

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs ГОЛУБИКОЙ ВЫСОКОРОСЛОЙ (*VACCINIUM* × *COVELLIANUM* BUT. ET PL.)

А. В. Ермоленко¹, Н. Н. Цыбулько², И. И. Жукова³

¹Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова,
г. Могилев, Беларусь

²Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь

³Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка,
г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды радионуклидами в результате массового испытания ядерного оружия, катастроф на атомных станциях и в целом развития ядерной промышленности актуализировало исследование радиоэкологических особенностей растений. В этой сфере особое значение стало иметь изучение корневого поглощения и аккумуляции радиоактивных элементов растениями, обладающими пищевой и кормовой ценностью.

В Беларуси значительное радиоактивное загрязнение территории связано с аварией на Чернобыльской АЭС, произошедшей 26 апреля 1986 г. Несмотря на прошедший после аварии более чем тридцатилетний период, почвы республики по-прежнему загрязнены рядом долгоживущих радионуклидов, наиболее масштабно ^{137}Cs . По состоянию на начало 2020 г. в наиболее пострадавших от аварии Могилевской и Гомельской областях насчитывалось свыше 88 % (756,4 тыс. га) загрязненных радиоцезием (плотность 1 Ки/км² и более) сельскохозяйственных земель и 92 % (1432,8 тыс. га) земель лесного фонда республики [1]. За послеварийный период многочисленными научными исследованиями выявлены особенности накопления радиоцезия у большинства сельскохозяйственных культур, выращиваемых в республике, выявлен вклад основных факторов, определяющих величину накопления радионуклида растениями. Разработанные рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения [2] позволили в целом решить проблему получения продукции растениеводства с содержанием ^{137}Cs в пределах допустимых в республике норм. В неполной мере исследованной к настоящему времени осталась радиоэкология малораспространенных в республике растений и растений, ранее не выращиваемых на загрязненных территориях.

Голубика высокорослая (*Vaccinium* × *covellianum* But. et Pl.) в Беларуси за последние десятилетия прошла путь от малоизвестного растения до одной из наиболее популярных в стране ягодных культур. Растение голубики представляет собой листопадный кустарник, принадлежащий к ботаническому семейству Ericaceae Juss. (Вересковые) с высотой около 2 м, достаточно крупными листьями и покрытыми сизым налетом, ягодами диаметром 1,5–2,5 см [3]. Ягоды голубики высокорослой благодаря богатому набору биологически активных ве-

ществ являются ценным диетическим продуктом с высокими антиоксидантными свойствами [4]. В последнее время наблюдается значительный мировой рост производства и потребления плодов голубики. Крупнейшими производителями ягод являются США, Канада и Чили. Существенный рост площадей под культурой отмечается в Европе – более 65% за последние 8 лет, а производство ягод за этот период почти удвоилось [5]. Активно голубиководство развивается и в Беларуси, о чем свидетельствует увеличение площадей под культурой с 120 га в 2009 г. до 1200 га в 2019 г. [6]. На данный момент в республике районировано 17 сортов культуры [7].

Родиной голубики высокорослой является Северная Америка. Интродукция растения в Беларусь началась в начале 80-х годов прошлого века, тогда же было начато исследование биологических особенностей культуры и возможности ее возделывания в почвенно-климатических условиях республики [3, 8]. Установлено, что наиболее оптимальными для роста и развития голубики высокорослой на территории Беларуси являются условия южной климатической зоны [3], где отдельные сорта культуры способны формировать до 8 кг ягод с растения, вступившего в фазу полного плодоношения [9, 10]. Вместе с тем разнообразие сортов позволяет получать достаточно высокие урожаи ягод культуры и в других климатических зонах республики [11, 12]. В последние годы появились насаждения голубики высокорослой и в районах, имеющих загрязнение почв ^{137}Cs . В доступной научной литературе крайне мало информации о радиозоологических особенностях голубики высокорослой, имеются лишь отдельные данные о содержании ^{137}Cs в ягодах культуры [13]. Малоизученность этого вопроса можно объяснить относительно недавним началом массового культивирования голубики высокорослой и незначительных до недавнего времени площадях насаждений культуры на загрязненных радионуклидами землях. Отсутствие данных о параметрах накопления радионуклидов плодами голубики высокорослой не позволяет оценить риски сверхнормативного накопления радиоактивных элементов в плодах этой перспективной культуры при возделывании на загрязненных радиоактивными элементами почвах. В связи с этим исследования, направленные на изучение радиозоологии голубики высокорослой, имеют как научное, так и практическое значение.

