

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии»
(Филиал «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК»)

УДК 631.4:504.53:614.876:539.16

Пономарева Татьяна Сергеевна

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭДАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МИГРАЦИЮ
ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ»**

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
(прикладные исследования)

Руководитель: Поливкина Е.Н., начальник группы
радиоэкологии сельскохозяйственных растений, к.б.н.

Курчатов 2020 г.

АВТОР

Пономарева Татьяна Сергеевна

специалист группы радиоэкологии сельскохозяйственных растений отдела комплексных исследований экосистем филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», 1992 года рождения, окончила Семипалатинский государственный университет им. Шакарима в 2015 г., специальность – «экология», квалификация по диплому – «бакалавр экологии», проходит обучение в магистратуре Алтайского государственного аграрного университета по специальности «природопользование и водопользование», работает в ИРБЭ НЯЦ РК с 2017 г., общий стаж работы 3 года.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Специалист группы радиоэкологических исследований
отдела комплексных исследований экосистем



Т.С. Пономарева

подпись, дата

Начальник группы радиоэкологии сельскохозяйственных
растений



Е.Н. Поливкина

подпись, дата

ПОНОМАРЕВА ТАТЬЯНА СЕРГЕЕВНА

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭДАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МИГРАЦИЮ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ»

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов

**Национального ядерного центра Республики Казахстан
от Филиала «ИРБЭ» РГП «НЯЦ РК»**

Конкурсная работа содержит 23 страницы, 2 рисунка, 11 таблиц, 13 источников.

Объект исследования: почвенные образцы с водотоков штолен №176 и 177; площадки П-2; площадки «4а», отвалов «Атомного озера», культура перца (*Capsicum annuum*).

Цель исследований: изучить влияние эдафических факторов на коэффициенты накопления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ (Кн) в системе «почва-растение» на примере культуры *Capsicum annuum* в условиях модельного эксперимента.

Задачи исследования:

- Определить статистически достоверные коэффициенты накопления (Кн) техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ культурой *Capsicum annuum* для почв СИП, различающихся по типу и характеру радиоактивного загрязнения.
- Определить характер распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ в растении *Capsicum annuum*.
- Установить зависимость значений Кн радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ от физико-химических свойств почв и форм нахождения радионуклидов.
- Рассчитать относительный вклад основных эдафических факторов в варьирование значений коэффициентов накопления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$.

Методика исследований: исследование параметров накопления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ осуществляли путем проведения лабораторных, камеральных работ, обработки данных и анализа полученных результатов. *Лабораторные работы:* проведение вегетационного опыта, отбор проб экспериментальных растений, подготовка проб растений и почвы к анализам, проведение радионуклидного анализа проб растений и почвы, проведение физико-химических анализов почвы. *Камеральные работы:* обработка и анализ полученных данных.

Результат работ: получены статистически достоверные значения Кн техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ для культуры *Capsicum annuum* на почвах СИП, различающихся по типу и характеру радиоактивного загрязнения. Установлены наиболее значимые факторы, влияющие на интенсивность миграции радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr в системе «почва-растение». Разработаны регрессионные модели, описывающие зависимость накопления радионуклидов на примере культуры *Capsicum annuum*.

Актуальность проблемы: в рамках стратегий, направленных на проведение реабилитационных мероприятий земель Семипалатинского испытательного полигона (СИП), большое значение имеет детальное исследование процессов, определяющих миграцию техногенных радионуклидов в системе «почва-растение». Одним из эффективных методов оценки при обосновании проведения данных работ должно стать математическое моделирование, отражающее особенности поведения радионуклидов в почвах различных участков СИП на основе идентификации процессов, оказывающих влияние на интенсивность миграции радионуклидов. Необходимо при этом учитывать некорректность использования обобщенных мировых данных о накоплении радионуклидов растениями для почвенно-климатических условий СИП, т.к. переход радионуклидов может значительно варьировать для

различных почвенно-климатических зон, а также зависеть от характера радиоактивного загрязнения территории и времени взаимодействия радионуклидов с почвой. В результате чего, возникает необходимость в разработке региональной модели миграции радионуклидов в системе «почва-растение», учитывающей местные условия.

Научная новизна: впервые в условиях модельного эксперимента была определена роль физико-химических показателей почв в накоплении ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ растениями на примере культуры *Capsicum annuum*.

Практическая ценность: результаты исследований позволят получить информацию о наиболее значимых факторах, определяющих миграцию радионуклидов в системе «почва-растение», которые в дальнейшем могут быть использованы при прогнозировании, разработке реабилитационных мероприятий и оценке радиационной обстановки на радиоактивно загрязненных территориях.

Личный вклад автора: разработка схемы вегетационного эксперимента, его проведение, отбор проб растений, обработка и анализ полученных данных.

Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов

Бк/кг – Беккерель на килограмм

Кн – коэффициент накопления

м – метр

МЭД – мощность эквивалентной дозы

пл. – площадка

р-н – район

СИП – Семипалатинский испытательный полигон

УА – удельная активность

ФАР – фотосинтетически активная радиация

n – число случаев,

GM – среднее геометрическое

AM – среднее арифметическое

SD – стандартное отклонение

r – коэффициент корреляции

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	7
1.1.Объекты исследования.....	7
1.2.Методика проведения эксперимента.....	7
1.3.Подготовка проб растений и почв для радионуклидного анализа.....	8
1.4.Измерение удельной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$	8
1.5.Методы обработки и анализа экспериментальных данных.....	9
2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.....	10
2.1. Контроль абиотических и биотических факторов в течение модельного эксперимента.....	10
2.2. Физико-химические показатели исследуемых почвенных образцов.....	12
2.3. Накопление техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ культурой <i>Capsicum annuum</i> на почвах с различным характером радиоактивного загрязнения....	13
2.4. Оценка влияния эдафических факторов на миграцию ^{137}Cs и ^{90}Sr в системе «почва-растение»	16
2.4.1. Статистическая обработка данных методом множественного корреляционного анализа.....	16
2.4.2. Статистическая обработка данных методом факторного анализа.....	19
2.4.3. Статистическая обработка данных методом регрессионного анализа.....	20
ВЫВОДЫ.....	22
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	23

ВВЕДЕНИЕ

В результате испытаний ядерного оружия на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) в период с 1949 по 1989 гг. значительная территории Казахстана подверглась радиоактивному загрязнению. При этом, на данный момент почва остается одним из наиболее важных каналов, по которым техногенные радионуклиды могут включаться в пищевые цепочки, что обуславливает необходимость детального исследования процессов, определяющих их миграционную способность в системе «почва-растение», которая может изменяться в довольно широком диапазоне значений в пространстве и времени в зависимости от множества факторов.

К настоящему времени радиоэкологами получены обширные данные о факторах, влияющих на интенсивность накопления радионуклидов растениями. Исследования закономерностей, связанных с миграцией радионуклидов в системе «почва – растение», начаты еще в 50-е годы прошлого века В.М. Ключевским, И.В. Гулякиным, Е.В. Юдинцевой, Р.М. Алексахиним, Ф.И. Павлоцкой и др. Однако применение обобщенных мировых данных о накоплении радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур для почвенно-климатических условий СИП некорректно, т.к. переход радионуклидов в сельскохозяйственные культуры значительно варьирует для различных почвенно-климатических зон, а также зависит от характера радиоактивного загрязнения территории и времени взаимодействия радионуклидов с почвой.

