

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ЦЕЗИЯ-137 В ЗЛАКОВЫЕ ТРАВЫ НА ТОРФЯНИСТО-ГЛЕЕВОЙ ПОЧВЕ

Е. Б. Евсеев, кандидат сельскохозяйственных наук

*Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
г. Хойники, Беларусь*

Аннотация

Удельная активность цезия-137 в сене злаковых трав, произрастающих на радиоактивно загрязненных торфянисто-глеевых почвах, зависит от высоковариабельных факторов, оказывающих как позитивное, так и негативное влияние. Посредством регрессионного анализа установлена количественная зависимость от 10 показателей перехода цезия-137 в злаковые травы, которая позволяет выявить доминирующие факторы и снизить коэффициенты перехода цезия-137 из почвы в сено многолетних трав.

Ключевые слова: *цезий-137, удельная активность, торфянисто-глеевая почва, злаковая травосмесь, регрессионный анализ, математическая модель.*

Abstract

E. B. Evseev

STUDY OF CESIUM-137 TRANSFER TO CEREAL GRASSES ON PEAT GLEY SOIL

Specific activity of Cesium-137 in hay of cereal grasses growing on radioactively contaminated peat-gley soils depends on highly covariable factors having both positive and negative influence. During the regression analysis a quantitative dependence on 10 indicators has been established of the transition of Cesium-137 in grasses has been developed, which will make it possible to identify the dominant factors with a high degree of probability and reduce the coefficients of its transition from soil to hay of perennial grasses.

Keywords: *Cesium-137, specific activity, peat-gley soil, cereal grass mixture, regression analysis, mathematical model.*

Введение

В условиях Припятского Полесья на эрозионно-опасных мелиорированных землях исследователи рекомендуют использовать на среднемощных торфах зерно-травяные севообороты, при которых многолетние травосмеси занимают не менее 5 полей, а зерновые культуры – 3–4 поля. При ведении сельского хозяйства на мелкозалежных торфяниках с мощностью торфяного слоя до 0,7 м предлагается использование многолетних трав с перезалужением через 5–7 лет.

В целях предотвращения эрозионных процессов органогенного горизонта почв на мелиорированных землях Беларуси большая роль отводится многолетним травам. Многочисленными исследованиями доказано, что мелкозалежные торфяники должны отводиться под культурные сенокосы и пастбища [1].

Припятское Полесье включает в себя, помимо иных, и территории Полесского государственного радиационно-экологического за-

поведника (далее – ПГРЭЗ). Высокие уровни радиоактивного загрязнения почвы, его мозаичный и неоднородный характер [2] не позволяют выделить какие-то участки для продолжения их хозяйственного пользования.

Основная задача деятельности заповедника – проведение научно-исследовательских и экспериментальных работ. Уровни загрязнения цезием-137 в здешних условиях колеблются от 5 до 200 и более Ки/км² [2], поэтому территория заповедника наилучшим образом подходит для того, чтобы верифицировать данные различных прогнозных эмпирических уравнений, описывающих переход цезия-137 в сельскохозяйственные растения.

Миграция цезия-137 из почвы в растения является результатом не только физико-химических процессов в почве, но и биологических (физиологических), связанных с поглощением радионуклидов корневой системой растений из почвенного раствора. В трудах ученых от-

мечена главенствующая роль содержания и внесения калия в снижении коэффициентов перехода цезия-137 из почвы в растительность [1]. Однако при проведении исследований выявляются и другие факторы, оказывающие высокую степень влияния на удельную активность и коэффициенты перехода изучаемого радионуклида в злаковых травах [3].

Регрессионный анализ показывает влияние независимых значений на зависимую перемен-

Методы исследований

Стационарный полевой опыт по изучению влияния минеральных удобрений на накопление цезия-137 в многолетних злаковых травах на торфянисто-глеевой почве проводился в течение 4 лет (2016–2019 гг.) на землях государственного предприятия «Синкевичский» Лунинецкого р-на Брестской обл. по методике Б. А. Доспехова [4]. Погодные условия вегетации трав оценивались в соответствии с общепринятой методикой Г. Т. Селянинова [5].

Объектом исследований являлись торфянисто-глеевая низинная осушенная почва, а также среднеспелая злаковая травосмесь на основе костреца безостого, овсяницы луговой и тимофеевки луговой.

Почва опытного участка – торфянисто-глеевая низинная осушенная, развивающаяся на тростниково-осоковых торфах, подстилаемых с глубины 0,26 м связными древнеаллювиальными песками; средняя плотность загрязнения участка цезием-137 составляет 143,9 кБк/м² (3,9 Ки/км²). Опыт заложен методом рандомизированных повторений в 4-кратной повтор-

ную. В наших исследованиях рассматривается, в какой степени удельная активность цезия-137 в сене злаковых трав зависит от плотности загрязнения почвы, содержания нитратного и аммонийного азота в почве и других параметров. На основе результатов анализа выделяются доминирующие факторы, которые позволяют прогнозировать ведущие направления дальнейших исследований, планировать и принимать управленческие решения.

Общая площадь делянки (4 × 5) = 20 м²; площадь учетной делянки (3 × 4) = 12 м². Посев многолетних злаковых трав беспокровный. Схема эксперимента включает 12 вариантов (табл. 1).