Цель исследований – выявить особенности накопления ^{137}Cs голубикой высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) в зависимости от показателей почвенного плодородия и внесения минеральных удобрений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проводили в 2016–2019 гг. методами полевого и вегетационного опытов. Объектами исследований являлись растения голубики высокорослой широко распространенного и районированного в Беларуси среднеспелого сорта Блюкроп (Bluescrop). Полевой эксперимент осуществлен в 2016–2018 г. на опытном участке, расположенном в н. п. Гиженка Славгородского района Могилевской области. В 2012 г. двухлетними саженцами голубики заложен участок с дерново-подзолистой супесчаной почвой на водноледниковых рыхлых супесях. Растения высаживали в посадочные ямы размером 60×70×50 см, заполненные смесью гумусового горизонта исходной почвы и верхового торфа в соотношении 1 : 1. Схема

посадки растений 3,0×1,0 м. Поверхность почвы вокруг саженца мульчировали опилками деревьев хвойных пород, слоем 8–10 см. Последующие уходные работы за растениями проводили в соответствии с отраслевым регламентом Республики Беларусь «Выращивание голубики высокорослой. Типовые технологические процессы» [14]. Агрохимические показатели почвы корнеобитаемого слоя: подвижные формы калия – 103,5 мг/кг, фосфора – 105,1 мг/кг, содержание $C_{\text{орг}}$ – 5,8 %, $pH_{(KCL)}$ 5,1. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs – 6 Ки/км².

Схема опыта включала следующие варианты применения минеральных удобрений:

1. Контроль;
2. $P_{60}K_{60}$;
3. $N_{60}P_{60}K_{60}$;
4. $N_{90}P_{60}K_{60}$;
5. $N_{90}P_{60}K_{90}$.

Минеральные удобрения (сульфат аммония, сульфат калия, суперфосфат простой) вносили в приствольные полосы на ширину, соответствующую проекции конь кустов. Сроки внесения удобрений: первый (первая декада апреля) – 2/3 дозы; второй (в первой декаде июня) – 1/3 дозы. Повторность опыта четырехкратная.

В 2019 г. для уточнения данных по параметрам перехода ^{137}Cs из почвы в плоды голубики производили отбор и анализ сопряженных образцов (почвенные и растительные) с экспериментальных площадок (ЭП), расположенных в н. п. Гиженка (ЭП1), н. п. Роги (ЭП3) Славгородского района и н.п. Речица (ЭП2) Чериковского района Могилевской области. Опытные растения выращивали с внесением полного минерального удобрения в дозе $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Вегетационный опыт был проведен в 2017–2018 гг. на территории агробиологической станции «Любуж» МГУ имени А. А. Кулешова, расположенной в д. Любуж Могилевского района Могилевской области. Опытные растения 3-х летнего возраста высаживали в сосуды объемом 12 литров. Сосуды заполняли субстратом на основе гумусового горизонта дерново-подзолистой супесчаной почвы и верхового торфа в соотношении 1 : 1. Поверхность почвы мульчировали опилками. Агрохимические показатели почвенного субстрата: подвижные формы калия – 100 мг/кг, фосфора – 156 мг/кг, содержание $C_{\text{орг}}$ – 6,8 %, $pH_{(KCl)}$ 4,0 и 5,0. Удельная активность субстрата составила 3253 Бк/кг. Минеральные удобрения вносили в дозе $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Агрохимические показатели почв определяли по стандартным методикам. Удельную активность (УА) ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах определяли на γ - β спектрометре МКС-АТ1315. Для количественной оценки поступления ^{137}Cs из почвы в растения рассчитывали коэффициент перехода (пропорциональности) K_p [18]. Полученные данные обрабатывали статистическими методами дисперсионного и корреляционного анализов.

Экспериментальная работа осуществлена в рамках выполнения заданий подпрограммы «Радиация и природные системы» государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Природопользование и экология» на 2016–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поступивший посредством корневого поглощения из почвы в голубику высокорослую ^{137}Cs распределяется по органам растения не равномерно. Наибольший практический интерес представляет содержание радионуклида в ягодах культуры. В условиях проведенного нами вегетационного опыта УА ^{137}Cs в плодах голубики в пересчете на сухое вещество составила $359,1 \pm 33,4$ Бк/кг. Большим значением УА ^{137}Cs характеризовались корни растений – $642,0 \pm 42,8$ Бк/кг. Меньшее накопление ^{137}Cs было свойственно листьям и стеблям, где удельная активность радионуклида была $205,1 \pm 25,1$ и $193,5 \pm 28,3$ Бк/кг соответственно. На основе полученных результатов можно построить убывающий ряд органов растения голубики по величине УА ^{137}Cs на момент спелости основной массы плодов: корни > плоды > листья > стебли. Данные величины показывают накопление ^{137}Cs в органах без учета их масс в растении. В нашем исследовании соотношение массы частей растения голубики высокорослой на пятом году жизни составляло – корни : стебли : листья : плоды как 1,0 : 1,8 : 0,9 : 0,3. С учетом этих значений было установлено, что большая часть ^{137}Cs находится в корневой системе – 49,5 % от всей его совокупности в опытном растении. В стеблях аккумулировалось 27,1 % радионуклида. Меньшее количество ^{137}Cs было отмечено в листьях – 1,9 %. В плодах культуры концентрировалось 8,5 % радиоцезия. В этом случае убывающий ряд органов голубики по содержанию поглощенного растениями ^{137}Cs будет выглядеть следующим образом: корни > стебли > листья > плоды. Выстроенные ряды в целом совпадают с данными, описанные разными авторами в других исследованиях, о большем накоплении радионуклида ^{137}Cs в корнях растений по сравнению с плодами, стеблями и листьями [16, 17]. Очевидно, что полученные результаты дают представление о распределении радиоцезия по растению за период роста в условиях опыта. В дальнейшем в зависимости от интенсивности развития вегетативных и генеративных органов количественное распределение радионуклида по растению может несколько варьировать.

