

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-1-155-160>
УДК 57.04:635.652.2:581.522.5:581.45 (574.41)

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ Sr-90 НА ПРОВОДЯЩИЕ ТКАНИ ФАСОЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PHASEOLUS VULGARIS*)

Е. С. Сысоева*, Е. Н. Поливкина

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: sysoeva@nnc.kz

В статье представлены результаты исследования влияния Sr-90 на проводящие ткани фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) в 3-х последовательных поколениях, выращенных в условиях модельного эксперимента. Мощность поглощенной дозы от внутреннего и внешнего облучения для каждого поколения фасоли за вегетационный период составила в среднем $9,5 \cdot 10^{-1}$ Гр и $1,7 \cdot 10^{-4}$ Гр, соответственно. Толщина проводящих тканей в 3-х последовательных поколениях фасоли изменялась в убывающем ряду: 1-ое поколение > 2-ое поколение > 3-е поколение \geq контрольная группа ($p < 0,05$). В совокупности, установленное увеличение толщины проводящих тканей стебля и листа в 3-х поколениях фасоли является ответной реакцией на стресс и направлено на поддержание гомеостаза на тканевом уровне биологической организации. Полученные закономерности характеризуют механизмы адаптации растений к высокому уровню загрязнения почвы радионуклидом Sr-90.

Ключевые слова: проводящие ткани, фасоль обыкновенная (*Phaseolus vulgaris*), стресс, адаптация, ионизирующее излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Стресс у растений представляет собой состояние, при котором под действием внешнего фактора на организм сначала происходит нарушение функционального состояния, затем его нормализация и итоговое повышение сопротивляемости. Если интенсивность стрессового воздействия превышает пределы устойчивости и адаптивную способность растения, это может привести к серьезным повреждениям и к гибели организма [1–2].

Любые воздействия, изменяющие гомеостаз, влияющие на метаболизм растений, их рост или развитие могут рассматриваться в качестве стрессовых факторов. Стрессовые факторы могут иметь как естественную, так и антропогенную природу. При оценке последствий стрессовых воздействий учитывают кратковременный (неспецифический) стрессовый ответ, развивающийся в течение короткого промежутка времени после воздействия, и долгосрочный ответ на стрессовое воздействие [3]. Специфические адаптивные реакции растений, позволяющие им приспосабливаться к долговременному действию радиационного фактора менее изучены, чем неспецифические реакции растительных организмов на стрессовый фактор. Ионизирующее излучение может вызывать эффекты на разных уровнях организации растений – от молекулярно-клеточного до экосистемного. Качество и доза ионизирующего излучения влияют на конечный радиобиологический эффект, который может заключаться в поражении отдельных структур и функций организма, формировании уродств и аномалий развития, нарушении роста и размножения, а также приводить к гибели организма [4]. В зависимости от условий облучения и вида растения радиационное воздействие может приводить как к ингибирующим, так и к стимулирующим эффектам на морфологическом уровне.

В конечном итоге, ионизирующее излучение сказывается и на многих физиологических процессах: нарушаются процессы дыхания, фотосинтеза, наблюдаются изменения метаболизма и транспорта веществ. Проводящие ткани, такие как ксилема и флоэма, ответственны за транспорт воды, питательных веществ и других соединений в растении. Если радионуклиды попадают в почву или воду, они могут быть поглощены корнями и транспортированы через проводящие ткани в различные органы растения. Исследование данного процесса позволяет оценить, как радионуклиды распространяются в растении и влияют на его функционирование [5]. Исследование влияния радиоактивного загрязнения почвы на проводящие ткани, позволит понять механизмы адаптации и защиты растений от негативных последствий радиационного загрязнения. В данной работе представлены результаты исследования воздействия радиоактивного загрязнения почвы Sr-90 на проводящие ткани фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модельный эксперимент

В качестве экспериментальной культуры использовали фасоль обыкновенную (*Phaseolus vulgaris*). Выбор исследуемой культуры обусловлен коротким вегетационным периодом, устойчивостью к вредителям и болезням. Фасоль выращивали в контролируемых условиях экспериментальной оранжереи на почвенных образцах с территории площадки «4а», на которой в 1953–1957 годах проводились испытания боровых радиоактивных веществ (БРВ) (рисунок 1). Основным загрязнителем в почве данной площадки является радионуклид Sr-90, активность которого достигает $5 \cdot 10^8$ Бк/кг [6]. Контрольную группу растений выращивали на фоновой почве с идентичными физико-химическими свойствами.