Территория СИП включает несколько почвенно-климатических зон с различным характером радиоактивного загрязнения, что несомненно оказывает влияние на поведение радионуклидов в почве и их поступление в растения. Ранее на территории СИП проведен ряд исследований, в результате которых установлены коэффициенты накопления (K_n) искусственных радионуклидов доминантными видами растений степных и луговых экосистем для участков с различным характером радиоактивного загрязнения [1]. Также в естественных природно-климатических условиях получены базовые K_n для продукции растениеводства, необходимые при оценке возможности передачи части СИП в хозяйственное пользование [2]. В обоих случаях значения K_n характеризуются высокой вариативностью как для разных видов растений, так и в пределах одного вида, что вероятно обусловлено неравномерным воздействием комплекса факторов. Таким образом, для получения репрезентативных параметров накопления радионуклидов растениями, возникла необходимость использования лабораторных модельных экспериментов с соблюдением максимально идентичных условий произрастания. Так, проведенные исследования в условиях модельного эксперимента, показали возможность получения репрезентативных значений параметров накопления техногенных радионуклидов на примере культуры *Lactuca sativa*, поскольку в данном случае исключалась неравномерность загрязнения почвы [3]. В данном исследовании по изучению влияния свойств почв на переход радионуклидов в системе «почва-растение» применение модельного эксперимента с гомогенизированными почвенными образцами оказалось удобным, так как исключается неравномерность загрязнения почвы в зоне корней в результате различного содержания радионуклидов по вертикальному почвенному профилю [4].

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Объекты исследования

В качестве экспериментального растения выбран перец (*Capsicum annuum*) - однолетняя овощная культура, которая активно возделывается на территории Восточно-Казахстанской области.

В качестве объектов исследования были выбраны пять почвенных образцов с локальных участков СИП контрастные по физико-химическим свойствам, а также имеющие различный характер радиоактивного загрязнения:

- луговые почвы с припортальных участков штолен №176 и 177 (площадка «Дегелен»), которые характеризуются высоким уровнем загрязнения вследствие выноса на земную поверхность радионуклидов с водотоками;
- почва с эпицентра наземного испытания - техническая площадка «П-2», характеризующаяся высоким содержанием трансурановым радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am ;
- почва с технической площадки «4а», отличающаяся от других участков СИП высоким содержанием ^{90}Sr (удельная активность радионуклида достигает нескольких миллионов Бк/кг) в результате проведения наземных испытаний радиологического оружия, снаряженного боевыми радиоактивными веществами (БРВ);
- почва с отвалов «Атомного озера», характеризующаяся уникальным радионуклидным составом, сформированным в результате экскавационного взрыва.

1.2. Методика проведения эксперимента

Миграционную способность радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ в системе почва-растение оценивали в модельном вегетационном опыте, проведенном в контролируемых условиях экспериментальной оранжереи Института радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК.

Заготовка почвенных образцов на всех площадках производилась на участках с наиболее высокими уровнями радиоактивного загрязнения. Отбор проб почвы проводился на глубину корнеобитаемого слоя – 0-25 см. С целью исключения неравномерности распределения радионуклидов, перед закладкой опыта, почвы тщательно гомогенизировались, затем просеивались через сито.

Почвенные образцы помещались в вегетационные сосуды объемом 12 л. Для чистоты эксперимента в каждом варианте заложено по 3 повторности. Посев *Capsicum annuum* в вегетационные сосуды производился сухими семенами. Полив экспериментальных растений проводился в утренние часы дистиллированной водой по предварительно рассчитанной норме, поддерживая оптимальную влажность почвы на уровне 60 % от полной влагоемкости [5]. Помещения оранжереи оснащены системой фитоосвещения и терморегулирования, которые позволили поддерживать благоприятные и сравнительно одинаковые для растений условия произрастания. В ходе эксперимента производился ежедневный контроль основных абиотических факторов посредством регистрирующих приборов. Удобрения не вносились, поскольку необходимо было получить параметры накопления радионуклидов без влияния данного фактора. Вегетационный период для *Capsicum annuum* составил 140 дней. В конце вегетационного периода произведен отбор растительных проб по органам: листья, стебли, плоды. Для учета биологической продуктивности рандомизированно отбиралось 15-20 растений для каждого варианта. Растительные образцы для определения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ отбирались как усредненные пробы со всех вегетационных сосудов одной повторности каждого варианта. В ходе работы было исследовано 46 проб растений и 5 проб почв.

1.3. Подготовка проб растений и почв для радионуклидного анализа

Растительные пробы промывались и ополаскивались 2-3 раза дистиллированной водой, затем сушились в сушильном шкафу при температуре 80-100 °С до постоянной массы, далее подвергались грубому измельчению до длины 1-3 см при помощи секатора. Более тонкое измельчение проводилось на лабораторной мельнице. Измельчённая проба обугливалась в муфельной печи при начальной температуре 200-250 °С, с постепенно повышающейся температурой до 350-400 °С. Обугленные пробы растений взвешивались и передавались на гамма-спектрометрическое измерение. Навеска для радиохимического анализа отбиралась из навески, прошедшей гамма-спектрометрическое измерение, затем проводилось дополнительное озоление при температуре 550 °С. Далее навески передавали на радиохимическое выделение с последующим бета- и альфа-спектрометрическим измерением.

Пробы почвы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре 60-70 °С. После удаления крупных камней и включений (корней растений) взвешивались на технических весах. Далее весь объем пробы тщательно перемешивался, порционно с помощью пестика истирался в фарфоровой ступке и просеивался через сито с диаметром отверстий 1 мм. Затем методом квартования отбирались необходимые навески почвы для определения удельной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$.

1.4. Измерение удельной активности ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$

Измерение удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений осуществляли в соответствии со стандартизированными методическими указаниями. Определение удельной активности гамма-излучающих радионуклидов проводилось с использованием гамма-спектрометра Canberra GX-2020 [3]. Радионуклид ^{90}Sr определяли радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB для растительных проб и на бета-спектрометре «Прогресс» для проб почвы. Радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$ – радиохимическим выделением с последующим измерением на альфа-спектрометре Canberra, мод.7401 [4]. Предел обнаружения для радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am составил – 0,5 Бк/кг (сухого вещества для проб растений и почвы), ^{90}Sr – 1-20 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,5 Бк/кг. Погрешность измерений для ^{137}Cs и ^{241}Am не превышала 15-20 %, ^{90}Sr – 15%, $^{239+240}\text{Pu}$ – 30%.

1.5. Методы обработки и анализа экспериментальных данных

Для оценки поступления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , и $^{239+240}\text{Pu}$ из почвы в растения использовали коэффициент накопления (K_n), который рассчитывали по формуле [5]:

$$K_n = \text{Ауд. раст. (Бк/кг)} / \text{Ауд. почвы (Бк/кг)} , \quad (1)$$

где Ауд. – удельные активности радионуклида в растении и почве соответственно (Бк/кг).

Анализ резко выделяющихся значений K_n и выбраковка недостоверных данных для каждой выборки осуществлялась с помощью вариационного критерия Диксона [6].

Критерий Диксона для наименьшего выброса рассчитывали по формуле:

$$K_d = x_2 - x_1 / x_n - x_1 \quad (2)$$

Критерий Диксона для наибольшего выброса рассчитывали по формуле:

$$K_d = x_n - x_{n-1} / x_n - x_1, \quad (3)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – значения K_n по мере возрастания в вариационном ряду.

С целью выделения наиболее значимых эдафических факторов, влияющих на интенсивность миграции радионуклидов в системе «почва- растение» и установления количественной связи между Кн ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ и физико-химическими свойствами почв проводилась обработка данных методами корреляционного, факторного и регрессионного анализов. Алгоритм анализа имеет следующий вид.

1. Составить матрицу, в которой необходимо классифицировать физико-химические показатели, которые являются входными независимыми переменными для почв СИП.