Агрохимические показатели почв являются существенным фактором, определяющим величину поступления радионуклидов в растения. Известно, что корневую доступность ^{137}Cs значительно детерминируют кислотность почвы и содержание в ней подвижных форм калия [18, 19]. Голубика высокорослая достаточно требовательна к кислотности корнеобитаемого слоя. Среди минеральных почв оптимальными для нее считаются сильнокислые, так же подходят и почвы со средней кислотностью. Учитывая, что повышенная кислотность почвенного раствора является фактором, увеличивающим биологическую доступность радиоцезия, необходимо выяснить ее роль в накоплении радионуклида плодами голубики высокорослой.

Для определения вклада показателей почвенного плодородия в величину поступления ^{137}Cs в растения голубики нами были отобраны сопряженные растительные (плоды голубики) и почвенные образцы. Посредством корреляционно-регрессионного анализа данных была выявлена высокая степень зависимости величин коэффициентов перехода (K_p) ^{137}Cs из почвы в растения голубики высокорослой от значений кислотности почвы ($\text{pH}_{\text{КС}}$). Коэффициент детерминации (R^2) составил 0,70 при критическом значении $R^2 = 0,33$ Корреляционная зависимость K_p от $\text{pH}_{\text{КС}}$ почвы представлена на рис. 1.

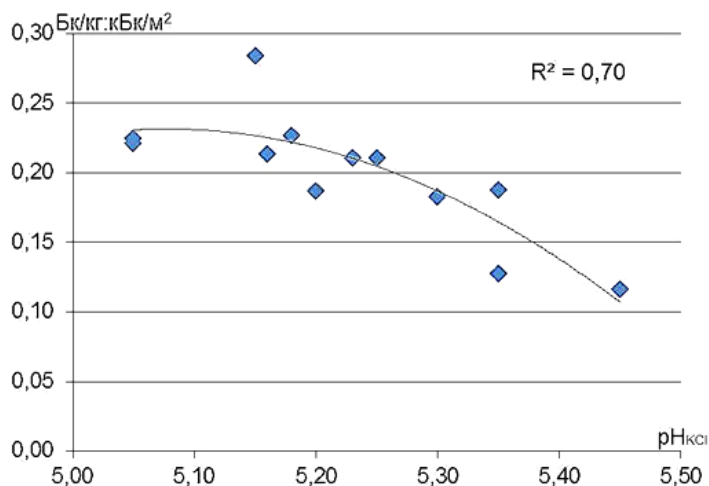


Рис. 1. Зависимость Кп ¹³⁷Cs в плоды голубики высокорослой от кислотности почвы

При снижении кислотности почвы (увеличение значений pH_{KCl}) наблюдается уменьшение перехода радионуклида в плоды голубики.

Влияние кислотности почвы на поступление радиоцезия в растения голубики было выявлено нами и на уровне вегетационного опыта. По данным 2017 г. УА ¹³⁷Cs в ягоды голубики высокорослой при выращивании культуры на почве с pH_(KCl) 4,0 составила 44,9 Бк/кг. В аналогичном варианте, но с менее кислой почвой удельная активность радионуклида была на 32,8 % ниже и составила 30,2 Бк/кг. В 2018 г. аналогичное различие между вариантами находилось на уровне 31,3 % (рис. 2).

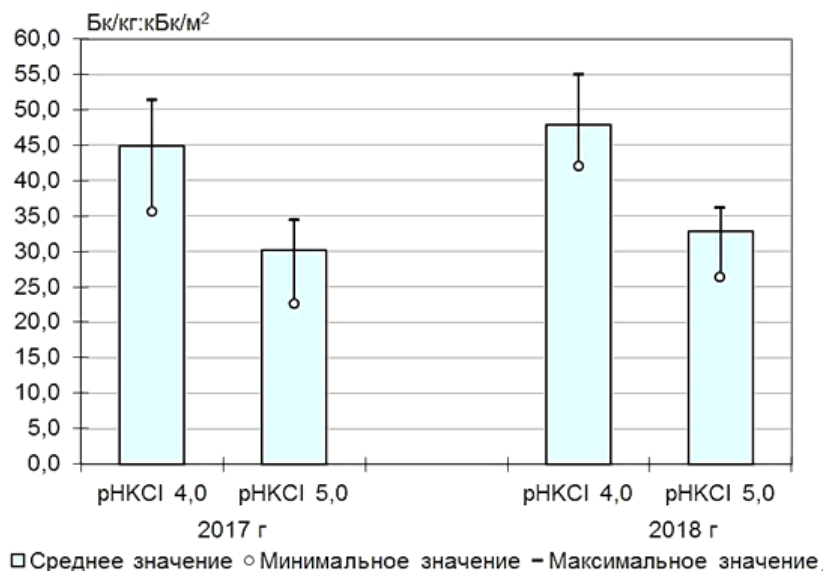


Рис. 2. Влияние кислотности почвы на поступление ¹³⁷Cs (Кп) в плоды голубики высокорослой

Зависимость поступления ^{137}Cs в плоды голубики прослеживалась и от содержания в почве подвижных форм калия, но связь показателей в этом случае была менее выражена ($R^2 = 0,43$), чем с кислотностью почвы. С увеличением содержания в почве K_2O значения K_p радионуклида снижались (рис. 3).