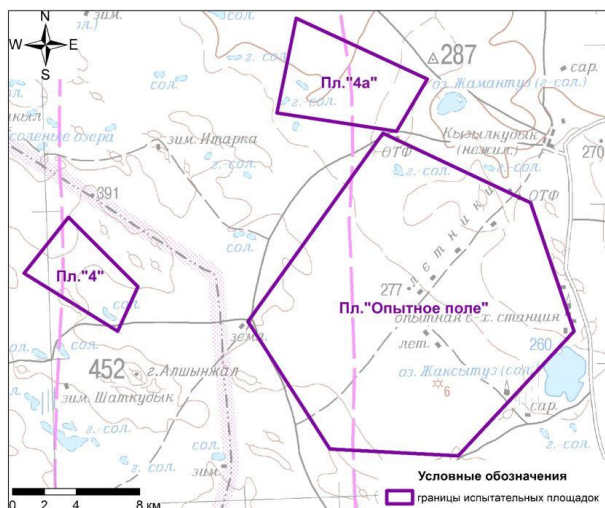
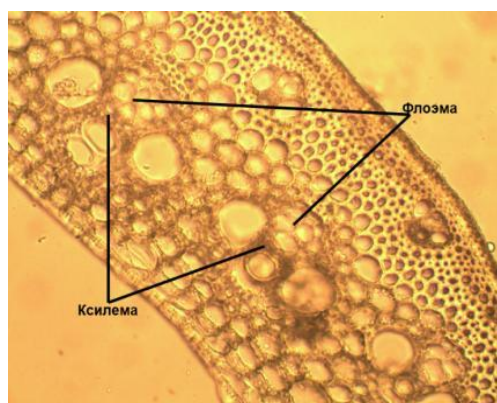


Рисунок 1. Расположение площадки «4а» на территории Семипалатинского полигона

В качестве исследуемых параметров использовали толщину флоэмы и ксилемы листа и стебля фасоли (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2. Объект исследования, поперечный срез: лист фасоли (а); стебель фасоли (б), увеличение 20х

На протяжении вегетационного цикла каждого поколения фасоли поддерживались одинаковые условия произрастания: влажность почвы – 60% от по-

лойной влагоемкости), уровень освещенности – 10000 Лк, температурный режим – 25–27 °С.

Отбор листьев и стеблей производили в конце вегетационного цикла. Затем образцы консервировали в Копенгагенской смеси [7]. Из консервированных образцов готовили срезы при помощи санного микротомы МЗП-01 «Техном» (РФ). В среднем толщина среза составляла 30–60 мкм. Далее полученный срез осторожно смывали с ножа на предметное стекло при помощи пипетки и дистиллированной воды. Излишки влаги удаляли бумагой, фиксировали срез 98% глицерином, поверх накладывали покровное стекло. Исследования микропрепаратов проводили с использованием микроскопа Micros MC 300, оснащенного камерой Vision Cam V500/21 M (Австрия), при увеличении 4, 10, 20, 40 и 100х. Измерения толщины проводящих тканей проводили с использованием ПО BioWizad 4.2.

Лабораторные исследования

Пробы растений промывались и ополаскивались дистиллированной водой, затем высушивались при температуре 80–100 °С в сушильном шкафу до постоянной массы, после чего подвергались грубому измельчению до длины 1–3 см при помощи секатора. Более тонкое измельчение проводилось на лабораторной мельнице. Измельченная проба обугливалась в муфельной печи при начальной температуре 200–250 °С, с постепенно повышающейся температурой до 350–400 °С. Обугленные пробы 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, затем после удаления включений весь объем пробы тщательно перемешивался, истирался в фарфоровой ступке и просеивался через сито с диаметром отверстий 1 мм. После чего, методом квартования, отбирались необходимые навески почвы для определения удельной активности Sr-90.