2. Построить корреляционную матрицу между независимыми переменными (физико-химические показатели почв) и зависимым признаком (Кн) ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr $^{239+240}\text{Pu}$ для культуры *Capsicum annuum*. Полученные значения парной корреляции (r) указывают на направление и степень сопряженности в изменчивости признаков, но не позволяют судить о том, как количественно меняется результивный признак при изменении факториального.

3. С помощью метода регрессионного анализа получить регрессионные уравнения, связывающие независимые и зависимые переменные. Коэффициенты регрессионного уравнения (b_i), связывающие при независимой переменной представляют собой коэффициенты пропорциональности, показывающие, в каком направлении и на какую величину изменяется накопление радионуклида в растениях в зависимости от изменения i -го свойства почвы.

4. Определить вклад каждой независимой переменной в варьирование общего признака. Для этого рассчитать произведения $r_i^2 \times b_i$ (r_i^2 - коэффициенты детерминации) и выбрать переменную с наименьшей величиной вклада агрохимического показателя $L = (r_i^2 \times b_i) \min$. Полученные значения всех остальных переменных нормировать на вышеуказанную величину. Для нее относительная значимость фактора $L_{\text{отн}} = 1$. Далее рассчитывается относительный вклад каждой независимой переменной в варьирование результивного признаков в процентах [7]:

$$\text{Вклад (\%)} = L_i / \sum L_i \times 100. \quad (4)$$

Обработка данных выполнялась в программе STATISTICA.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Изменение абиотических и биотических факторов в ходе модельного эксперимента

Одновременное действие большого числа взаимосвязанных и независимых факторов, как на эдафическом, так и на биологическом уровнях, оказывает влияние на поглощение радионуклидов. Это может проявляться как в виде варибельности значений K_n радионуклидов для различных видов растений, а также для разных почвенно-климатических условий. Исходя из этого необходимо поддерживать на относительно одинаковом уровне воздействие основных абиотических факторов, с целью исключения их возможного влияния на процесс накопления. Изменение среднесуточных показателей температуры и влажности воздуха в помещении оранжереи на момент проведения эксперимента показано на рисунке 1.

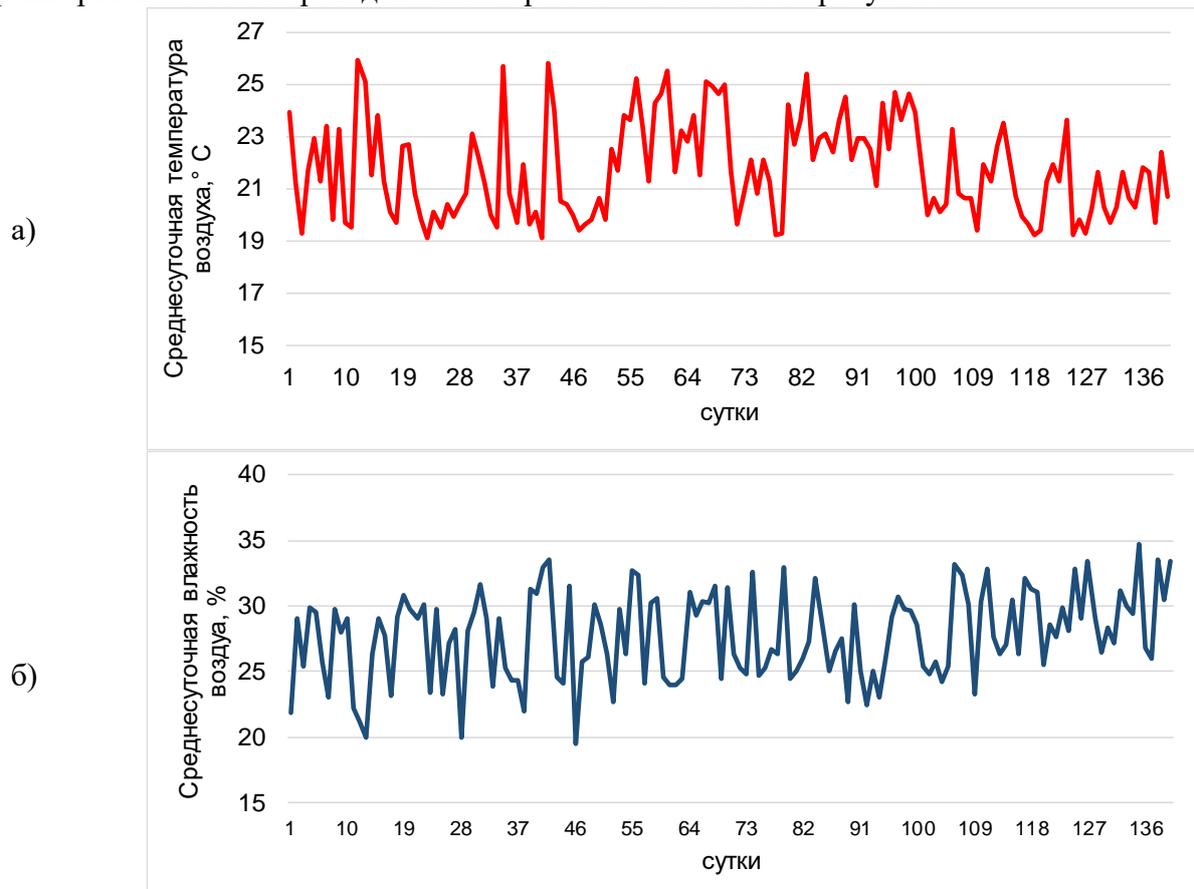


Рисунок 1. Температурный (а) и влажностный (б) режим в период проведения эксперимента

Из рисунка 1 видно, что основные абиотические факторы во время проведения эксперимента поддерживали на относительно одинаковом уровне, что исключало их возможное влияние на процесс накопления радионуклидов растениями. Так, диапазон варьирования температуры воздуха в помещении оранжереи составил 7°C , влажности воздуха – 11 %.

Показатель K_n является функцией как различных свойств почв (кислотности, дисперсности, содержания гумуса, наличия в доступных растениям формах микро- и макроколичеств изотопных и неизотопных носителей и т.д.), так индивидуальных особенностей и физиологического состояния растений. Таким образом, необходимо учитывать влияние всех факторов, определяющих биологическую продуктивность и, тем самым, опосредовано накопление радионуклидов растением [10]. Средние значения биологической продуктивности экспериментальных растений представлено на рисунке 2.