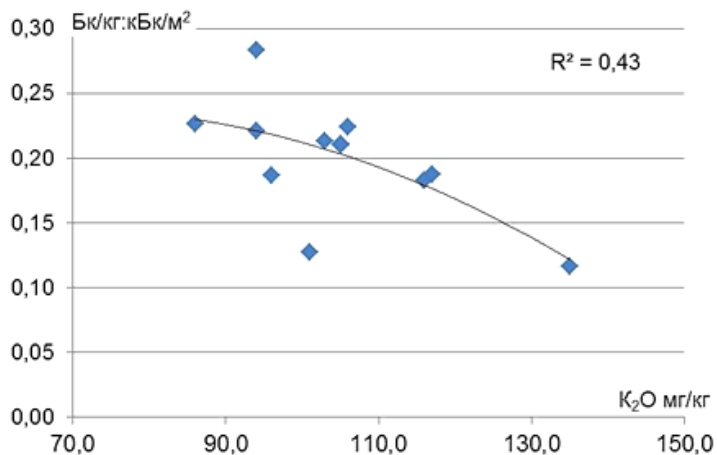


Рис. 3. Зависимость поступления (K_p) ^{137}Cs из почвы в плоды голубики высокорослой от содержания в почве подвижных форм калия

Влияние таких параметров почвенного плодородия как содержание подвижных форм фосфора и органического вещества на поступление радиоцезия в растения в нашем эксперименте было не существенным – коэффициенты детерминации были равны 0,12 и 0,21 соответственно.

Ведущая роль в снижении перехода радионуклидов из почвы в растения принадлежит агрохимическим приемам возделывания сельскохозяйственных культур, прежде всего внесению минеральных удобрений [20]. Влияние минеральных удобрений на накопление ^{137}Cs в ягодах голубики высокорослой изучалось нами в формате полевого эксперимента в 2016–2018 гг.

Результаты исследования показали, что значения УА ^{137}Cs в ягодах голубики за весь период исследований в зависимости от варианта опыта колебалась в диапазоне от 26,0 до 48,2 Бк/кг. Максимальные величины УА ежегодно отмечались в варианте без применения минеральных удобрений. Среднее за годы исследования значение УА в этом варианте составило 42,7 Бк/кг. Внесение минеральных удобрений способствовало снижению УА радионуклида в плодовой продукции голубики. В этих вариантах средние за период эксперимента значения показателя находились в диапазоне от 31,7 до 35,8 Бк/кг. В силу специфичности показателя УА статистически достоверных различий значений между вариантами с внесением минеральных удобрений не зафиксировано (табл. 1).

Следует отметить, что за весь период исследований величины УА ^{137}Cs в ягодах голубики высокорослой не превышали порогового значения РДУ-99 для садовых ягод, равного 70 Бк/кг, следовательно, вся ягодная продукция, полученная в условиях опыта, может быть использована в пищу без обработки.

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs в ягодах голубики высокорослой в зависимости от варианта внесенного удобрения, Бк/кг $\pm \Delta_{0,95}$

Вариант опыта	2016 г.	2017 г.	2018 г.	Среднее по г. м
Контроль	36,8 \pm 11,8	43,2 \pm 8,3	48,2 \pm 8,5	42,7 \pm 5,5
P ₆₀ K ₆₀	26,0 \pm 2,4	33,3 \pm 8,2	36,3 \pm 14,9	31,9 \pm 6,8
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	29,9 \pm 14,0	31,1 \pm 2,1	34,0 \pm 6,5	31,7 \pm 6,8
N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	27,2 \pm 6,3	34,8 \pm 10,5	33,9 \pm 3,6	31,9 \pm 4,0
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	36,4 \pm 11,8	35,9 \pm 8,5	35,3 \pm 4,7	35,8 \pm 1,7
HCP ₀₅	8,21			

Для отражения величины поступления ^{137}Cs в растения с учетом загрязнения почвы радионуклидом нами были рассчитаны коэффициенты перехода радиоцезия из дерново-подзолистой супесчаной почвы в ягоды голубики высокорослой в зависимости от внесения минеральных удобрений. Результаты расчетов показали, что максимальный переход радионуклида в ягоды происходит при выращивании голубики без минеральных удобрений. В этом варианте ежегодно фиксировались наибольшие по опыту значения Кп: в 2016 г. коэффициент составил 0,178 Бк/кг:кБк/м², в 2017 и 2018 гг – 0,202 и 0,219 Бк/кг:кБк/м² соответственно.

Внесение минеральных удобрений приводило к снижению поступления ^{137}Cs в растения голубики по сравнению с контрольным вариантом. Значительное снижение значений Кп относительно контроля произошло в варианте с внесением фосфорных и калийных удобрений. В этом случае, в зависимости от вегетационного периода, уменьшение значений Кп радионуклида из почвы в плоды культуры достигало 26,8–34,0 % и в среднем за период исследования составило 29,5 % (табл. 2).