Минеральные удобрения вносились в соответствии со схемой полевого эксперимента; использовались карбамид, суперфосфат, хлористый калий.

Обработка медным купоросом проводилась в период, соответствующий фазе выхода в трубку. После первого укоса была произведена внекорневая подкормка ранцевым опрыскивателем в соответствии со схемой опыта.

Нормы высева в составе травосмеси: тимофеевка луговая – 2 кг/га, овсяница луговая – 5 кг/га, кострец безостый – 6 кг/га. Направление использования травосмеси – сенокосное [6].

Для регрессионного анализа факторов и разработки соответствующего им эмпирического уравнения применялся пакет *Microsoft Office Excel* (16).

Таблица 1. Схема применения минеральных удобрений в опыте

Варианты опыта	Дозы удобрений под 1-й укос, кг/га д. в.			Дозы удобрений под 2-й укос, кг/га д. в.		
	N	P	K	N	P	K
1. Контроль (без удобрений)	–	–	–	–	–	–
2. P ₉₀ K ₁₂₀	–	90	90	–	–	30
3. P ₉₀ K ₁₅₀	–	90	90	–	–	60
4. P ₉₀ K ₁₈₀	–	90	120	–	–	60
5. N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₅₀	60	90	90	40	–	60
6. N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₅₀	80	90	90	40	–	60
7. N ₁₄₀ P ₉₀ K ₁₅₀	80	90	90	60	–	60
8. N ₁₀₀ P ₉₀ K ₁₈₀	60	90	120	40	–	60
9. N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₈₀	80	90	120	40	–	60
10. N ₁₄₀ P ₉₀ K ₁₈₀	80	90	120	60	–	60
11. N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₅₀ + Cu _{0,08}	80	90	90	40	–	60
12. N ₁₄₀ P ₉₀ K ₁₅₀ + Cu _{0,08}	80	90	90	60	–	60

Условия опыта

По агрохимическим показателям почва имела слабокислую реакцию среды и соответствовала интервалу оптимального значения этого показателя (pH_{KCl} – 5,29–5,48) для торфяных почв. Гидролитическая кислотность колебалась от 24,1 до 27,7 мг-экв /100 г почвы.

Содержание и запасы органического вещества в почве составляли в среднем 64,0 % и 576 т/га соответственно; зольность – 36,0 %, что соответствует высокозольным торфяникам.

Содержание общего азота в слое 0–25 см колебалось от 1,67 до 1,77 %, минерального азота – от 49,36 до 62,03 мг/кг почвы. Обеспе-

ченность подвижным фосфором (по методу А. Т. Кирсанова) составляла в среднем 875 мг/кг почвы, подвижным калием – 805 мг/кг почвы. Торфянисто-глеевая почва характеризовалась высоким содержанием P_2O_5 и повышенным содержанием K_2O .

Содержание обменного кальция в пахотном слое колебалось от 3102 до 3462 мг/кг почвы (среднее содержание), подвижного магния – от 504 до 625 мг/кг почвы (повышенное содержание). Обеспеченность подвижной медью соответствовала 2-й группе (средняя) – 7,15–7,99 мг/кг почвы.

Таблица 2. Агрохимические показатели торфянисто-глеевой почвы

Показатели	Значения показателей		
	минимальное	максимальное	среднее
Обменная кислотность, pH_{KCl}	5,29	5,48	5,37
Содержание минерального азота, мг/кг почвы	49,4	62,0	55,0
Содержание подвижного калия, мг/кг почвы	722	875	805

Согласно принятой градации [7], почва относится ко второй группе (1,0–4,9 Ки/км²) по степени загрязнения ¹³⁷Cs. Плотность загрязнения в среднем составила ¹³⁷Cs в 143,9 кБк/м² (3,9 Ки/км²).

На территории Беларуси при значениях ГТК от 0,2 до 0,4 условия вегетационного периода характеризуются как сухие, от 0,4 до 0,7 – очень засушливые, от 0,7 до 1,0 – засушливые, от 1,0 до 1,3 – слабозасушливые, 1,3–1,6 – оптимальные и > 1,6 – влажные [5].

За весь период исследований метеорологические условия (апрель – август) существенно различались. По степени увлажнения вегетационный период 2016 г. характеризовался слабозасушливыми условиями с ГТК 1,28; 2017 г. был влажным (ГТК – 2,24); 2018 г. – засушливым (ГТК – 0,97); период 2019 г. отличался оптимальными гидротермическими условиями (ГТК – 1,30).

Погодные условия существенно влияют на накопление радионуклидов в растениях [3]. Нами установлено, что в зависимости от метеорологической ситуации различия в накоплении ¹³⁷Cs в сене многолетних трав первого укоса достигают 4,3 раза, в сене второго укоса – 3,3. Наибольшее поступление ¹³⁷Cs на-

блюдается в условиях повышенного увлажнения вегетационного периода, меньшее – при засушливых условиях, самое низкое – при оптимальных условиях увлажнения. Исходя из этого следует предложить и обосновать уравнение, в котором влияние ГТК описывалось бы в математическом выражении и отражало бы как качественное влияние на накопление радионуклидов, так и количественное.