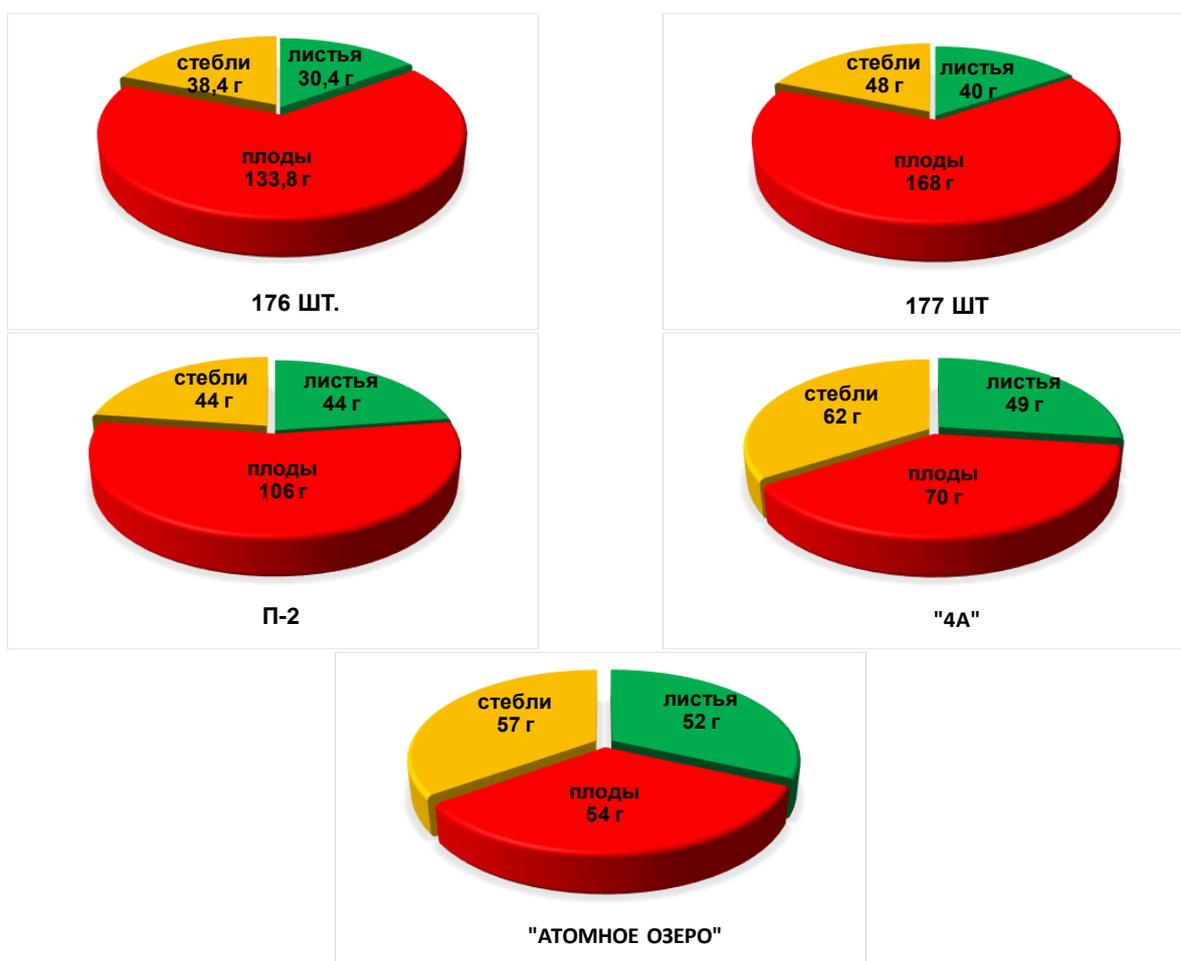


Рисунок 2. Биологическая продуктивность *Capsicum annuum*

Согласно полученным данным, максимальная биологическая продуктивность *Capsicum annuum* отмечена на луговых почвах штолен, что обусловлено их высоким плодородием, а минимальная – на почве с отвалов «Атомного озера», что, возможно, обусловлено повышенным содержанием солей. Таким образом, биологическая продуктивность растений на экспериментальных почвах изменялась в следующем убывающем ряду:

шт.№177 > *шт.№176* > *пл. П-2* > «Атомного озера» > *пл. «4а»*

2.2. Физико-химические показатели исследуемых почвенных образцов

Физико-химические свойства почвенных образцов, использованных в модельном эксперименте, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Химический и механический состав почвенных образцов

Почвенные характеристики	Участок СИП				
	Шт. № 176	Шт. № 177	П-2	«4а»	«Атомное озеро»
Концентрация орг. вещества, %	23	39	8,8	3,2	9,6
pH водной суспензии	6,88	6,73	6,85	6,91	7,74
Сумма солей	0,79	3,25	0,73	2,67	0,73
Поглощенные Ca^{2+} и Mg^{2+} , ммоль/100 г почвы	7,75	20,5	5,75	4,0	12,75
Физ. глина (<0,01 мм)	20,06	27,18	16,33	25,18	20,61
Содержание элементов, мг/кг					
Sr	15 ± 2	27 ± 3	30 ± 4	25 ± 3	64 ± 8
Валовое содержание К	2100 ± 250	2700 ± 320	2900 ± 340	1800 ± 220	2500 ± 300
Валовое содержание Са	2300 ± 280	3800 ± 450	2400 ± 290	2000 ± 230	4700 ± 560
Валовое содержание магния Mg	1600 ± 180	1960 ± 230	2100 ± 250	1400 ± 170	4600 ± 550
Содержание доступных форм ^{137}Cs , %	5,8	1,2	0,1	3,3	0,2
Содержание доступных форм ^{90}Sr , Бк/кг, %	48	42	1,6	60	31
Содержание доступных форм ^{241}Am , Бк/кг / %	7,3	0,7	0,05	6,1	0,3
Содержание доступных форм $^{239+240}\text{Pu}$, Бк/кг / %	6	44	0,05	14	65

Почвенные образцы с участков штолен № 176 и 177 достаточно гумусированы (23 и 39 % соответственно), тогда как содержание гумуса в остальных почвенных образцах значительно ниже. По механическому составу все почвенные образцы являются легкосуглинистыми (содержание физической глины находится в пределах 20,06 – 27,18 %), за исключением почвенных образцов площадки П-2, которые относятся к супесчаному виду почв (содержание глины составляет 16,33 %). По реакции почвенного раствора исследуемые образцы слабокислые с pH от 6,73 до 6,91, за исключением почвенных образцов «Атомного озера» (pH составляет 7,74 - слабощелочная). Среди поглощенных оснований наблюдается абсолютное преобладание Ca^{2+} над Mg^{2+} , сумма легкорастворимых солей менее 0,1 %, что позволяет их отнести к незасоленным.

Содержание биологически доступных форм всех радионуклидов в исследуемых почвенных образцах различно. Наибольшая биологическая устойчивость радионуклида ^{137}Cs отмечена в почвах с площадки «Опытное поле», где содержание доступных форм составляет лишь 0,1 %, максимальное содержание доступных форм ^{137}Cs характерно для почвенных образцов штольни № 176 - 5,8 %.

Значения содержания доступных форм радионуклида ^{90}Sr в луговых почвах штолен 176 и 177 принципиально не отличается (48 и 42 % соответственно). Минимальное содержание доступных форм радионуклида ^{90}Sr отмечено в почвенных образцах площадки П-2 - 1,6 %, максимальные характерны для образцов с площадки «4а» - 60 %.

В почвенных образцах с площадки «П-2» радионуклид ^{241}Am характеризуется наименьшей биологической доступностью, содержание доступных форм составляет лишь 0,05 %. Максимальное содержание доступных форм радионуклида ^{241}Am отмечено в

луговых почвенных образцах штольни № 176, где содержание доступных форм достигает 7,3 %.

Минимальное содержание доступных форм $^{239+240}\text{Pu}$ отмечается в почвах площадки «П-2», максимальное в почвенных образцах «Атомного озера». Содержание доступных форм $^{239+240}\text{Pu}$ в почвенных образцах штолен 176 и 177 значительно отличается (в почвах района штольни № 177 содержание доступных форм достигает 44 %, а 176 штольни – 6 %).

2.3. Накопление техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ культурой *Capsicum annuum* на почвах с различным характером радиоактивного загрязнения

Во всех растительных и почвенных пробах определена удельная активность техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ (Таблица 2).