Таблица 2

Влияние минеральных удобрений на Кп ^{137}Cs из дерново-подзолистой супесчаной почвы в плоды голубики высокорослой, Бк/кг:кБк/м² $\pm \Delta_{0,95}$

Вариант опыта	2016 г.	2017 г.	2018 г.	Среднее
Контроль	0,178 \pm 0,075	0,202 \pm 0,017	0,219 \pm 0,008	0,199 \pm 0,026
P ₆₀ K ₆₀	0,117 \pm 0,021	0,147 \pm 0,022	0,157 \pm 0,047	0,140 \pm 0,015
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0,143 \pm 0,070	0,148 \pm 0,012	0,161 \pm 0,027	0,151 \pm 0,034
N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	0,130 \pm 0,032	0,161 \pm 0,033	0,169 \pm 0,029	0,153 \pm 0,013
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0,168 \pm 0,063	0,162 \pm 0,030	0,160 \pm 0,015	0,163 \pm 0,012
HCP ₀₅	p > 0,05	0,037	0,044	0,033

Внесение полного минерального удобрения с возрастающими дозами азота и калия также способствовало снижению значений Кп ^{137}Cs из почвы в ягоды голубики относительно варианта без применения удобрений, однако это снижение было не однозначным и варьировало по годам исследования. Так, в 2016 г. в варианте с дозой удобрений N₆₀P₆₀K₆₀ Кп составил 0,143 Бк/кг:кБк/м², в варианте N₉₀P₆₀K₆₀ – 0,130 Бк/кг:кБк/м². В варианте с максимальной дозой калийных удобрений на фоне наибольшей дозы азотных (N₉₀P₆₀K₉₀) значение Кп было равно

0,168 Бк/кг:кБк/м² и по сравнению с другими вариантами опыта наиболее приблизилось к контролю.

В 2017 г. значение Кп в случае внесения полного удобрения с азотными в дозе 60 кг действующего вещества на гектар мало отличалось от значения Кп полученного в варианте с безазотным фоном – 0,148 и 0,147 Бк/кг:кБк/м², соответственно. Аналогичная ситуация отмечена также при сравнении Кп в вариантах N₉₀P₆₀K₆₀ и N₉₀P₆₀K₉₀, где значения были несколько больше и составили соответственно 0,161 и 0,162 Бк/кг:кБк/м².

По экспериментальным данным, полученным в 2018 г., величины Кп ¹³⁷Cs из почвы в ягоды голубики высокорослой в вариантах с внесением минеральных удобрений были ниже Кп контрольного варианта, однако значительно не различались между собой и находились в диапазоне от 0,157 Бк/кг:кБк/м² на фосфорно-калийном фоне до 0,169 Бк/кг:кБк/м² в случае применения максимальной в опыте дозы азота (N₉₀P₆₀K₆₀).

В целом за период исследования во всех случаях внесение минеральных удобрений относительно варианта без применения удобрений способствовало существенному снижению поступления ¹³⁷Cs из почвы в плоды голубики высокорослой. Максимальный эффект в снижении давало внесение только фосфорных и калийных удобрений – 29,5 %. Добавление к фосфорным и калийным удобрениям азотных в дозе 60 кг д. в. на гектар снижало поступление уже на 24,5 %. Увеличение дозы азота в полном минеральном удобрении до 90 кг д. в./га, обеспечивало снижение Кп в ягоды относительно контроля на 23,0 %. В случае максимальных доз калийных и азотных удобрений (вариант N₉₀P₆₀K₉₀) снижение было минимальным – 18,0 %. Таким образом, в опыте на фоне снижения поступления ¹³⁷Cs от внесения минеральных удобрений прослеживалась тенденция роста перехода радиоцезия в ягоды при увеличении доз азотных удобрений относительно варианта фосфорно-калийного фона. Данный факт согласуется с данными других исследователей, свидетельствующих о роли азота в увеличении поступления ¹³⁷Cs в растения [21].

В опыте стоит отметить некоторый рост значений Кп по годам исследования. Так если в 2016 г. среднее значение Кп в эксперименте составило 0,147 Бк/кг:кБк/м², то в 2017 г. – 0,164 Бк/кг:кБк/м², а в 2018 г. – 0,173 Бк/кг:кБк/м². Возможно, влияние на процесс накопления растением радионуклида оказали охваченные нашими исследованием метеорологические условия вегетационных периодов, которые различались как по температуре воздуха, так и по количеству и равномерности выпавших осадков. Согласно гидротермическому коэффициенту Г. Т. Селянинова (ГТК) [22], вегетационные периоды 2016, 2017 и 2018 г. в наших исследованиях характеризовались хорошим увлажнением (ГТК = 1,4, 1,1 и 1,6 соответственно). Тем не менее ГТК вегетационного периода 2017 г. был близок к значениям, указывающих на засушливые условия роста растений (ГТК = 0,5–1,0), а 2018 г. – на условия избыточного увлажнения (ГТК ≥ 1,7). Полученные данные согласуются со сведениями, имеющимися в научной литературе, о минимальном накоплении ¹³⁷Cs в сельскохозяйственных культурах при оптимальном увлажнении почв, увеличение накопления происходит как при переувлажнении почв, так и в засушливых условиях [22]. Краткосрочность проведения нашего эксперимента не позволяет сделать однозначных выводов по данному факту.