Кроме основных почвенно-климатических условий и биологических особенностей растений, выделяют группу факторов, снижающих поступление радионуклидов. Поглощение цезия-137 первоначально происходит в результате транспорта ионов путем свободной диффузии в объеме клеточной стенки коры корня. Поскольку радионуклиды поступают из почвенного раствора, можно предположительно сделать вывод, что концентрация их в растении прямо пропорциональна концентрации в почвенном растворе (при прочих равных условиях).

Применение калийных удобрений – основной агрохимический прием, снижающий поступление ¹³⁷Cs в сельскохозяйственные культуры. На почвах разного генезиса под влиянием калия накопление ¹³⁷Cs в растениях может

уменьшаться от 2 до 20 раз [8]. Его положительная роль возрастает на фоне оптимальных параметров минерального питания растений [9].

Поступление цезия-137 значительно снижается при увеличении концентрации K^+ до

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований определено влияние разных доз калийных удобрений на поступление ^{137}Cs в сено многолетних среднеспелых злаковых трав. На рис. 1 приведена информация об удельной активности ^{137}Cs в сене многолетних злаковых трав.

Фосфорные и калийные удобрения в дозах $P_{90}K_{90}$ снижают переход ^{137}Cs из почвы в травы первого укоса на 27–28 % по отношению к контролю. При внесении под первый укос K_{120} также наблюдается снижение поступления ^{137}Cs из почвы в растения. Подкормка трав второго укоса калием в дозе 30 кг/га на фоне $P_{90}K_{90}$ обеспечивает уменьшение коэффициента перехода радионуклида в сено на 50 %. При внесении под второй укос K_{60} на фонах $P_{90}K_{90}$ и $P_{90}K_{120}$ поступление радионуклида в растения

1 ммоль/л [10]. Однако интенсивность перехода ^{137}Cs в растение зависит не только от содержания K^+ в почвенном растворе, но и концентрации его в самом растении [11].

по отношению к варианту $P_{90}K_{120}$ уменьшается незначительно [12].

Регрессионный анализ аккумуляции цезия-137 в сене злаковых трав в зависимости от доз калийных удобрений позволил выявить наиболее тесную корреляционную связь между удельной активностью сена второго укоса и вносимыми дозами калийных удобрений (табл. 3). Предложенные математические зависимости помогут спрогнозировать значения удельной активности цезия-137 в сене трав первого укоса с достоверностью 36 %, и в сене трав второго укоса – с достоверностью 74 %. Однако проведенный анализ выявил влияние только одного фактора без учета множества других факторов.

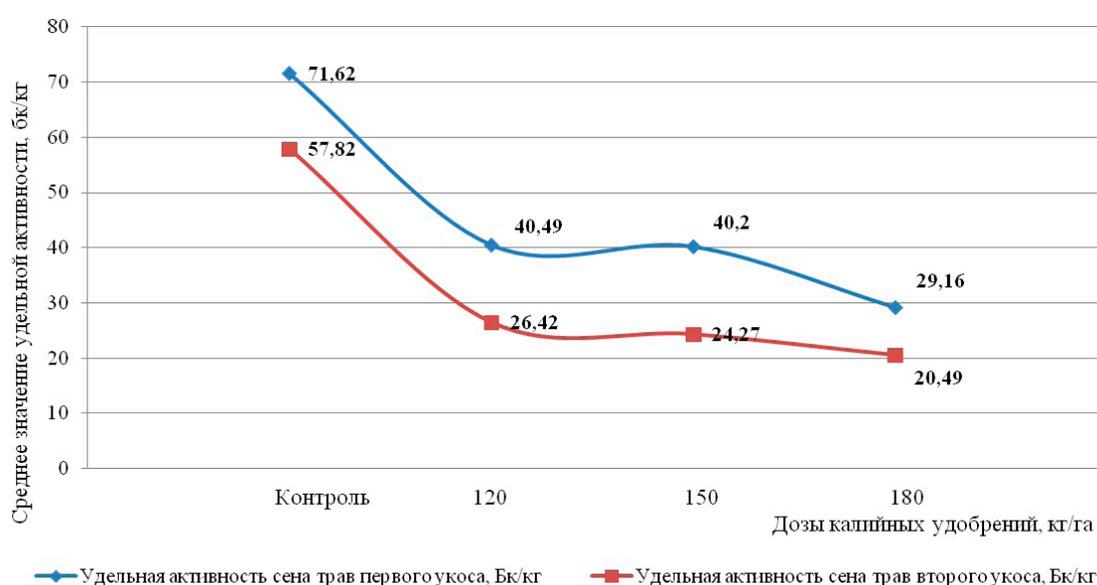


Рис. 1. Удельная активность ^{137}Cs в сене многолетних среднеспелых злаковых трав в зависимости от доз калийных удобрений, Бк/кг

Таблица 3. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в сене от доз калийных удобрений

Укосы трав	Уравнения	Коэффициент детерминации (R^2)	Стандартная ошибка (S_y)
Первый укос	$Y_1 = 71,34 - 0,23x$	0,36	22,5
Второй укос	$Y_2 = 56,62 - 0,22x$	0,74	9,6

Регулированию азотного питания растений на загрязненных радионуклидами почвах придается большое значение, поскольку недостаток доступного азота в почве приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, а высокие дозы азотных удобрений усиливают поглощение радионуклидов растениями. В работе [3] изучено влияние разных доз и сроков внесения азотных удобрений на поступление ^{137}Cs в сено многолетних злаковых трав. Азотные удобрения применяли в начале весеннего отрастания трав под первый укос в дозах 60 и 80 кг/га, под второй укос – в дозах 40 и 60 кг/га. Их общие дозы колебались от 100 до 140 кг/га действующего вещества на двух фосфорно-калийных фонах – $\text{P}_{90}\text{K}_{150}$ и $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$ (рис. 2).

