианта без обработки и в 2 раза по сравнению с контролем (^{137}Cs).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов А.В., Санжарова Н.И., Шубина О.А. и др. Современное состояние и прогноз загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей, подвергшихся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2017. Т. 26. № 3. С. 66–74. [Panov A.V., Sanzharova N.I., Shubina O.A. et al. Sovremennoe sostoyaniye i prognoz zagryazneniya ^{137}Cs sel'skohozyajstvennykh ugodij Bryanskoj, Kaluzhskoj, Orlovskoj i Tul'skoj oblastej, podvergshihysya vozdejstviyu avarii na Chernobyl'skoj AES // Radiaciya i risk. 2017. V. 26. № 3. P. 66–74 (In Russ.)]

2. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs . Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06-01 // Ветеринарная патология. 2002. № 4. С. 44–45. [Veterinarno-sanitarnye trebovaniya k radiacionnoj bezopasnosti kormov, kormovyh dobavok, syr'ya kormovogo. Dopustimye urovni sodержaniya ^{90}Sr i ^{137}Cs . Veterinarnye pravila i normy VP 13.5.13/06-01 // Veterinarnaya patologiya. 2002. № 4. P. 44–45 (In Russ.)]
3. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078-01 // Бюллетень нормативных и методических документов госсанэпиднадзора. 2002. № 4 (10). С. 9–144. [Gigienicheskie trebovaniya k bezopasnosti i pishchevoj cennosti pishchevyh produktov. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normy SanPiN 2.3.2.1078-01 // Byulleten' normativnyh i metodicheskikh dokumentov gossanepidnadzora. 2002. № 4 (10). S. 9–144 (In Russ.)]
4. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.2650-10. (Дополнения и изменения №18 к СанПиН 2.3.2.1078-01). М.: Минздрав РФ, 2010. 13 с. [Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN 2.3.2.2650-10. (Dopolneniya i izmeneniya №18 k SanPiN 2.3.2.1078-01). M.: Minzdrav RF, 2010. 13 p. (In Russ.)]
5. Санжарова Н.И., Ратников А.Н., Спиридонов С.И. и др. Технологические приемы, обеспечивающие повышение устойчивости агроценозов, восстановление нарушенных земель, оптимизацию земледелия и получение соответствующей нормативам сельскохозяйственной продукции / Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. 180 с. [Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Spiridonov S.I. i dr. Tekhnologicheskie priemy, obespechivayushchie povyshenie ustoychivosti agrocenozov, vosstanovlenie narushennyh zemel', optimizatsiyu zemledeliya i poluchenie sootvetstvuyushchej normativam sel'skohozyajstvennoj produkcii / Pod red. N.I. Sanzharovoj. Obninsk: VNIISKHRAE, 2010. 180 p. (In Russ.)]
6. Коноплева И.В. Селективная сорбция радиоцезия сорбентами на основе природных глин // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 4. [Konopleva I.V. Selektivnaya sorbciya radioceziya sorbentami na osnove prirodnyh glin // Sorbcionnye i hromatograficheskie processy. 2016. V. 16. № 4. (In Russ.)]
7. Баланова О.Ю., Ратников А.Н., Свириденко Д.Г. и др. Влияние новых комплексных удобрений СУПРОДИТ-М и ГЕОТОН на продуктивность, качество зерна ячменя и биологическую активность почвы // Науч. тр. КФ РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Юбилейный выпуск (№ 11) к 150-летию РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Калуга, 2015. С. 73–78. [Balanova O.Yu., Ratnikov A.N., Sviridenko D.G. i dr. Vliyanie novyh kompleksnyh udobrenij SUPRODIT-M i GEOTON na produktivnost', kachestvo zerna yachmenya i biologicheskuyu aktivnost' pochvy // Nauch. tr. KF RGAU–MSKHA im. K.A. Timiryazeva. Yubilejnyj vypusk (№ 11) k 150-letiyu RGAU–MSKHA im. K.A. Timiryazeva. Kaluga, 2015. S. 73–78 (In Russ.)]
8. Ратников А.Н., Свириденко Д.Г., Попова Г.И. и др. Эффективность удобрения пролонгированного действия СУПРОДИТ-М и органо-минерального комплекса ГЕОТОН при возделывании зерновых культур в условиях радиоактивного загрязнения // Вестн. аграрной науки. 2018. № 4 (73). С. 36–46. [Ratnikov A.N., Sviridenko D.G., Popova G.I. i dr. Effektivnost' udobreniya prolongirovannogo dejstviya SUPRODIT-M i organo-mineral'nogo kompleksa GEOTON pri vozdeleyvanii zernovyh kul'tur v usloviyah radioaktivnogo zagryazneniya // Vestnik agrarnoj nauki. 2018. № 4 (73). P. 36–46 (In Russ.)]
9. Ратников А.Н., Петров К.В., Анисимов В.С. и др. Способ получения органо-минерального комплексного удобрения. Пат. 2426711, РФ // Б.И. 2011. № 23. [Ratnikov A.N., Petrov K.V., Anisimov V.S. i dr. Sposob polucheniya organo-mineral'nogo kompleksnogo udobreniya. Pat. 2426711, RF // B.I. 2011. № 23 (In Russ.)]
10. Практикум по агрохимии: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.Г. Минеева. М.: МГУ, 2001. 686 с. [Praktikum po agrohimii: ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. / Pod red. V.G. Mineeva. M.: MGU, 2001. 686 s. (In Russ.)]
11. Методические указания по обследованию почв сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства на содержание тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов и радионуклидов. М.: ЦИНАО, 1995. 45 с. [Metodicheskie ukazaniya po obsledovaniyu pochv sel'skohozyajstvennyh ugodij i produkcii rastenievodstva na sodержanie tyazhelyh metallov, ostatocnyh kolichestv pesticidov i radionuklidov. M.: CINAO, 1995. 45 s. (In Russ.)]
12. Юдинцева Е.В., Жигарева Т.Л., Левина Э.М. и др. Изменение доступности радионуклидов растениям при химизации сельского хозяйства // Агрохимия. 1982. № 5. С. 82–88. [Yudinceva E.V., Zhigareva T.L., Levina E.M. et al. Izmenenie dostupnosti radionuklidov rasteniyam pri himizacii sel'skogo hozyajstva // Agrohimiya. 1982. № 5. P. 82–88 (In Russ.)]
13. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Котик В.А., Спиридонов С.И. Behavior of radionuclides in meadows and efficiency of countermeasures // Radiat. Prot. Dosim. 1996. V. 64. № 1–2. P. 43–48.
14. Арышева С.П., Попова Г.И., Баланова О.Ю. и др. Влияние новых комплексных органо-минеральных удобрений на продуктивность кукурузы и транслокацию ^{137}Cs в растения // Агрохимия. 2018. № 3. С. 26–33. [Arysheva S.P., Popova G.I., Balanova O.Yu. i dr. Vliyanie novyh kompleksnyh organo-mineral'nyh udobrenij na produktivnost' kukuruzy i translokaciyu ^{137}Cs v rasteniya // Agrohimiya. 2018. № 3. P. 26–33 (In Russ.)]