В 2019 г. нами был произведен анализ содержания ^{137}Cs в растениях голубики при их возделывании на дерново-подзолистых супесчаных почвах, различающихся уровнем загрязнения ^{137}Cs и комплексом агрохимических параметров, чтобы уточнить полученные в полевом опыте данные о параметрах накопления ^{137}Cs в плодах голубики высокорослой и оценить возможность использования результатов для прогноза накопления радионуклида в ягодах культуры (табл. 3).

Таблица 3

Параметры поступления и аккумуляции ^{137}Cs в плодах голубики высокорослой и качественные характеристики почвы корнеобитаемого слоя

Место отбора проб	Параметры аккумуляции ^{137}Cs в плодах голубики		Радиологические и агрохимические параметры корнеобитаемого слоя почвы				
	УА, Бк/кг $\pm\Delta_{0,95}$	КП ^{137}Cs , Бк/кг: кБк/м ² $\pm\Delta_{0,95}$	УА, Бк/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	pH _(KCL) , мг/кг	C _{орг} , мг/кг
ЭП* 1	30,5 \pm 9,5	0,155 \pm 0,043	672,3	105,2	104,5	5,2	6,6
ЭП 2	40,8 \pm 9,4	0,163 \pm 0,019	794,8	89,5	62,0	5,0	6,5
ЭП 3	122,2 \pm 21,0	0,176 \pm 0,030	2388,0	338,0	128,1	4,7	3,1

*ЭП – экспериментальное поле.

Результаты исследования в целом оказались сопоставимыми с данными, полученными в 2016–2018 гг. Так, у голубики, выращенной в почвенных условиях, близких к проведенному ранее полевому опыту (ЭП 1), значение УА ^{137}Cs в плодах составило 30,5 Бк/кг, а величина Кп – 0,155 Бк/кг:кБк/м². Несколько большие значения УА и Кп радионуклида отмечались в плодах голубики выращенной на ЭП 2 в а. г. Речица Чериковского района – 40,5 Бк/кг и 0,163 Бк/кг:кБк/м² соответственно. Почва данного участка характеризовалась большим по сравнению с предыдущим вариантом загрязнением радиоцезием, содержанием ниже оптимальных для культуры значений подвижных форм калия и фосфора. На ЭП 3 с почвой, имеющей самое высокое в эксперименте загрязнение ^{137}Cs корнеобитаемого слоя (2388,0 Бк/кг), зафиксирована УА радионуклида в ягодах, превышающая РДУ-99 – 122,2 Бк/кг. Кп ^{137}Cs в этом случае составил 0,176 Бк/кг:кБк/м². Особенностью агрохимических параметров почвы этого участка являлось высокое содержание подвижных форм фосфора, оптимальное для голубики содержание калия, повышенная по сравнению с предыдущими вариантами кислотность и более чем в два раза меньшее содержание органического вещества.

В целом эксперимент 2019 г. показал, что значения Кп радионуклида при выращивании голубики высокорослой на дерново-подзолистой супесчаной почв, близкой по уровню загрязнения ^{137}Cs и агрохимическим параметрам к почве полевого опыта и по результатам самого опыта 2016–2018 гг., сопоставимы и могут служить основой для расчета предельной плотности загрязнения почвы, позволяющей получать ягодную продукцию голубики с содержанием ^{137}Cs в пределах РДУ-99.

Основной задачей при выращивании сельскохозяйственных культур на загрязненных землях является получение продукции с содержанием радионуклидов в пределах допустимых для дальнейшего использования уровня. Расчет предельно допустимые величин плотности загрязнения дерново-подзолистой супесчаной

почвы радионуклидом (приближенной по агрохимическим параметрам к оптимальным значениям для культуры), при которых возможно производство ягод голубики высокорослой с удельной активностью радиоцезия менее 70 Бк/кг нами был осуществлен на основе результатов, полученных в условиях полевого эксперимента с удобрениями. Данные расчетов указывают на то, что искомый показатель в зависимости от года исследования и внесения минеральных удобрений находится в диапазоне от 8,7 до 16,6 Ки/км². Выращивание голубики высокорослой с применением минеральных удобрений позволяет получать ягодную продукцию с содержанием радионуклида в пределах РДУ-99 с участков, имеющих большее загрязнение почв ¹³⁷Cs (в зависимости от года исследования и варианта внесения удобрений – 11,5–16,6 Ки/км²), чем без их использования (8,7–12,0 Ки/км²), табл. 7.

Таблица 7

Предельная плотность загрязнения дерново-подзолистой супесчаной почвы ¹³⁷Cs для производства нормативно чистых ягод голубики высокорослой, Ки/км²

Вариант опыта	2016 .	2017 г.	2018 г.	Среднее значение, $x \pm \Delta_{0,95}$
Контроль	12,0	9,4	8,7	9,6±1,2
P ₆₀ K ₆₀	16,6	13,0	12,9	13,6±1,4
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	15,2	12,9	12,0	13,0±2,4
N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	15,2	12,2	11,5	12,4±1,0
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	12,6	12,0	11,9	11,6±0,9

Усредненные по годам исследования величины предельно допустимой плотности загрязнения дерново-подзолистых супесчаных почв ¹³⁷Cs с учетом нижней границы доверительного интервала указывают, что производство ягодной продукции голубики в соответствии с РДУ-99 (с внесением полного минерального удобрения) возможно при плотности загрязнения не выше 11,4 Ки/км² (вариант N₉₀P₆₀K₆₀).