Измерение удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений осуществляли в соответствии со стандартизированными методическими указаниями [8, 9]. Радионуклид Sr-90 определяли радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB для растительных проб и на бета-спектрометре «Прогресс» для проб почвы. Предел обнаружения для Sr-90 составил 1–20 Бк/кг, а погрешность измерений не превышала 15%.

Статистический анализ

Для статистической обработки данных использовали пакет программ STATISTICA 12.0. Для каждого из исследуемых параметров определяли минимальные и максимальные значения, рассчитывали среднее арифметическое и ошибку среднего арифметического, медиану, среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации.

Каждую выборку предварительно проверяли на наличие выпадов для исключения резко отличающихся значений (артефактов). Проверка данных производилась по критерию, равному нормированному отклонению выброса [10].

Оценка достоверности различий исследуемых показателей между экспериментальными и контрольными выборками произведена при помощи F-критерия Фишера.

Для сравнения эмпирического распределения с теоретическим применяли критерий Колмогорова-Смирнова (λ). Полученные значения критерия во всех случаях меньше теоретических значений, что говорит о нормальном распределении значений в выборке [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что наиболее интенсивное накопление Sr-90 в органах фасоли обыкновенной характерно для листовой пластины ($\sim 4,4 \cdot 10^6$ Бк/кг), меньшее содержание зафиксировано в стеблях ($\sim 2,3 \cdot 10^6$ Бк/кг), минимальное накопление отмечено в плодах исследуемой культуры ($\sim 7,7 \cdot 10^5$ Бк/кг).

Оценка дозовых нагрузок внутреннего и внешне-

го облучения растений проводилась согласно рекомендациям публикации №108 МКРЗ. Мощность дозы внутреннего облучения или внешнего облучения растений рассчитана как произведение удельной активности радионуклида в растении на соответствующий дозовый коэффициент [12].

Согласно ранее проведенным исследованиям, основную часть дозы растения получали от внутреннего облучения радионуклидом Sr-90. Вклад внешнего и внутреннего облучения от других радионуклидов в поглощенные растениями дозы незначителен [13]. Мощность внутренней поглощенной дозы за счет Sr-90 в фасоли обыкновенной за вегетационный период (120 суток) составила $9,5 \cdot 10^{-1}$ Гр, доза от внешнего облучения незначительна и составляет порядка $1,7 \cdot 10^{-4}$ Гр. Суммарная мощность дозы от внутреннего и внешнего облучения для исследуемой культуры превышает предел малых доз (0,1 Гр) [14, 15]. Таким образом, растения проявляют адаптивные реакции в ответ на высокие дозы ионизирующего излучения, значительно отличающиеся от горьмезиса.

Всего произведено 3000 измерений параметров проводящих тканей листа и стебля фасоли. Результаты измерений исследуемых параметров представлены в таблице.

Таблица. Средние значения измерений проводящих тканей листа и стебля фасоли в 3-х последовательных поколениях

Вариационно-статистические показатели							
Параметр	n	Диапазон изменения, мкм		$\bar{x} \pm SD$, мкм (σ)		Me, мкм	
		эксп.	контр.	эксп.	контр.	эксп.	контр.
1-ое поколение							
S _{к.л.}	600	72–141	41–96	101±1 (15) 15	71±0,8 (12) 17	98	73
S _{к.с.}		154–246	100–136	202±2 (24) 12	119±0,7 (10) 9	202	115
S _{ф.л.}		60–121	32–88	88±1 (14) 16	68±0,8 (11) 16	87	70
S _{ф.с.}		108–231	86–128	187±2 (33) 18	106±0,7 (11) 10	191	107
2-ое поколение							
S _{к.л.}	600	72–135	40–96	91±0,9 (13) 15	71±0,8 (12) 16	90	73
S _{к.с.}		151–243	100–138	189±2 (28) 15	119±0,8 (11) 10	188	117
S _{ф.л.}		60–120	32–87	85±1 (18) 20	69±0,8 (11) 16	83	71
S _{ф.с.}		106–225	85–127	175±3 (40) 23	108±0,8 (11) 10	171	108
3-е поколение							
S _{к.л.}	600	50–99	41–89	74±0,8 (11) 15	70±0,8 (11) 16	75	73
S _{к.с.}		100–229	100–137	120±2 (34) 20	117±0,8 (11) 10	163	115
S _{ф.л.}		32–94	32–88	71±0,8 (11) 15	68±0,8 (11) 16	71	70
S _{ф.с.}		86–201	86–128	109±1 (16) 15	107±0,8 (11) 11	108	106