Таблица 2. Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в органах *Capsicum annuum* и модельных почвенных образцах

Вариант эксперимента	Тип пробы		Удельная активность, Бк/кг			
			^{137}Cs	^{241}Am	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$
шт.176	плоды	I	170 ± 30	< 0,4	16000 ± 2000	< 0,10
		II	250 ± 50	< 0,5	1500 ± 200	< 0,08
		III	350 ± 70	< 0,5	5400 ± 800	< 0,18
		IV	260 ± 50	< 0,5	5500 ± 800	< 0,10
		V	310 ± 60	< 0,5	5500 ± 800	< 0,11
	листья	I	510 ± 100	< 1,9	99000 ± 15000	< 0,28
		II	500 ± 100	< 1,7	96000 ± 14000	< 0,30
		III	630 ± 130	< 1,7	100000 ± 20000	< 0,25
	стебли	I	140 ± 28	< 0,8	15000 ± 2000	< 0,03
		II	130 ± 26	< 0,7	41000 ± 6000	< 0,06
		III	170 ± 35	< 0,8	48000 ± 7000	< 0,05
	почва		8100 ± 1600	43 ± 9	7800 ± 1100	700 ± 30
	шт.177	плоды	I	32 ± 6	< 0,29	280 ± 40
II			21 ± 4	< 0,29	300 ± 40	< 0,12
III			19 ± 4	< 0,28	230 ± 30	< 0,08
IV			43 ± 9	< 0,8	440 ± 70	< 0,9
V			36 ± 7	< 0,3	380 ± 60	< 0,7
листья		I	60 ± 12	< 0,5	3900 ± 600	< 0,3
		II	80 ± 16	< 0,7	4600 ± 700	< 0,3
		III	51 ± 10	< 0,4	4000 ± 600	< 0,4
стебли		I	18 ± 4	< 0,24	2800 ± 400	< 0,14
		II	20 ± 4	< 0,27	2800 ± 400	< 0,12
		III	29 ± 6	< 0,3	2700 ± 400	< 0,17
почва			3000 ± 600	720 ± 140	75000 ± 8000	20000 ± 1000
П-2		плоды	I	< 0,7	0,9 ± 0,2	83 ± 12
	II		< 0,7	0,7 ± 0,2	82 ± 12	< 0,12
	III		< 1,2	1,9 ± 0,4	84 ± 12	< 0,80
	IV		< 0,6	2,1 ± 0,4	35 ± 5	< 0,50
	листья	I	< 0,7	14 ± 3	470 ± 70	< 1,7
		II	< 0,6	7,9 ± 1,6	360 ± 50	< 2,3
		III	1,1 ± 0,2	31 ± 6	410 ± 60	4,1 ± 1,6
	стебли	I	< 0,6	2,0 ± 0,4	370 ± 60	< 1,1
		II	< 0,6	1,1 ± 0,2	290 ± 40	< 0,29
		III	< 1,1	< 1,1	260 ± 40	< 0,21
	почва		2600 ± 500	10000 ± 2000	3600 ± 600	16000 ± 1000
«Атомное озеро»	плоды	I	140 ± 30	< 0,5	610 ± 90	< 0,1
		II	190 ± 40	< 0,5	790 ± 120	< 0,17
	листья	I	190 ± 40	< 0,9	16000 ± 2000	< 0,21

Вариант эксперимента	Тип пробы	Удельная активность, Бк/кг				
		¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	
		II	280 ± 60	< 0,7	15000 ± 2000	< 0,20
III	290 ± 60	< 0,7	13000 ± 2000	< 0,64		
стебли	I	94 ± 20	< 0,4	9700 ± 1400	< 0,1	
	II	84 ± 17	< 0,6	8100 ± 1200	< 0,1	
	III	96 ± 20	< 0,7	9600 ± 1400	< 0,14	
почва		15000 ± 3000	1300 ± 200	12000 ± 2000	8000 ± 1000	
«4а»	плоды	I	56 ± 12	< 5	96000 ± 14000	< 1,4
		II	40 ± 8	< 4	94000 ± 14000	< 0,85
	листья	I	46 ± 20	< 17	630000 ± 100000	6,8 ± 1,3
		II	91 ± 30	< 27	710000 ± 110000	6,4 ± 1,7
	стебли	I	< 40	< 17	740000 ± 110000	3,5 ± 0,9
		II	< 30	< 16	670000 ± 100000	2,9 ± 0,6
	почва		16000 ± 3000	220 ± 40	550000 ± 60000	5600 ± 1000

Полученные результаты показывают, что содержание исследуемых радионуклидов, как в почве, так и в экспериментальных растениях находится на различном уровне.

На основании значений удельной активности радионуклидов в экспериментальных растениях и почвенных модельных образцах рассчитаны Кн (Таблица 3).

Таблица 3. Вариационно-статистические показатели Кн ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в органах *Capsicum annuum*

Вариант эксперимента	Статистические показатели Кн					
	тип пробы	n	min-max	GM	AM	SD
	¹³⁷ Cs					
шт. № 176	плоды	5	0,021 – 0,043	0,032	0,033	0,007
	листья	3	0,062 – 0,078	0,067	0,068	0,007
	стебли	3	0,016 – 0,021	0,018	0,018	0,002
шт. № 177	плоды	5	0,006 – 0,014	0,009	0,010	0,003
	листья	3	0,017 – 0,027	0,021	0,021	0,004
	стебли	3	0,006 – 0,0097	0,007	0,007	0,002
П-2	листья	1	0,0004	-	-	-
«Атомное озеро»	плоды	2	0,009 – 0,013	0,01	0,011	0,002
	листья	3	0,013 – 0,019	0,018	0,017	0,003
	стебли	3	0,006 – 0,0064	0,0062	0,0062	0,0002
«4а»	плоды	2	0,0025 – 0,0035	0,003	0,003	0,0005
	листья	2	0,003 – 0,006	0,004	0,0045	0,0015
⁹⁰ Sr						
шт. № 176	плоды	3	0,690 – 0,705	0,70	0,70	0,0063
	листья	3	12,3 – 12,8	12,6	12,6	0,22
	стебли	3	1,92 – 8,54	4,65	5,54	2,74
шт. № 177	плоды	5	0,0031 – 0,0060	0,004	0,0044	0,001
	листья	3	0,052 – 0,061	0,055	0,055	0,024
	стебли	3	0,036 – 0,037	0,037	0,037	0,016
«Опытное поле»	плоды	3	0,023	0,023	0,023	-
	листья	3	0,1 – 0,13	0,11	0,11	0,012
	стебли	3	0,072 – 0,102	0,084	0,085	0,013
«Атомное озеро»	плоды	2	0,051 – 0,066	0,058	0,058	0,0075
	листья	3	1,10 – 1,33	1,22	1,22	0,10
	стебли	3	0,67 – 0,81	0,76	0,76	0,06
«4а»	плоды	2	0,17	0,17	0,17	-
	листья	2	1,14 – 1,29	1,21	1,22	0,075
	стебли	2	1,22 – 1,34	1,28	1,28	0,06
²⁴¹ Am						
	плоды	4	0,00007 – 0,00021	0,00012	0,00014	0,00006

Вариант эксперимента	Статистические показатели Кн					
	тип пробы	n	min-max	GM	AM	SD
«Опытное поле»	листья	3	0,0008 – 0,0031	0,0015	0,0018	0,001
	стебли	2	0,00011 – 0,0002	0,00015	0,00015	0,00005
$^{239+240}\text{Pu}$						
«Опытное поле»	листья	1	0,00026	-	-	-
«4а»	листья	2	0,0011 – 0,0012	0,0011	0,0011	0,00005
	стебли	2	0,0005 – 0,0006	0,0005	0,0005	0,00005
n – число случаев, GM – ср.геом., AM – ср.ариф., SD – станд.откл.						

В целом, вариационно-статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ в органах *Capsicum annuum*, полученные в условиях модельного эксперимента, можно считать статистически достоверными по сравнению с результатами натуральных исследований, диапазон варьирования для которых составлял по ^{137}Cs и ^{241}Am – 2 порядка и ^{90}Sr – 4 порядка, $^{239+240}\text{Pu}$ – 3 порядка [2].