Максимальные ограничения по плотности загрязнения почв радионуклидом возникают при выращивании голубики высокорослой без применения минеральных удобрений – 8,4 Ки/км². При загрязнении дерново-подзолистых супесчаных почв ¹³⁷Cs (схожими с опытной почвой агрохимическими параметрами) менее этого значения возделывание голубики высокорослой с применением всех изученных в данной работе доз удобрений позволит получить ягодную продукцию с минимальным риском превышения допустимых норм содержания радионуклида.

ВЫВОДЫ

Проведенными исследованиями установлено, что при выращивании голубики высокорослой на загрязненной ¹³⁷Cs почве в растениях радионуклид (согласно его УА и массового соотношения органов) распределяется по органам растения следующим образом: корни > стебли > листья > плоды.

Выявлено влияние кислотности почвы и содержания подвижных форм калия на величину поступления ¹³⁷Cs в растения голубики. Кп ¹³⁷Cs из почвы в плоды культуры характеризуется высокой степенью зависимости от кислотности почвы

($R^2 = 0,70$) и заметной степенью зависимости от содержания K_2O ($R^2 = 0,43$). С увеличением значений $pH_{(KCl)}$ и содержания подвижных форм поступление радионуклида в растения голубики снижается.

Минеральные удобрения значительно уменьшают поступление радиоцезия в плоды голубики высокорослой. На дерново-подзолистой супесчаной почве с содержанием в пахотном горизонте подвижных форм калия – 103,5 мг/кг, фосфора – 105,1 мг/кг, органического углерода – 5,8 %, $pH_{(KCl)}$ 5,1 и плотностью загрязнения ^{137}Cs – 6 Ки/км², максимальный Кп радионуклида отмечен в контрольном варианте без применения удобрений – 0,199 Бк/кг:кБк/м². Внесение фосфорно-калийных удобрений снижало Кп на 29,5 %. Увеличение доз азотных и калийных удобрений не способствовало дальнейшему уменьшению поступления ^{137}Cs из почвы в плоды голубики. В этих вариантах снижение Кп относительно контроля составило 18,0–24,5 % соответственно. В отдельные годы прослеживалась тенденция некоторого роста поступления радиоцезия в ягоды при увеличении доз азотных удобрений относительно варианта фосфорно-калийного фона.

Анализ параметров перехода ^{137}Cs в растения голубики высокорослой на примере широко распространенного и районированного в Беларуси среднеспелого сорта Блюкроп (Bluecrop) указывает на возможность получения плодовой продукции культуры, соответствующей РДУ-99 по содержанию радионуклида, на дерново-подзолистых супесчаных почвах, близких по агрохимическим характеристикам к оптимальным для культуры, с плотностью поверхностного загрязнения ^{137}Cs до 8,4 Ки/км², без внесения минеральных удобрений. Применение полного минерального удобрения в зависимости варианта его внесения способно увеличить предельную плотность загрязнения до 10,6–12,0 Ки/км².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь. Статистический сборник / Национальный статистический комитет РБ; ред. кол. И. В. Медведева [и др.]. – Минск, 2020. – 203 с.
2. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы / Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС МЧС РБ, М-во с.-х. и прод. Респ. Беларусь. – Минск, 2012. – 122 с.
3. Голубика высокорослая: оценка адаптационного потенциала при интродукции в условиях Беларуси / Ж. А. Рупасова [и др.]; под ред. В.И. Парфенова. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 442 с.
4. Пинчукова, Ю. М. Пищевая ценность плодов голубики / Ю. М. Пинчукова, С. Л. Масанский // Голубиководство в Беларуси итоги и перспективы: материалы Респ. науч.-практ. конф.; 17 авг. 2012 г.; Минск / Центральный ботанический сад НАН Беларуси, ред. кол.: В. В. Титок [и др.]. – Минск, 2012. – С. 45–48.
5. В Европе быстро увеличиваются площади под голубикой. Информация о рынках овощей и фруктов на восток от Евросоюза // EastFruit [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://east-fruit.com/article/v-evrope-bystro-uvlechivayutsya-ploshchadi-pod-golubikoy> – Дата доступа: 08.05.2020.

6. *Ермоленко, А. В.* Методические аспекты почвенно-радиоэкологической оценки пригодности земель к возделыванию голубики высокорослой / А. В. Ермоленко, Н. Н. Цыбулько, И. И. Жукова // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. Л. С. Новопольцева; под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – С. 247–250.

7. Государственный реестр сортов / Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений. – Минск, 2020. – 270 с.

8. *Решетников, В. Н.* Состояние и перспективы развития голубиководства в Беларуси / В. Н. Решетников, А. А. Веевник // Голубиководство в Беларуси итоги и перспективы: материалы Респ. науч.-практ. конф.; 17 авг. 2012 г.; Минск / Центральный ботанический сад НАН Беларуси, ред. кол.: В. В. Титок [и др.]. – Минск, 2012. – С. 54–58.

9. *Курлович, Т. В.* Габитус и урожайность зрелых растений сортовой голубики в репродуктивной фазе онтогенеза / Т. В. Курлович // Опыт и перспективы возделывания голубики на территории Беларуси и сопредельных стран: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17–18 июля 2014 г. / Центр. бот. сад НАН Беларуси; редкол.: В. В. Титок (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – С. 49–56.