Примечание:

S_{к.л.} – толщина ксилемы листа, мкм
 S_{ф.с.} – толщина флоэмы стебля, мкм
 S_{к.с.} – толщина ксилемы стебля, мкм
 S_{ф.л.} – толщина флоэмы листа, мкм

$\bar{x} \pm SD$ – среднее арифметическое, ошибка ср. арифметического
 Me – медиана
 σ – среднеквадратичное отклонение
 CV – коэффициент вариации

Согласно полученным данным, в большинстве случаев, значение медианы практически совпадает со средним арифметическим исследуемых параметров как в экспериментальной, так и контрольной выборке. Данный факт указывает на однородность полученных данных, что подтверждают и коэффициенты вариации, значения которых во всех случаях значительно ниже 50%. Так, максимум вариации отмечен для толщины флоэмы стебля (23%), а минимум – для толщины ксилемы стебля (9%).

Для проводящих тканей 3-х последовательных поколений фасоли, выращенных на радиоактивно загрязненной почве, установлены достоверные изменения толщины проводящих тканей стебля и листа (*при p < 0,05*). Максимальные значения исследуемых параметров отмечены в 1-ом поколении: толщина ксилемы и флоэмы стебля составила 202 и 187 мкм, а листа – 101 и 88 мкм, соответственно (см. таблицу).

Меньшие значения отмечены для тканей стебля и листа 2-го и 3-го поколения. Так, толщина ксилемы стебля составила 189 и 120 мкм, а флоэмы – 175 и 109 мкм соответственно. У листьев 2-го и 3-го поколения толщина ксилемы составила – 91 и 74 мкм, а флоэмы – 85 и 71 мкм, соответственно (см. таблицу).

Минимальные значения толщины проводящих тканей отмечены для контрольной группы: толщина ксилемы стебля и листа – 119 и 71 мкм, толщина флоэмы стебля и листа – 107 и 68 мкм, соответственно (см. таблицу).

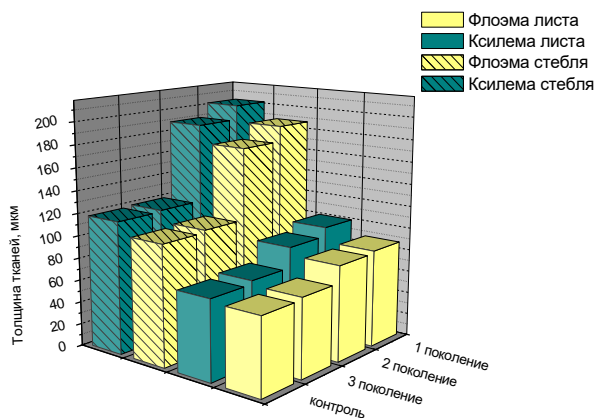


Рисунок 3. Изменение толщины проводящих тканей в 3-х последовательных поколениях фасоли

Сравнительный анализ результатов (рисунок 3) показал, что толщина ксилемы стебля и листа в экспериментальной группе 1-го, 2-го и 3-го поколения больше, чем в контрольной в среднем на 42, 37, 2% и 29, 23, 6%, соответственно. А толщина флоэмы стебля и листа 1-го, 2-го и 3-го поколения превышает аналогичные показатели в контроле на 43, 38, 2% и 22, 3, 3%, соответственно. При этом необходимо отметить, что толщина проводящих тканей фасоли 3-го поколения практически не отличалась от контроля. Таким образом, толщина ксилемы и флоэмы в 3-х последовательных поколениях изменялась в следу-

щем убывающем ряду: 1-ое поколение > 2-ое поколение > 3-е поколение ≥ контрольная группа.