Так как для радионуклида ^{241}Am удалось получить количественные значения лишь в *Capsicum annuum* выращенном на площадке П-2, а для $^{239+240}\text{Pu}$ на почвенных образцах «Атомного озера», дальнейшее применение статистических методов анализа для оценки влияния эдафических факторов на миграцию данных радионуклидов в системе «почва-растение» оказалось невозможным.

Как видно из таблицы 3, радионуклиды, поступая в растения, неравномерно накапливаются в органах, поэтому степень загрязнения различных частей урожая отличается. Исходя из этого, производить расчеты по оценке влияния почвенных факторов, используя значения Кн в отдельных органах, некорректно. Для корректной оценки вклада эдафических факторов на процесс накопления радионуклидов *Capsicum annuum* произведен перерасчет значений Кн для всей надземной фитомассы растений с учетом средней массовой доли и коэффициента усушки для каждого органа (таблица 4).

Таблица 4. Перерасчет значений Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr для надземной части *Capsicum annuum*

Вариант эксперимента	Тип пробы	Удельная активность, Бк/кг (ср.знач.)	Средняя масса, г	Коэффициент усушки (ср.знач.)	Кн
шт. № 176	плоды	268	133,8	0,066	0,034
	листья	547	30,4	0,12	
	стебли	147	38,4	0,19	
шт. № 177	плоды	30	168	0,060	0,011
	листья	64	40	0,14	
	стебли	22	48	0,20	
П-2	плоды	< 0,7	106	0,063	0,0003
	листья	1,1	44	0,12	
	стебли	< 0,6	44	0,18	
«Атомное озеро»	плоды	165	54	0,066	0,01
	листья	253	52	0,10	
	стебли	91	57	0,15	
«4а»	плоды	48	70	0,056	0,003
	листья	69	49	0,13	
	стебли	< 35	62	0,21	
^{90}Sr					
шт. № 176	плоды	5467	133,8	0,066	4,3
	листья	98333	30,4	0,12	
	стебли	34667	38,4	0,19	
шт. № 177	плоды	326	168	0,060	0,028

Вариант эксперимента	Тип пробы	Удельная активность, Бк/кг (ср.знач.)	Средняя масса, г	Коэффициент усушки (ср.знач.)	Кн
	листья	4167	40	0,14	
	стебли	2767	48	0,20	
	плоды	83	106	0,063	
П-2	листья	413	44	0,12	0,072
	стебли	307	44	0,18	
	плоды	700	54	0,066	
«Атомное озеро»	листья	14667	52	0,10	0,75
	стебли	9133	57	0,15	
	плоды	95000	70	0,056	
«4а»	листья	670000	49	0,13	1,08
	стебли	705000	62	0,21	
	плоды	95000	70	0,056	

Из таблицы 4 видно, что диапазон значений Кн ¹³⁷Cs для всех почвенных образцов составляет 2 порядка (0,0003 - 0,01), ⁹⁰Sr – 3 порядка (0,028 - 4,3). Различия в значениях Кн радионуклидов для вариантов почвенных образцов могут быть обусловлены как характером радиоактивного загрязнения, так и их физико-химическими свойствами, определяющими миграцию радиоизотопов в системе «почва-растение».

2.4. Оценка влияния эдафических факторов на миграцию ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в системе «почва-растение»

2.4.1. Статистическая обработка данных методом множественного корреляционного анализа

На первом этапе обработки данных для установления связи между Кн ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr и почвенными характеристиками применялся метод множественного корреляционного анализа. Следует обратить внимание на то, что использование в качестве меры линейной зависимости только парных коэффициентов корреляции может приводить к неверным выводам. Так как парный коэффициент корреляции может не учитывать наличие и косвенное влияние третьего признака. Если влияние этого признака очень существенно, то оно будет приводить к появлению значимых парных коэффициентов корреляции даже для тех пар признаков, между которыми линейной связи нет. Конечной целью корреляционного анализа является отбор факторных признаков для дальнейшего построения уравнения регрессии.

Важным фактором, определяющим закрепление, распределение и трансформацию ИРН в компонентах почв и соответственно их переход в системе «почва-растение», является исходная физико-химическая форма, в которой радионуклид инжестирован в биосферу [8]. Поэтому, в первую очередь необходимо учитывать содержание доступных форм радионуклидов. Была построена корреляционная матрица между независимыми переменными (содержание доступных форм радионуклидов и физико-химические показатели почв) и зависимым признаком (Кн ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr) для культуры *Capsicum annuum* (таблица 5, 6).

Таблица 5. Корреляционная матрица между Кн ¹³⁷Cs для культуры *Capsicum annuum* и физико-химическими показателями исследуемых почвенных образцов

параметр / параметр	Кн ¹³⁷ Cs	Содержание доступ. форм, %	рН водной суспензии	∑ солей, ммоль/100 г	∑Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль/100 г	Содержание гумуса, %	Содержание частиц < 0,001	Валовый Cs, мг/кг	Валовый K, мг/кг
Кн ¹³⁷ Cs	1								
Содержание доступ. форм, %	0,76	1							

параметр параметр	Кн ¹³⁷ Cs	Содержан ие доступ. форм, %	pH водной суспензи и	∑ солей, ммоль/1 00 г	∑Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль/1 00 г	Содержан ие гумуса, %	Содержан ие частиц < 0,001	Валов ый Cs, мг/кг	Валов ый K, мг/кг
pH водной суспензии	-0,06	-0,35	1						
∑ солей, ммоль/10 0 г	-0,05	-0,49	0,32	1					
∑Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль/10 0 г	0,11	-0,34	0,06	0,95	1				
Содержан ие гумуса, %	0,45	0,12	-0,41	0,60	0,82	1			
Содержан ие частиц < 0,001	-0,07	0,08	-0,01	0,54	0,48	0,31	1		
Валовый K, мг/кг	-0,32	-0,76	0,01	0,42	0,47	0,32	-0,42	0,35	1

Таблица 6. Корреляционная матрица между Кн ⁹⁰Sr для культуры *Capsicum annuum* и физико-химическими показателями исследуемых почвенных образцов

параметр параметр	Кн ⁹⁰ Sr	Содержан ие доступ. форм, %	pH водной суспензи и	∑ солей, ммоль/100 г	∑Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль/100 г	Содержан ие гумуса, %	Содержан ие частиц < 0,001мм,%	Валовы й Sr, мг/кг	Валовы й Ca, мг/кг
Кн ⁹⁰ Sr	1								
Содержани е доступ. форм, %	0,44	1							
pH водной суспензии	-0,07	-0,10	1						
∑ солей, ммоль/100 г	-0,44	0,03	0,32	1					
∑Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль/100 г	-0,32	0,04	0,06	0,95	1				
Содержани е гумуса, %	0,07	0,15	-0,41	0,60	0,82	1			
Содержани е частиц < 0,001	-0,19	0,77	-0,007	0,54	0,48	0,31	1		
Валовый Ca, мг/кг	-0,38	-0,15	0,69	0,89	0,75	0,29	0,28	0,81	1

Высокая корреляционная зависимость отмечена только между Кн ¹³⁷Cs и содержанием его доступных форм. Так как в матрице есть межфакторный коэффициент корреляции ($r > 0,7$), то в данной модели множественной регрессии существует мультиколлинеарность - линейная взаимосвязь двух или нескольких объясняющих переменных, которая может проявляться в функциональной (явной) или стохастической (скрытой) форме.

Сложность решения задачи по вычленению влияния отдельных факторов на поступление радионуклидов в растения обусловлена тем, что большинство изучаемых свойств почв тесно

связано между собой и зачастую степень воздействия отдельного из них зависит от влияния всего комплекса. Поэтому для установления зависимости между почвенными факторами и Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr для культуры *Capsicum annuum* применялся более гибкий метод – факторный анализ. Основная цель этого метода – обнаружить скрытые общие факторы, объясняющие связи между наблюдаемыми признаками.