10. *Павловский, Н. Б.* Плодоношение сортов голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) в Беларуси / Н. Б. Павловский // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біялаг. навук. – 2018. – Т. 63. – № 4. – С. 486–499.

11. *Ермоленко, А. В.* Сортвые особенности сроков созревания и урожайности ягод голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.) в условиях восточной части Беларуси / А. В. Ермоленко, А. Д. Сивцова, Н. В. Костина // Вестник БГСХА. – 2017. – № 2. – С. 25–29.

12. *Сачивко, Т. В.* Оценка сортов голубики в коллекционном питомнике ботанического сада УО «БГСХА» / Т. В. Сачивко // Вестник БГСХА. – 2018. – № 3. – С. 107–110.

13. *Морозов, О. В.* Аккумуляция радионуклидов культурными видами *Vacciniaceae* / О. В. Морозов, Н. Б. Павловский, В. Н. Босак // Известия Академии аграрных наук Республики Беларусь. – 1996. – № 3. – С. 62–66.

14. *Павловский, Н. Б.* Возделывание голубики высокорослой / Н. Б. Павловский // Организационно-технологические нормативы возделывания овощных, плодовых, ягодных культур и выращивания посадочного материала: сборник отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси; рук. разработ.: В. Г. Гусаков [и др.] – Минск: Беларуская навука, 2010. – С. 375–393.

15. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий: методическое руководство. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 784 с.

16. *Илахун, А.* Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr по фракциям органического вещества серо-коричневой почвы СУАР КНР и поглощение их растениями из водных растворов и разных почв в присутствии различных лигандов: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27, 06.01.04 / А. Илахун; МСХА имени К. А. Тимирязева. – М., 2009. – 21 с.

17. *Переволоцкий, А. Н.* Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах / А. Н. Переволоцкий. – Гомель: Ин-т радиологии, 2006. – 255 с.

18. Сасина, Н. В. Перераспределение ^{137}Cs - и ^{90}Sr -активности в системе «почва – поровый раствор» на примере почв Беларуси / Н. В. Сасина, А. И. Янков // Літасфера. – 2005. – № 2. – С. 137–145.

19. Влияние агрохимических свойств и степени окультуренности почв на поступление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостой основных типов лугов Белорусского полесья / И. М. Богдевич [и др.] // Почвоведение и агрохимия: сб. науч. тр. // Ин-т агрохимии и почвоведения НАН Беларуси. – 2004. – Вып. 33. – С. 150–162.

20. Влияние длительного комплексного применения удобрений и агротехнических приемов на размеры накопления ^{137}Cs урожаем сельскохозяйственных культур в отдаленный период после аварии на ЧАЭС / Н. М. Белоус [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. – 2009. – № 1. – С. 25–31.

21. Накопление ^{137}Cs сельскохозяйственными культурами на песчаных и супесчаных почвах Белорусского Полесья под влиянием различных мелиорантов / Н. И. Санжарова [и др.] // С.-х. биология. – 1996. – № 5. – С. 55–60.

22. Драганская, М. Г. Агроэкологическое обоснование применения органических удобрений на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых песчаных почвах юго-запада России: автореф. дис. ...док с.-х. наук: 06.01.04 / М. Г. Драганская; Брянская ГСХА. – Брянск, 2008. – 55 с.

FEATURES OF THE ACCUMULATION OF ^{137}CS IN HIGHBUSH BLUEBERRY (*VACCINUM* × *COVELLIANUM* BUT. ET PL.)

A. V. Yarmolenka, N. N. Tsybulka, I. I. Zhukova

Summary

The article presents the results of a study of the features of accumulation of ^{137}Cs in tall blueberries of the Bluecrop variety on sod-podzolic sandy loam soil. It was revealed that, according to the specific activity of ^{137}Cs , the organs of blueberry plants in the stage of fruit ripeness are ranked in the following order: roots > stems > leaves > berries. The transfer coefficient (K_p , Bq/kg : kBq/m²) of ^{137}Cs from soil to crop fruits is characterized by a high degree of dependence on soil acidity ($R^2 = 0,70$) and a noticeable degree of dependence on the content of in it K_2O ($R^2 = 0,43$). With an increase in pH_{KCl} values and the content of mobile forms of potassium, the intake of radionuclide into blueberry plants decreases. The introduction of mineral fertilizers reduces the intake of radiocaesium in blueberry fruits. The maximum input of ^{137}Cs from soil into plants occurred in the control variant without the use of fertilizers (K_p , 0,199 Bq/kg : kBq/m²). The application of phosphorus-potassium fertilizers reduced K_p by 29, 5%. The use of a complete mineral fertilizer does not contribute to a further decrease in the ^{137}Cs intake in blueberry fruits – the decrease in K_p relative to the control is 18,0–24,5 %, depending on the variant of the experiment. The limiting density of soil contamination that ensures the production of fruit crops corresponding to RDU-99 in terms of ^{137}Cs content, depending on the option of applying mineral fertilizers, varies from 8,4 Ci/km² to 11,4 Ci/km².

Поступила 25.11.20