Полученные закономерности изменения толщины проводящих тканей стебля и листа в 3-х поколениях фасоли, очевидно, являются совокупным результатом протекания адаптационных процессов. Так, в работе [16] также отмечено увеличение толщины клеточной стенки в ответ на различные дозы ионизирующего излучения. Результаты исследования воздействия стресса на биохимическом уровне [17, 18] показали, что при неблагоприятных условиях в клетках возрастает содержание протекторных веществ (углеводы, аминокислоты), участвующих в защитных реакциях, что, в свою очередь, приводит к увеличению размеров клеток и, как следствие, толщины тканей. Кроме того, стрессовый фактор может вызывать нарушение синтеза лигнина, в результате чего происходит утолщение клеточных стенок проводящих элементов флоэмы и ксилемы [19–21]. Чиркова [22] отмечает, что под воздействием стресса усиливается синтез активных форм кислорода и структурных полимеров, что приводит к утолщению клеточных стенок.

С другой стороны, повреждение клеток ксилемы и флоэмы может компенсироваться за счет изменения их количества и толщины для обеспечения нормального переноса воды, минеральных веществ и других соединений [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что высокий уровень удельной активности Sr-90 в почве оказывает значительное влияние на толщину проводящих тканей фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*). Толщина проводящих тканей в 3-х последовательных поколениях фасоли изменялась в убывающем ряду: 1-ое поколение > 2-ое поколение > 3-е поколение ≥ контрольная группа. В совокупности, установленное увеличение толщины проводящих тканей стебля и листа фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) является ответной реакцией на стресс и направлено на поддержание гомеостаза на тканевом уровне биологической организации. Полученные закономерности характеризуют механизмы адаптации растений к высокому уровню загрязнения почвы радионуклидом Sr-90.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713).

ЛИТЕРАТУРА

- Des Marais D. L., Hernandez K. M., Juenger T. E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: Exploring genomic responses of plants to the abiotic environment // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. – 2013. – Vol. 44, No. 1. – P. 5–29.

2. Leng G., Huang M. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01599-2>
3. Гуца Н. И. Влияние хронического облучения на адаптивный потенциал растений // *Радиационная биология. Радиоэкология*. – 2002. – № 2. – С. 155–157.
4. Корогодин В.И. Проблемы пострadiационного восстановления. – М.: Атомиздат, 1966. – 228 с.
5. Спиринов Д. А. Радиоэкологический сдвиг в фитоценозах и возможный критерий его прогнозирования // *Экология*. – 1988. – No. 4. – С. 25–29.
6. Kunduzbayeva A.Y., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Y., Bakirova G.A. Speciation of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – Vol. 249. – P. 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106867>
7. Уткина И. А. Ботаническая микротехника. Руководство к практическим занятиям. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2001. – 58 с.
8. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды. – Алматы. – 2010. – 25 с.
9. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91; МИ 5.06.001.98 РК. – Алматы. – 1998. – 18 с.
10. Плохинский Н. А. Биометрия. – М.: МГУ, 1970. – 367 с.
11. Шестаков Ю. Г. Математические методы в геологии. – Красноярск: Изд-во КГУ, 1988. – 208 с.
12. ICRP Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants ICRP Approved by the Commission in October. Publication. – 2008. – 108 p.
13. Minknova K. S. Cytogenetic effects in crested hairgrass from a site where tests of military radioactive substances were conducted at the Semipalatinsk test // *Biology Bulletin*. – 2020. – Vol. 47, No. 12. – P. 1637–1650.
14. Котеров А. Н. Малые дозы и малые мощности доз ионизирующей радиации: регламентация диапазонов, критерии их формирования и реалии XXI века // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2009. – № 3. – С. 5–26.
15. Caplin N., Willey N. Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: From acute high doses to chronic low doses // *Frontiers in Plant Science*. – 2018, No. 9. – P. 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
16. de Micco V., Arena C., Pignatola D., Durante M. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2011. – Vol. 50. – P.1–19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>
17. Gudkov S. V., Grinberg M. A., Sukhov V., Vodenev V. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 202. – P. 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001>
18. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends in Plant Science*. – 2002. – Vol. 7(9). – P. 405–410.
19. Borzouei A., Kafi M., Khazaei H., Naseriyan B., Majdabadi A. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings // *Pakistan Journal of Botany*. – 2010. – Vol. 42. – P. 2281–2290.
20. Zhu J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants // *Cell*. – 2016. – Vol. 67, No. 2. – P. 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>
21. Scheffer M., Bascompte J. Early-warning signals for critical transitions // *Nature*. – 2009. – Vol 461. – P. 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
22. Чиркова Т. В. Физиологические основы устойчивости растений. – СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2002. – 244 с.
23. Курсанов А. Л. Транспорт ассимилятов в растениях. – М.: Наука, 1976. – 646 с.
24. Shimalina N. S., Pozolotina V. N., Orekhova N. A. Stress memory in two generations of *Plantago major* from radioactive and chemical contaminated areas after the cessation of exposure // *International Journal of Radiation Biology*. – 2023. – Vol. 99, No. 8. – P. 1228–1238. <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2146232>

