

ОЦЕНКА РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ γ -ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН ЯЧМЕНЯ ОБЫКНОВЕННОГО *HORDEUM VULGARE* L.

© 2024 г. С. О. Афонина^{1, *}, Л. Н. Комарова¹, М. М. Рассказова¹

¹Обнинский институт атомной энергетики –
филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

*e-mail: astakhina@list.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.

После доработки 16.05.2023 г.

Принята к публикации 28.02.2024 г.

Изучено воздействие γ -облучения (⁶⁰Co) в диапазоне доз от 2 до 50 Гр на морфологические (длина ростка, длина главного корня) и биохимические показатели (содержание фотосинтетических пигментов – хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов) проростков облученных семян ячменя обыкновенного сорта Витязь.

Ключевые слова: ячмень, семена, γ -излучение, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды, фотосинтез

DOI: 10.31857/S0869803124010052, **EDN:** NNOКHK

Анализ механизмов стрессовых реакций у растительных организмов на воздействие низкими дозами ионизирующего излучения является важной фундаментальной задачей современной радиобиологии, решение которой позволит продвинуться в понимании адаптивных реакций на слабые внешние воздействия. Изучение влияния γ -облучения семян на дальнейшее развитие растений является одним из приоритетных направлений в современной науке, так как является основной частью работы по научному обоснованию технологии предпосевного облучения семян.

Известно, что предпосевное γ -облучение семян стимулирует развитие растений в условиях солевого стресса [1].

Положительное воздействие стимулирующих доз γ -облучения на значимые хозяйственные признаки отмечали при выращивании в вегетационные сезоны, контрастные по погодным условиям. Однако слишком сухие или экстремально влажные условия могут свести до минимума стимулирующий эффект облучения семян [2].

Главным препятствием для широкого использования предпосевного облучения семян является нестабильность эффекта гормезиса как в лабораторных, так и в полевых условиях [1, 3, 4]. Несмотря на это, исследование влияния γ -облучения на сельскохозяйственные культуры внесет

вклад в расшифровку адаптивных реакций растений и позволит повысить эффективность создания стрессоустойчивых сортов [4]. Стоит отметить, что сортовые отличия сельскохозяйственных культур по радиочувствительности различаются в 1.5–5.0 раз, необходимо накопление новых экспериментальных данных по изучению эффекта стимуляции при γ -облучении семян сельскохозяйственных растений различных сортов.

Поэтому целью настоящей работы была оценка влияния γ -облучения на морфологические и биохимические показатели проростков ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.) сорта Витязь.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования был выбран ячмень обыкновенный сорта Витязь, так как данный сорт характеризуется высокой адаптацией к неблагоприятным абиотическим факторам и хорошей урожайностью [5]. Схема эксперимента заключалась в следующем: воздействию облучения γ -квантами подвергались семена ячменя обыкновенного сорта Витязь, которые затем проращивали в рулонных культурах согласно ГОСТу 12038-84 [6]. Изменения изучаемых показателей исследовали на проростках ячменя. Для количественной оценки влияния ионизирующего излучения были выбраны

следующие показатели: морфологические – длина проростка и главного корня; биохимические – концентрация основных фотосинтезирующих пигментов (хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов). Облучение семян γ -квантами проводили на базе Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации (МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России) на установке «Луч-1» (^{60}Co) при мощности дозы 97 сГр/мин в бумажных конвертах с площадью поверхности 25 см². В каждом конверте находилось по 30 семян, три пакета на каждую дозу γ -облучения. Серии опытов проводили 3 раза.

Диапазон исследуемых доз облучения был выбран на основании большого количества литературных данных, где было показано, что стимуляция роста проростков наблюдается в диапазоне доз от 10 до 20 Гр при мощности дозы 55–60 Гр/ч [1, 7–9]. Для наших экспериментальных исследований был выбран следующий диапазон доз – 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 Гр.

Проращиваемые семена выдерживали в рулонных культурах в термостате при температуре 22–24,5 °С, на 5-е сутки помещали под фитолампу Osram Fluora L 18W/77 (Германия), световой поток – 550 лм, мощность – 18 Вт. На 7-е сутки измеряли длину главного корня и ростков. На 10-е сутки проводили измерение количественного содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов) в ацетоновой вытяжке [10] путем пересчета оптической плотности.