Поскольку все определенные физико-химические показатели почв измерялись в разных единицах, они были подвергнуты процедуре нормализации, то есть линейному преобразованию всех значений признаков таким образом, чтобы значения признаков попадали в сопоставимые по величине интервалы (таблица 7):

$$\bar{X}_i = \frac{X_i - X}{\sigma}$$

где X_i – переменная, $X_{\text{ср}}$ – среднее значение, σ – среднеквадратичное отклонение.

Таблица 7. Значения новых переменных, подвергнутых процедуре нормализации

Почвенные характеристики	Участок СИП				
	Шт. № 176	Шт. № 177	П-2	«Атомное озеро»	«4а»
Гумус	0,49	1,73	-0,61	-0,56	-1,05
рН водной суспензии	-0,38	-0,8	-0,47	2	-0,31
Сумма солей	-0,76	1,47	-0,81	-0,82	0,95
Поглощенные $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	-0,4	1,72	-0,74	0,44	-1,03
Физ. глина (<0,01 мм)	-0,47	1,39	-1,45	-0,33	0,87
Валовый К	-0,75	0,75	1,25	0,25	-1,5
Валовый Са	-0,71	0,73	-0,62	1,6	-1
Валовый Mg	-0,63	-0,32	-0,2	1,95	-0,8
Содержание доступных форм ^{137}Cs	1,69	-0,42	-0,93	-0,88	0,54
Содержание доступных форм ^{90}Sr	0,58	0,28	-1,76	-0,28	1,18

Для выделения факторов использовался метод главных компонент, который позволяет перевести большое количество связанных между собой (зависимых коррелирующих) переменных в меньшее количество независимых переменных.

Было извлечено по 3 фактора с собственными значениями больше единицы (таблица 8). Вращение факторов осуществляли методом «ВАРИМАКС». Вращение позволяет сделать матрицу факторных нагрузок более контрастной, за счет увеличения нагрузок по одним признакам и уменьшению по другим, что способствует более отчетливому выявлению групп признаков, определяющих тот или иной фактор.

Таблица 8. Результаты факторного анализа для выборок включающих Кн ^{137}Cs .

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Гумус	-0,531663	-0,397333	0,744518
рН водной суспензии	0,724320	0,498777	-0,038571
Сумма солей	-0,939204	0,252169	0,226373
Поглощенные $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	-0,409509	0,177216	0,863260
Физ. глина (<0,01 мм)	-0,901419	0,216943	0,240957
Валовый К	0,009645	0,362438	0,884790
Содержание доступных форм ^{137}Cs	0,009107	-0,870342	-0,482579

Собственные значения	4,00	2,24	1,24
% от общей дисперсии	50,05	28,01	15,53

Таблица 9. Результаты факторного анализа для выборок включающих Кн ⁹⁰Sr

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Гумус	0,919443	-0,169584	0,048993
pH водной суспензии	-0,390517	0,093009	-0,871133
Сумма солей	0,818193	0,382287	0,324253
Поглощенные Ca ²⁺ + Mg ²⁺	0,887921	0,253081	-0,339039
Физ. глина (<0,01 мм)	0,882092	0,172318	0,089266
Валовый Са	0,411506	0,380419	-0,828120
Содержание доступных форм ⁹⁰ Sr	-0,008284	-0,929701	0,316221
Собственные значения	3,92	2,42	1,1
% от общей дисперсии	49	30	13

Из таблицы 8 видно, что первый фактор, являющийся искусственным статистическим показателем, возникшем в результате преобразования корреляционной матрицы сильно коррелирует с содержанием физической глины, суммой солей, pH водной суспензии. Первый фактор можно интерпретировать как группу почвенных показателей, снижающих поглотительную способность почв по отношению к ¹³⁷Cs. Второй фактор сильно коррелирует с содержанием доступных форм ¹³⁷Cs. Третий фактор коррелирует с показателями, определяющими поглотительную способность почв: содержанием органического вещества, содержанием поглощенных Ca²⁺+ Mg²⁺ и валовым содержанием К.

Для ⁹⁰Sr было выделено также 3 фактора (таблица 9). Первый коррелирует между содержанием органического вещества, суммой солей, поглощенными Ca²⁺+ Mg²⁺ и физической глиной. Второй фактор связан с содержанием доступных форм. Третий фактор с содержанием Валовый Са и актуальной кислотностью.

Факторы, полученные в результате вращения по методу ВАРИМАКС, объясняют 94 % и 90 % общей дисперсии, указывающей в каких границах находятся значения параметров, которые характеризуют фактор.

В окончательную регрессионную модель были включены независимые переменные, имеющие статистически значимый вклад в варьирование Кн ¹³⁷Cs и Кн ⁹⁰Sr.

2.5.2. Статистическая обработка данных методом регрессионного анализа

В результате факторного анализа выделены наиболее значимые факторы, влияющие на переход ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в системе «почва-растение». Так, для ¹³⁷Cs наиболее важными характеристиками оказались следующие: содержание доступных форм ¹³⁷Cs, валовое содержание К, содержание органического вещества. Полученные результаты вполне соответствуют сложившимся представлениям о влиянии данных факторов на переход ¹³⁷Cs в системе «почва-растение». Для ⁹⁰Sr наиболее важными характеристиками оказались такие показатели, как сумма солей, содержание доступных форм ⁹⁰Sr, валовое содержание Са.

Содержание доступных форм радионуклидов. Переход радионуклидов из почвы в растения является результатом физиологического процесса, связанного с поглощением радионуклидов корневой системой из почвенного раствора, доступными для корневой системы растений являются водорастворимая и обменная формы радионуклидов. Чем выше содержание доступных форм радионуклидов в почве - тем выше миграция [13].

Валовое содержание изотопных и неизотопных носителей. В системе «почва-растение» в процессах сорбции-десорбции в почвах и особенно корневого поглощения присутствует прямая конкуренция между ¹³⁷Cs и их химическими аналогами, в частности с валовым содержанием К [8,12].

Влияние поглощительной способности почв. Известно, что носителем поглощительной способности почв является минеральная часть и органическое вещество. Почвы с большим содержанием органического вещества, как правило обладают высокой сорбционной способностью к радионуклидам. С добавлением в почву органического вещества повышается прочность закрепления радионуклидов [8, 12].

Для описания зависимости параметров перехода искусственных радионуклидов в системе «почва-растение» от перечисленных выше показателей разработаны линейные регрессионные модели (множественная регрессия), имеющая вид [14]:

$$TF = a + \sum b_i x_i$$

где: TF – коэффициент накопления, x_i – факторы, влияющие на переход радионуклидов (нормированные показатели почв), а и b_i – параметры модели.

Коэффициенты регрессионного уравнения (b_i) при независимой переменной представляют собой коэффициенты пропорциональности, показывающие в каком направлении и на какую величину изменится накопление радионуклида в растении в зависимости от изменения i -го свойства почвы.

Параметры регрессионных уравнений, отражающих зависимости между коэффициентами накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr *Capsicum annuum* и факторами, влияющими на интенсивность их перехода представлены в таблице 10 и 11.