REFERENCES

1. Des Marais D. L., Hernandez K. M., Juenger T. E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: Exploring genomic responses of plants to the abiotic environment // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. – 2013. – Vol. 44, No. 1. – P. 5–29.
2. Leng G., Huang M. Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01599-2>
3. Gusha N. I. Influence of chronic exposure on the adaptive capacity of plants. // *Radiobiology. Radioecology*. – 2002. – No. 2. – P. 155–157.
4. Korogodin V. I. Problems of post-radiation recovery. Moscow: Atomizdat, 1966. – 391 p.
5. Spirin D. A. Radioecological shift in phytocenoses and a possible criterion for its prediction // *Ekologiya*. – 1988. No. 4. – P. 25–29.
6. Kunduzbayeva A.Y., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Y., Bakirova G.A. Speciation of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – Vol. 249. – P. 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106867>
7. Utkina I. A. Botanical Microtechnics. Guide to Practical Classes. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2001. – 58 p.
8. Methodology for determining the content of artificial radionuclides plutonium-(239+240), strontium-90 in environmental objects. – Almaty. – 2010. – 25 p.
9. Radionuclide activity in bulk samples. Methods of measurements on gamma-spectrometer: MI 2143-91; MI 5.06.001.98 RK. – Алматы. – 1998. – 18 p.
10. Plokhinsky N. A. Biometrics. – Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1970. – 367 p.
11. Shestakov Y. G. Mathematical Methods in Geology. – Krasnoyarsk.: Publishing House of Krasnoyarsk University, 1988. – 208 p.
12. ICRP Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants ICRP Approved by the Commission in October. Publication. – 2008. – 108 p.
13. Minknova K. S. Cytogenetic effects in crested hairgrass from a site where tests of military radioactive substances