Внесение N_{100} и N_{120} незначительно увеличивает поступление ^{137}Cs в растения. В среднем за годы исследований минимальное содержание ^{137}Cs в сене первого укоса (33,77 Бк/кг) отмечено в варианте с применением 100 кг/га азота на фоне $\text{P}_{90}\text{K}_{180}$. Вторая азотная подкормка трав приводит к некоторому увеличению накопления ^{137}Cs в сене трав второго укоса по отношению к фосфорно-калийным фонам. Однако концентрация его в растениях не превышает 35 Бк/кг, что более чем на порядок ниже допустимого уровня. Поступление ^{137}Cs в сено при повышенных дозах азотных удобрений ($\text{N}_{120-140}$) снижается на высоком фоне применения калийных удобрений ($\text{P}_{90}\text{K}_{180}$) [13].

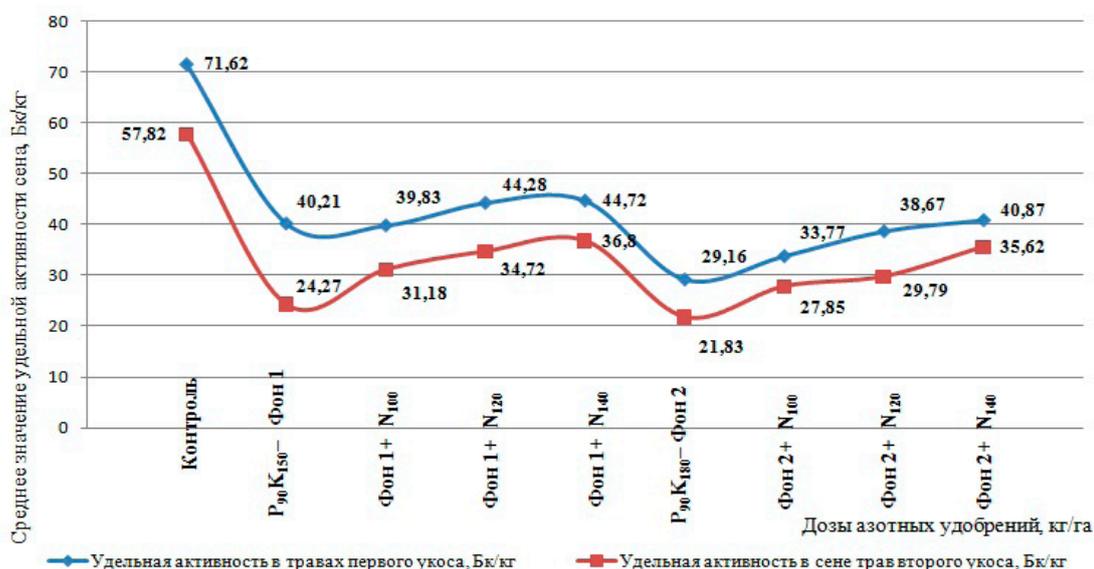


Рис. 2. Удельная активность ^{137}Cs в сене многолетних злаковых трав в зависимости от доз азотных удобрений, Бк/кг