Таблица 10. Параметры регрессионных уравнений, отражающих зависимости между коэффициентами накопления ^{137}Cs *Capsicum annuum* и факторами, влияющими на интенсивность их перехода

Значения коэффициентов регрессионного уравнения для $\text{Kн}^{137}\text{Cs}$				
N=16	а	Содержание доступ. форм	Содержание валового К	Содержание гумуса
	0,014	0,015	0,010	-0,001
<i>Станд. ошибка</i>	0,0017	0,0029	0,004	0,002
<i>Коэфф. β</i>	-	1,35	0,72	-0,10
<i>t-критерий</i>	8,04	5,16	2,39	-0,53
<i>p-уровень</i>	0,000004	0,0002	0,034	0,61
$R = 0,90$; $R^2 = 0,80$; $F = 16,30$; $p < 0,00016$; <i>Станд. ошибка оценки: 0,006</i>				

Из таблицы 10 видно, что наибольший вклад в процесс накопления ^{137}Cs культурой *Capsicum annuum* вносит содержание доступных форм ^{137}Cs (коэфф. $\beta = 1,35$), следующий по значению признак - валовое содержание К (коэфф. $\beta = 0,72$). Для значения содержания гумуса уровень значимости для проверки гипотезы о равенстве коэффициента нулю больше значения (0,05), соответственно нулевая гипотеза принимается. Параметр модели для содержания органического вещества неотличим от нуля. Вклад органического вещества в данном случае тоже равен нулю. Уравнение множественной регрессии для описания зависимости $\text{Kн}^{137}\text{Cs}$ в системе «почва-растение» имеет следующий вид:

$$\text{Kн}^{137}\text{Cs} = 0,014 + 0,015 \times \text{Содержание доступ. форм}^{137}\text{Cs} + 0,010 \times \text{Содержание валового К}$$

Исходя из уравнения возникает противоречие о влиянии валового К на процесс накопления ^{137}Cs *Capsicum annuum*, так как внесение в почву калийных удобрений используется для снижения перехода ^{137}Cs в растения, но при этом увеличение концентрации K^+ в почве может вызывать уменьшение сорбции радионуклида твердой фазой почв и соответственно вызывает увеличение накопления ^{137}Cs растениями, что скорее всего происходит в данном случае.

Таблица 11. Параметры регрессионных уравнений, отражающих зависимости между коэффициентами накопления ^{90}Sr *Capsicum annuum* и факторами, влияющими на интенсивность их перехода

Значения коэффициентов регрессионного уравнения для $\text{Кн } ^{90}\text{Sr}$				
N=18	a	Содержание доступ. форм ^{90}Sr	Валовое содержание Са	Содержание солей
		1,47	1,51	-0,51
Станд.ошибка	0,17	0,22	0,19	0,19
Коэфф. β	-	0,75	-0,27	-0,76
t-критерий	8,42	6,83	-2,63	-6,80
p-уровень	0,000001	0,000008	0,02	0,000009
$R= 0,93$; $R^2= 0,86$; $F=30,13$; $p<0,00000$; Станд. ошибка оценки: 0,74				

Как видно из таблицы 11, наибольший вклад в процесс накопления ^{90}Sr , так же, как и для ^{137}Cs вносит содержание доступных форм ^{90}Sr (коэфф. $\beta = 0,75$). Следующий по значению признак - валовое содержание Са (коэфф. $\beta=-0,27$), затем содержание солей (коэфф. $\beta=-0,76$).

Уравнение множественной регрессии для описания зависимости $\text{Кн } ^{90}\text{Sr}$ в системе «почва-растение» имеет следующий вид:

$$\text{Кн } ^{90}\text{Sr} = 1,47 + 1,51 \times (\text{Содержание доступ. форм } ^{90}\text{Sr}) - 0,51 \times (\text{Валовое содержание Са}) - 1,31 \times (\text{Содержание солей})$$

Коэффициент детерминации, который показывает долю вариации значений $\text{Кн } ^{137}\text{Cs}$ и $\text{Кн } ^{90}\text{Sr}$, в обоих случаях имеет довольно высокие значения 0,80 и 0,86 соответственно. Таким образом, в 80 % случаев изменение содержания доступных форм и К приводят к изменению значений $\text{Кн } ^{137}\text{Cs}$ (точность подбора уравнения регрессии – «высокая») Остальные 20 % изменения $\text{Кн } ^{137}\text{Cs}$ объясняются факторами, не учтенными в модели. Для $\text{Кн } ^{90}\text{Sr}$ точность подбора уравнения составляет 86 %.

ВЫВОДЫ:

1. В результате проведенного модельного вегетационного эксперимента получены достоверные значения Кн техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ культурой *Capsicum annuum* для почв СИП, различающихся по типу и характеру радиоактивного загрязнения.
2. Проведен корреляционный и факторный анализ экспериментальных данных. Установлены наиболее значимые факторы, влияющие на интенсивность миграции радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr в системе «почва- растение: для Кн ^{137}Cs - содержание доступных форм ^{137}Cs и валовое содержание К; для Кн ^{90}Sr - содержание доступных форм ^{90}Sr , валовое содержание Са, содержание солей.
3. Разработаны регрессионные модели для установления количественной связи между Кн ^{137}Cs и Кн ^{90}Sr с выделенными факторами, описывающие зависимость накопления радионуклидов на примере культуры *Capsicum annuum*. Коэффициенты детерминации, описывающие качество регрессионных моделей, имеют высокие значения: 0,80 - для Кн ^{137}Cs ; 0,86 - для Кн ^{90}Sr .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Larionova N.V., Lukashenko S. N., Kabdyrakova A. M., Kunduzbayeva A. Y., Panitskiy A.V., Ivanova A. R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. - № 186. – P. 163-170.
2. Kozhakhhanov T. E., Lukashenko S. N., Larionova N. V. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2014. – Vol. 137. – P. 217-226.
3. Пономарева, Т.С. Накопление радионуклидов культурой *Lactuca Sativa* на почвах с различным характером радиоактивного загрязнения в условиях модельного эксперимента / Т.С. Пономарева, Е.Н. Поливкина, Н.В. Ларионова // *Вестник НЯЦ РК: периодический научно-технический журнал*. - Курчатов, 2020. - Вып. 1. – С.75-81.
4. Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Особенности вертикального распределения радионуклидов в почвах бывшего Семипалатинского испытательного полигона // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №10. – С 2231-2236.
5. Методы исследований в агрохимии: краткий курс лекций для аспирантов направления подготовки / сост.: Е.А. Нарушева // *Сельское хозяйство*. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2014. - С. 16-23.
6. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре МИ 2143-91: МИ 5.06.001.98 РК. – Алматы, 1998. – 18 с.
7. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239-240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях). - Алматы, 2010. – 25 с.
8. Сельскохозяйственная радиоэкология / под. ред. Академика ВАСХНИЛ Р.М. Алексахина и академика ВАСХНИЛ Н.А.Корнеева. – М.: 1991. С. 54-55, 49-52, 56-66.
9. Заляжных, В.В. Статистические расчёты при планировании и обработке результатов испытаний: учебное пособие. – Архангельск: ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», 2014. – С. 30-35.
10. Кочетков И.В. Влияние физико-химических свойств почв на биологическую доступность ⁶⁰Со / Кочетков И.В., Анисимов В.С., Крикунов И.А., Еремин М.В. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011. С 53-54.
11. Мамихин С.В. Биологическая доступность радионуклидов почв и воспроизведение ее динамики в имитационных моделях экосистем // *Вестник Московского университета*. – 2004. - №2. С. 16-21.
12. Сельскохозяйственная радиобиология / Гулякин И.В., Юдинцева Е.В. – М.:1973. С.8-9.
13. Санжарова Н. И., Сысоева А. А., Исамов Н. Н., Алексахин Р. М., Кузнецов В. К., Жигарева Т. Л. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению // *Российский химический журнал*. - 2005. - № XLIX. - С. 26-29.
14. Пристер Б.С., Перепелятникова Л.В., Дугинов В.И., Хомутинин Ю.В. Основные факторы, определяющие поведение радионуклидов в системе «почва-растение» / *Сборник науч. тр. под ред. Н.А. Лощилова Киев*. 1992 С. 108-117