Comprehensive Assessment of the Impact of Various Types of Agrochemicals on the Intake of ^{137}Cs in Pea Plants

O. Yu. Balanova^a, D. G. Sviridenko^a, A. N. Ratnikov^{a, #}, S. P. Arysheva^a,
A. V. Panov^a, and L. I. Ratnikova^a

^a*Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

[#]*E-mail: ratnikov-51@mail.ru*

In the vegetative experiment on polluted ^{137}Cs soddy-podzolic soil with peas (*Pisum sativum* L.) variety Pharaon a comparative assessment of the effect of organo-mineral fertilizer SUPRODIT-M, organo-mineral complex GEOTON and mineral fertilizers (NPK and azofoska) on the content of radionuclide forms in the soil, soil biological activity, productivity and quality of peas. Mineral fertilizers and SUPRODIT-M were introduced into the soil, the preparation GEOTON treated plants 2 times during the growing season. The effect of various types of agrochemicals was evaluated by changes in the potential activity of respiration (the rate of CO_2 emission in the soil), the potential activity of soil denitrification, the content of ^{137}Cs forms in the soil, the accumulation coefficient (AC) ^{137}Cs in plants, yield and indicators of grain quality and vegetative mass of peas. The use of SUPRODIT-M helped to reduce the content in the soil of the most accessible for plants exchange and mobile forms of ^{137}Cs compared with the use of mineral fertilizers. It is known that leguminous crops (Fabaceae) under conditions of radioactive soil contamination accumulate ^{137}Cs in the yield up to 10 times more than spring and winter cereals. Adding NPK to the soil stimulated the rate of CO_2 emission in the soil under the peas compared to the control. Application SUPRODIT-M and azofoska reduced the potential activity of denitrification of the soil. Making SUPRODIT-M increased the grain yield and vegetative mass of peas. Treatment of vegetating plants with GEOTON on the background of SUPRODIT-M additionally increased the yield of peas compared to the option without treatment and relative to control. The greatest yield of pea grain is obtained from the use of GEOTON against the background of mineral fertilizers. SUPRODIT-M limit transfer of ^{137}Cs from soil to plants compared with mineral fertilizers. Introduction of SUPRODIT-M contributed to a significant reduction in the removal of ^{137}Cs grain peas relative to the control. The use of GEOTON on the background of SUPRODIT-M further reduced the removal of ^{137}Cs by grain and vegetative mass compared to the variant without treatment and relatively absolute control. SUPRODIT-M had a positive impact on indicators of quality of grain and vegetative mass of peas.

Keywords: radiation contamination, organomineral fertilizers, agricultural products, transfer factor, forms of radionuclides, biological activity of the soil