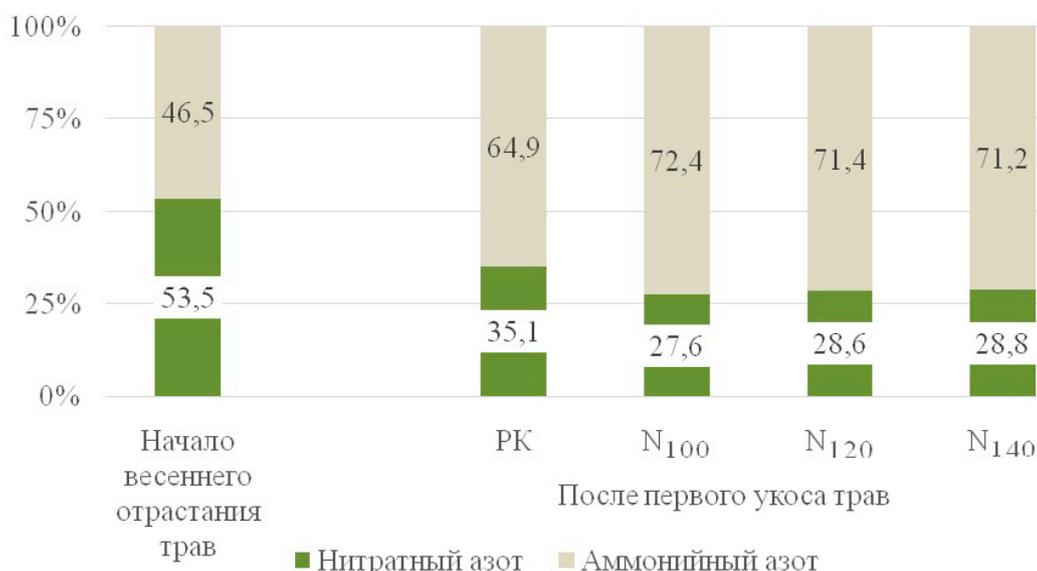


Рис. 3. Соотношение NO_3 и NH_4 в составе минерального азота в почве, %

Регрессионный анализ удельной активности цезия-137 в сене злаковых трав в зависимости от доз азотных удобрений не позволил выявить наиболее тесную корреляционную связь между исследуемыми параметрами. В результате построенные математические зависимости не могут точно предсказать значения удельной активности цезия-137 в сене злаковых трав. У коэффициента детерминации было значение меньше 0,02 для обоих укосов.

Однако обеспеченность сельскохозяйственных культур азотом зависит не столько от общего содержания в почве, сколько от наличия его минеральных форм – нитратов и обменного аммония, содержание которых в почве составляет приблизительно 1 % от общего количества азота. Для характеристики обеспеченности растений азотом учитывают в основном две его формы – нитратную и аммонийную, поэтому стоит рассмотреть влияние содержания минерального (нитратного и аммонийного) азота в почве на удельную активность цезия-137 в сене злаковых трав.

Цикл азота в почве характеризуется постоянно действующими минерализационно-иммобилизационными процессами его превращения. Взаимодействие этих процессов определяет направленность потоков азота в агроэкосистемах.

Содержание минеральных соединений (аммонийного и нитратного) азота в почве является динамичной величиной, поскольку оно

зависит от действия множества разнонаправленных факторов. Благодаря своей динамичности минеральные формы азота представляют наибольший интерес при оценке азотного режима почв. По динамике изменения минеральных соединений азота в почве определяют обеспеченность возделываемых культур азотом и уровень их продуктивности, а также изменение качества урожая, включая накопление радионуклидов в получаемой продукции (рис. 3).

С целью определения зависимостей между содержанием минерального азота в пахотном (T_n) слое торфянисто-глеевой почвы, с одной стороны, и поступлением ^{137}Cs в растения и продуктивностью многолетних трав, с другой стороны, был проведен корреляционно-регрессионный анализ данных (во всех уравнениях критерий значимости превышал табличные значения). Содержание азота в почве принималось как сумма азота почвы и азота вносимых удобрений под первый и второй укосы трав.

Установлены невысокие корреляционные связи ($R^2 = 0,25$, по Б. А. Доспехову) между содержанием $N_{\text{мин}}$ в почве в ранневесенний период и удельной активностью ^{137}Cs в сене многолетних трав первого укоса (стандартное отклонение для удельная активность – 17,8, а средняя ошибка аппроксимации – 3,57) (рис. 4).

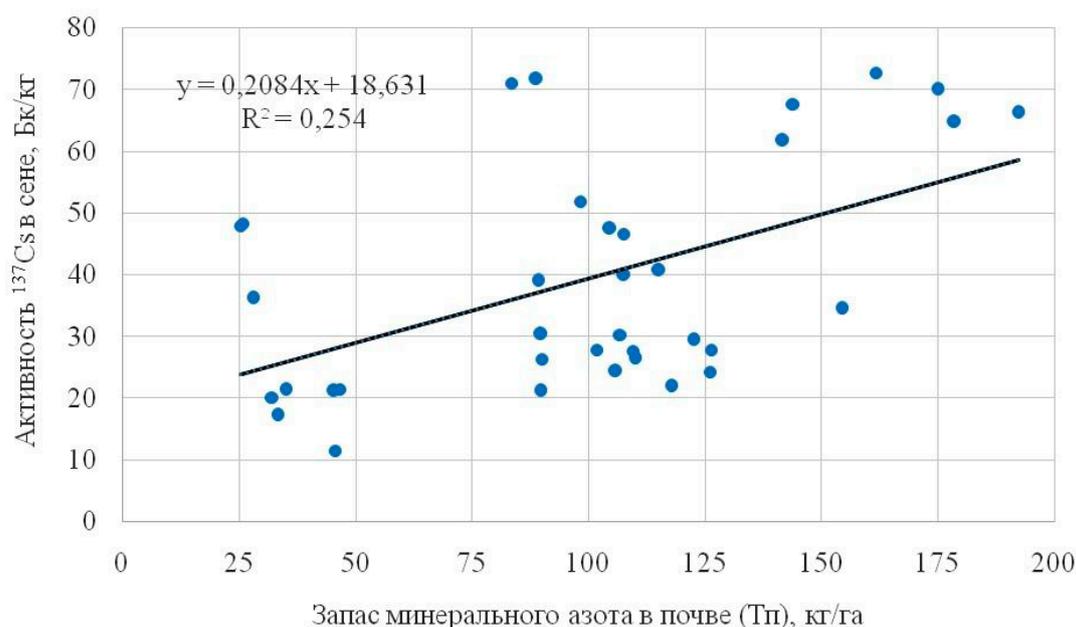


Рис. 4. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в сене первого укоса от запасов минерального азота в почве