- were conducted at the Semipalatinsk test // *Biology Bulletin*. – 2020. – Vol. 47, No. 12. – P. 1637–1650.
14. Koterov A. N. Low doses and dose rates of ionizing radiation: regulations for dose ranges, their forming criteria and 21st century realities // *Medical radiology and radiation safety*. – 2009. No. 3. – P. 5–26.
 15. Caplin N., Willey N. Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: From acute high doses to chronic low doses // *Frontiers in Plant Science*. – 2018, No. 9. – P. 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
 16. de Micco V., Arena C., Pignalosa D., Durante M. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2011. – Vol. 50. – P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0343-8>
 17. Gudkov S. V., Grinberg M. A., Sukhov V., Vodenev V. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 202. – P. 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001>
 18. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends in Plant Science*. – 2002. – Vol. 7(9). – P. 405–410.
 19. Borzouei A., Kafi M., Khazaei H., Naseriyan B., Majdabadi A. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings // *Pakistan Journal of Botany*. – 2010. – Vol. 42. – P. 2281–2290.
 20. Zhu J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants // *Cell*. – 2016. – Vol. 67, No. 2. – P. 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>
 21. Scheffer M., Bascompte J. Early-warning signals for critical transitions // *Nature*. – 2009. – Vol 461. – P. 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
 22. Chirkova T. V. Physiological Basis of Plant Resistance. – St. Petersburg: S.-Peterb. Gos. Univ., 2002. – 244 p.
 23. Kursanov A. L. Transport of assimilates in plants. – Moscow: Nauka, 1976. – 646 p.
 24. Shimalina N. S., Pozolotina V. N., Orekhova N. A. Stress memory in two generations of *Plantago major* from radioactive and chemical contaminated areas after the cessation of exposure // *International Journal of Radiation Biology*. – 2023. – Vol. 99, No. 8. – P. 1228–1238. <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2146232>

КӘДІМГІ ҮРМЕБҰРШАҚТЫҢ (*PHASEOLUS VULGARIS*) ӨТКІЗГІШ ТІНДЕРІНЕ Sr-90 ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Е. С. Сысоева*, Е. Н. Поливкина

ҚР ҰАО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: syssoeva@nnc.kz

Мақалада Sr-90 қарапайым үрмебұршақтың (*Phaseolus vulgaris*) өткізгіш тіндеріне модельдік тәжірибе жағдайында өсірілген 3 ұрпақтағы әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Вегетациялық кезеңде үрмебұршақтың әр буыны үшін ішкі және сыртқы сәулеленудің сіңірілген дозасының қуаты сәйкесінше орта есеппен $9,5 \cdot 10^{-1}$ Гр және $1,7 \cdot 10^{-4}$ Гр болды. Үрмебұршақтың қатарынан 3 ұрпағындағы өткізгіш тіндердің қалыңдығы азаю қатарымен кұбылады: 1-ші буын > 2-ші буын > 3-ші буын \geq бақылау тобы ($p < 0,05$). Бірге, үрмебұршақтың 3 буынында сабақ пен жапырақтың өткізгіш тіндерінің қалыңдығының белгіленген өсуі стресске қарсы жауабы болып табылады және биологиялық ұйымдастыру тіндік деңгейінде гомеостазды сақтауға бағытталған. Алынған заңдылықтар өсімдіктердің Sr-90 радионуклидмен топырақтың жоғары ластану деңгейіне бейімделу механизмдерін сипаттайды.

Түйін сөздер: өткізгіш ұлталар, кәдімгі үрмебұршақ (*Phaseolus vulgaris*), стресс, бейімделу, ионды сәуле шығару.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF Sr-90 ON THE CONDUCTIVE TISSUES OF THE COMMON BEAN (*PHASEOLUS VULGARIS*)

Y. S. Syssoeva*, Y. N. Polivkina

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

* E-mail for contacts: syssoeva@nnc.kz

The article presents the results of a study on the effect of Sr-90 on the conductive tissues of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) in three consecutive generations grown in a model experiment. The absorbed dose rate from internal and external radiation for each common bean generation during the growing season averaged $9.5 \cdot 10^{-1}$ G and $1.7 \cdot 10^{-4}$ G, respectively. The thickness of the conductive tissues in 3 consecutive generations of beans varied in descending order: 1st generation > 2nd generation > 3rd generation \geq control group ($p < 0.05$). Collectively, the established increase in the thickness of the conductive tissues of the stem and leaf in the 3rd generation of beans is a response to stress and is aimed at maintaining homeostasis at the tissue level of the biological organization. The obtained patterns characterize the mechanisms of plant adaptation to a high level of soil contamination with Sr-90 radionuclide.

Keywords: conductive tissues, common bean (*Phaseolus vulgaris*), stress, adaptation, ionizing radiation.