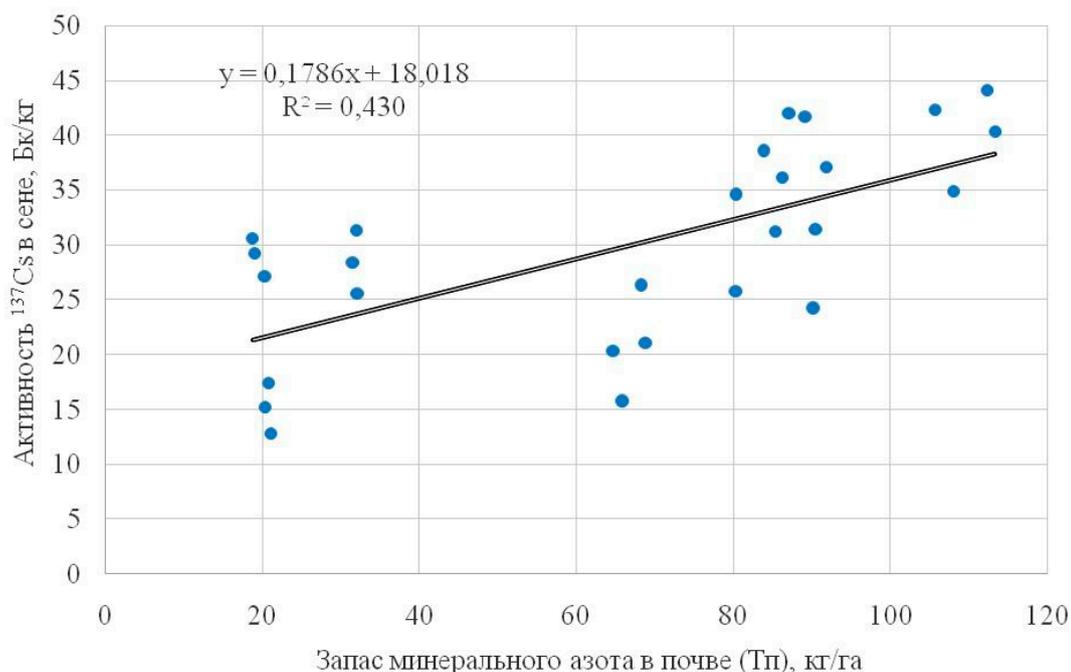


Рис. 5. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в сене второго укоса от запасов минерального азота в почве

Также средний уровень корреляционной зависимости ($R^2 = 0,43$) выявлен между содержанием $N_{\text{мин}}$ в почве после первого укоса трав и удельной активностью ^{137}Cs в сене второго укоса (стандартное отклонение для удельной активности – 8,97, а средняя ошибка аппроксимации – 1,76) (рис. 5). Как показывают данные, с повышением содержания минеральных соединений азота в почве наблюдается функциональное увеличение удельной активности радионуклида в растениях.

Даже при запасах $N_{\text{мин}}$ в пахотном слое почвы на уровне 180–200 кг/га (высокая степень обеспеченности по градации Н. Н. Семеновко) концентрация ^{137}Cs в сене не превышала 100 Бк/кг. Республиканский допустимый уровень (РДУ) содержания радионуклида в сене при производстве цельного молока – 1300 Бк/кг, то есть более чем на порядок.

Рассмотрев основные параметры по зависимости перехода цезия-137 в злаковые травы на торфянисто-глеевой почве, составим матрицу для регрессионного анализа.

Матрица включает 84 наблюдения опыта, результирующий параметр (удельная активность в сене злаковых трав, Бк/кг) и 10 влияющих признаков.

A_y – удельная активность в сене, Бк/кг;

X1 – плотность загрязнения цезием-137 почвы, кБк/м²;

X2 – содержание нитратного азота в почве, мг/кг;

X3 – содержание аммонийного азота в почве, мг/кг;

X4 – содержание подвижного калия в почве;

X5 – содержание подвижного фосфора в почве;

X6 – кислотность pH_{KCl} ;

X7 – урожайность злаковых трав, ц/га;

X8 – гидротермический коэффициент;

X9 – вносимый калий, кг/га д. в.;

X10 – вносимый азот, кг/га д. в.

Коэффициент детерминации (R^2) соответствует высокому уровню (0,83) тесноты взаимосвязи результирующего признака с исследуемыми переменными признаками. Средняя ошибка аппроксимации – 8,6. Однако значение в столбце p -значение должно быть меньше либо равно 0,05. По данному признаку X4, X5, X6 не соответствуют допустимым значениям, что может быть следствием мультиколлинеарности переменных, следовательно, из расчетной формулы они должны быть удалены.

Далее составляем новую модель эмпирического уравнения без учета вышеприведенных переменных. В результате коэффициент детерминации (R^2) соответствует высокому уровню (0,83) тесноты взаимосвязи результирующего признака с исследуемыми переменными.

ными признаками. Средняя ошибка аппроксимации – 8,6.

Данные результаты свидетельствуют о высокой зависимости. Исходя из 83%-го предсказания значений можно сделать вывод, что предложенное нами эмпирическое уравнение не учитывает 17 % других параметров, влияющих на удельную активность цезия-137 в сене многолетних злаковых трав. Использование метода множественной линейной регрессии показало, что:

$$A_y = 4,67 + 0,43 \times X_1 + 5,87 \times X_2 + 0,37 \times X_3 - 0,22 \times X_7 - 7,26 \times X_8 - 0,18 \times X_9 + 0,1 \times X_{10}. \quad (1)$$

Для дальнейшей интерпретации полученного уравнения регрессии следует сделать несколько группировок данных по основным параметрам, которые могут быть изменены в результате направленного хозяйственного воздействия. Для начала следует учесть градацию загрязнения торфяных почв цезием-137 (табл. 4). Для расчета обеспеченности почв нитратным азотом примем равной средней величине между вариантами опыта оптимального года: $X_2 = 4,63$ мг/кг. Для расчетов содержание аммонийного азота в почве примем значение $X_3 = 53,26$ мг/кг, что соответствует средней величине между вариантами опыта оптимального года. Урожайность злаковых трав берем оптимальную $X_7 = 39,4$ ц/га. Значения переменных X_9, X_{10} будут принимать лучший вариант применения удобрений как с экономической, так и радиологической точек зрения ($X_9 = 150$ кг/га; $X_{10} = 120$ кг/га) [14].

Вместо X_8 будем подставлять данные, отражающие оптимальные климатическим условия (оптимальный ГТК – 1,3). Тогда уравнение модели для оптимального года примет следующий вид:

$$A_y = 18,44 + 0,43 \times X_1. \quad (2)$$

Путем подстановки вместо X_1 различных градаций загрязнения почв получим прогнозное значение удельной активности цезия-137 в сене злаковых трав. В наших оценках удельная активность ^{137}Cs в сене, из которого возможно производство кормов из многолетних злаковых трав в пределах РДУ-99 или допустимых уровней технического регламента таможенного союза (ДУ ТР ТС), принималась на уровне 70 % от расчетной величины. Полученный результат отражен в табл. 4.

В соответствии с РДУ-99 для получения нормативно чистого цельного молока (< 100 Бк/л) и мяса (< 500 Бк/л) допустимый уровень ^{137}Cs в сене не должен превышать 1300 Бк/кг; для получения нормативно чистого молока-сырья при переработке на масло – 1850 Бк/кг. Техническим регламентом (ТР ТС 021/2011) «О безопасности пищевой продукции» в рамках Таможенного союза установлен более жесткий – по сравнению с РДУ-99 – норматив на содержание ^{137}Cs в мясе: 200 Бк/кг. Поэтому допустимое содержание цезия-137 в сене для заключительной стадии откормки животных примерно в 2,5 раза ниже и не должно превышать 520 Бк/кг [15, 16].

Таблица 4. Прогнозные значения накопления цезия-137 в сене злаковых трав

№ п/п	Градация почв по плотности загрязнения, кБк/м ² (Ки/км ²)	Удельная активность в сене, Бк/кг	(РДУ-99) 1300 Бк/кг	(РДУ-99) 1850 Бк/кг	(ДУ ТР ТС) 520 Бк/кг
1	37–184,9 (1–4,9)	44,9–127,5	< 40	< 40	< 40
2	185–554,9(5,0–14,9)	127,6–334,3	< 40	< 40	< 40
3	555–1480(15,0–40,0)	334,4–851,5	< 40	< 40	ограничения
4	1481–3700(40,1–100) для ПГРЭЗ	851,6–2092,5	ограничения	ограничения	ограничения

По итогам прогнозных расчетов, приведенных в табл. 4, можно сделать вывод, что на торфянисто-глеевой почве при внесении минеральных удобрений $N_{120}P_{90}K_{150}$ удель-

ная активность цезия-137 в сене многолетних среднеспелых злаковых трав не превысит республиканских допустимых уровней при плотности загрязнения почвы данным радио-

нуклидом до 40 Ки/км² для использования его на корм крупному рогатому скоту в целях получения цельного молока и молока-сырья при переработке на масло. Однако на территории экспериментально-хозяйственной зоны заповедника накладываются ограничения на использование сена злаковых трав при кормлении крупного рогатого скота с целью получения цельного молока и молока-сырья при переработке на масло в 2280 кБк/м² (61,6 Ки/км²) и 3265 кБк/м² (88,2 Ки/км²) соответственно.

Заключение

По итогам исследования и применения регрессионного анализа предложено эмпирическое уравнение, описывающее параметры значения удельной активности цезия-137 в сене многолетних злаковых трав на торфянисто-глеевых почвах. Коэффициент корреляции и коэффициент детерминации соответствует высокому уровню тесноты взаимосвязи результирующего признака с исследуемыми переменными признаками. Разработанная модель не учитывает 17 % других параметров, влияющих на удельную активность цезия-137 в сене многолетних злаковых трав.

Производство мяса с содержанием ¹³⁷Cs до 200 Бк/кг возможно при удельной активности цезия-137 в сене до 520 Бк/кг. На торфянисто-глеевых почвах при применении N₁₂₀P₉₀K₁₅₀ возможно получение сена многолетних злаковых трав с вышеуказанным пороговым значением удельной активности цезия-137 в нем при плотности загрязнения почвы до 885 кБк/м² (23,9 Ки/км²).

Полученные прогнозные данные корректируют значения предельно допустимых плотностей загрязнения почвы, приведенные в ранее опубликованных материалах исследований. Предложенное уравнение наиболее полно описывает накопление цезия-137 в сене злаковых трав по сравнению со стандартными методиками и рекомендуется к использованию в расчетах при прогнозировании удельной активности злаковых трав, возделываемых на загрязненных цезием-137 землях, в частности для экспериментального возделывания на территории экспериментально-хозяйственной зоны Полесского заповедника.

Библиографический список

1. Рекомендации по организации севооборотов на загрязненных радионуклидами землях / Деп. по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, М-во с. х. и продовольствия Респ. Беларусь; РНИУП «Институт радиологии»; Н. Н. Цыбулько [и др.]. – Минск : Ин-т радиологии, 2012. – 84 с.
2. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / под ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. – Москва : Фонд «Инфосфера – НИА – Природа»; Минск : Белкартография, 2009. – 140 с.
3. Евсеев, Е. Б. Влияние азотного и калийного питания на поступление ¹³⁷Cs в растения и продуктивность многолетних злаковых трав на торфянисто-глеевой почве : автореф. ... дис. канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Е. Б. Евсеев; Нац. акад. наук Беларуси, Респ. науч. дочер. унитар. предприятие «Институт почвоведения и агрохимии». – Минск, 2022. – 24 с.
4. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 351 с.
5. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата / В. И. Мельник [и др.]. – Минск – Женева, 2017. – С. 6–8.
6. Евсеев, Е. Б. Технология получения высоких урожаев многолетних среднеспелых злаковых трав, возделываемых на торфяно-деградированной почве, загрязненной цезием-137 / Е. Б. Евсеев // Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур : сб. ст. по материалам XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию кафедры растениеводства, Горки, 30–31 янв. 2019 г. – Горки : БГСХА, 2019. – С. 72–75.

7. Практикум по агрохимии : учеб. пособие для с.-х. вузов / под ред. И. Р. Вильдфлуша, С. П. Кукреша. – Минск : Ураджай, 1998. – 270 с.
8. Яковлева, С. Н. Факторы определяющие величину накопления цезия – 137 многолетними сеянными злаковыми травами / С. Н. Яковлева // Третья Всесоюз. конф. по с.-х. радиологии : тез. докл. : в 3 т. – Обнинск, 1990. – Т. I. – С. 66–67.
9. Оценка состояния Cs-137 в почвах и анализ факторов влияющих на биологическую доступность радионуклида / Р. М. Алексахин [и др.] // Роль творческого наследия академика ВАСХНИЛ В. М. Ключковского в решении современных проблем сельскохозяйственной радиологии : материалы науч.-практ. конф., Москва, 5–6 дек. 2000 г. / ЦНИИ агрохим. обслуживания сел. хоз-ва ; под ред. Р. М. Алексахина, В. Г. Сычева. – Москва, 2001. – С. 196–201.
10. Behaviour of radionuclides in meadows and efficiency of countermeasures / N. I. Sanzharova [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1996. – Vol. 64, iss. 1–2. – P. 43–48. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031564>
11. Рерих, Л. А. Влияние свойств почвы на трансформацию форм Cs-137 и поступление его в сельскохозяйственные растения / Л. А. Рерих, И. Т. Моисеев // Агрохимия. – 1989. – № 8. – С. 96–104.
12. Цыбулько, Н. Н. Накопление ¹³⁷Cs многолетними злаковыми травами на торфянисто-глеевой почве в зависимости от доз калийных удобрений / Н. Н. Цыбулько, И. И. Жукова, Е. Б. Евсеев // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – № 2 (61). – С. 112–120.
13. Влияние азотных удобрений на накопление ¹³⁷Cs многолетними злаковыми травами на торфянисто-глеевой почве / Н. Н. Цыбулько [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 1 (62). – С. 157–168.
14. Цыбулько, Н. Н. Агрономическая и экономическая эффективность применения минеральных удобрений под многолетние злаковые травы на торфянисто-глеевой почве / Н. Н. Цыбулько, Е. Б. Евсеев, И. И. Жукова // Почвоведение и агрохимия. – 2021. – № 1 (66). – С. 113–119.
15. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) : ГН №10-117-99 ; введ. 26.04. 99 ; с изм. и доп.: № 8/5786 от 02.05.2001 г. – Минск : ГУ «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья». – 10 с.
16. О безопасности пищевой продукции : ТР ТС 021/2011 : утв. 9.12. 2011 : вступ. в силу 15.12.2011 / Евраз. эконом. комис. – Москва – Минск, 2011. – 292 с.
17. Бондарь, Ю. И. Научно-исследовательская деятельность Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Ю. И. Бондарь, П. М. Кудан // Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития : сб. науч. тр., посвящ. 25-летию Полесского гос. радиационно-экологического заповедника / М-во по чрезвыч. сит. Респ. Беларусь, Деп. по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, Полес. гос. радиационно-экологический заповедник ; под общ. ред. Ю. И. Бондаря. – Минск : Институт радиологии, 2013. – С. 3–18.

Поступила 21 сентября 2023 г.