Проростки отрезали и взвешивали на весах навеску массой 100 мг. Навеску помещали в керамическую ступку и растирали в течение 5–7 мин до гомогенного состояния, порционно добавляя 10 мл 100%-ного ацетона. Осадок и надосадочную жидкость количественно переносили на стеклянный фильтр, укрепленный в колбе Бунзена. Фильтрацию производили с помощью водоструйного насоса. Фильтрат собирали в мерную колбу и доводили 100%-ным ацетоном до 25 мл. Экстракт помещали в кювету фотометра КФК-3-01 (Россия) толщиной 1 см. В кювету с холостой пробой наливали растворитель (100%-ный ацетон). Определение концентрации хлорофиллов и каротиноидов проводили по регистрации оптической плотности при длинах

волн 470, 646 и 663 нм. Для каждой пробы проводили пять измерений.

Количественное содержание хлорофилла *a* (C_a) в мг/л определяли по формуле (1):

$$C_a = 12.21D_{663} - 2.81D_{646}. \quad (1)$$

Содержание хлорофилла *b* (C_b) в мг/л определяли по формуле (2):

$$C_b = 20.13D_{646} - 5.03D_{663}. \quad (2)$$

Содержание каротиноидов ($C_{\text{кар}}$) в мг/л определяли по формуле (3):

$$C_{\text{кар}} = (1000D_{470} - 3.27C_a - 100C_b) / 229, \quad (3)$$

где D_{470} , D_{646} и D_{663} – оптическая плотность вытяжки при 470, 646 и 663 нм соответственно, C – концентрация пигмента в вытяжке (мг/л).

Установив концентрацию пигментов в вытяжке, определяли его содержание в исследуемой ткани с учетом объема вытяжки и массы пробы (4):

$$F = VC / P, \quad (4)$$

где F – содержание пигмента в растительном материале (мг/г сырой массы), V – объем вытяжки (л), C – концентрация пигмента (мг/л), P – навеска растительного материала (г).

Статистический анализ данных. Оценки средних и доверительных интервалов проводили стандартными методами математической статистики. Обработка полученной информации проводилась с использованием пакета приложений Microsoft Excel 2016. Для проверки гипотезы о нормальном распределении использовали критерий Шапиро – Уилка. В ходе статистической обработки для оценки достоверности различий по морфометрическим показателям использовали параметрический критерий Стьюдента, а для оценки биохимических показателей – непараметрический расширенный критерий Манна – Уитни, так как длина вариационного ряда не превышала пяти значений в каждой повторности. Наблюдаемые различия считали статистически значимыми при уровне значимости $p < 0.05$. Экспериментальные данные были проверены на наличие выбросов, которые исключали из дальнейшего анализа. На диаграммах представлены средние значения и стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментальных исследований были выявлены статистически значимые различия в длине главного корня и ростков, появившихся при прорастании облученных семян на 7 сутки после облучения (рис. 1).

Из рис. 1, а видно, что при всех исследуемых дозах γ -облучения, кроме 50 Гр, длина ростков либо не отличается от контрольных растений, либо при действии γ -излучения в дозе 15 и 20 Гр значительно превышает контроль (максимальное увеличение длины ростка отмечено при облучении семян в дозе 15 Гр (на 31% по сравнению с контролем)), что может свидетельствовать о наличии стимулирующего эффекта. Облучение в дозе 50 Гр значительно снижает длину ростков. Эти данные свидетельствуют о том, что количество возникших повреждений меристематических клеток зародыша семени велико и отражается на способности растений к росту. Полученные данные хорошо соотносятся с результатами других исследований, выявленных при облучении злаковых растений [1, 7, 9].

На панели (б) рис. 1 показано изменение длины главного корня у проростков ячменя, облученных в тех же диапазонах доз.

Видно, что в этом случае облучение семян в дозах 5–20 Гр вызывает статистически значимый прирост корня (максимальное увеличение длины главного корня на 27% по сравнению с контролем наблюдалось при облучении семян в дозе γ -облучения 20 Гр). Тогда как и в предыдущем случае ионизирующее излучение в дозе 50 Гр оказывает угнетающее действие.

Хорошо известно, что морфологические показатели растений напрямую зависят от запаса питательных веществ в семени на ранних стадиях развития, а затем от интенсивности фотосинтеза. Поэтому особый интерес представляло изучить влияние ионизирующего излучения на концентрацию фотосинтетических пигментов – хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов и выявить возможную корреляцию между изменениями морфологических и биохимических показателей.

Результаты изменения концентрации фотопигментов представлены на рис. 2.

По результатам исследования видно, что концентрация хлорофилла *a* статистически значимо снижается при облучении семян в дозах 2, 5, 10, 25 и 50 Гр, при действии ионизирующего излучения в дозе 15 Гр выявлено стимулирующее действие (рис. 2, а). Аналогичные данные получены

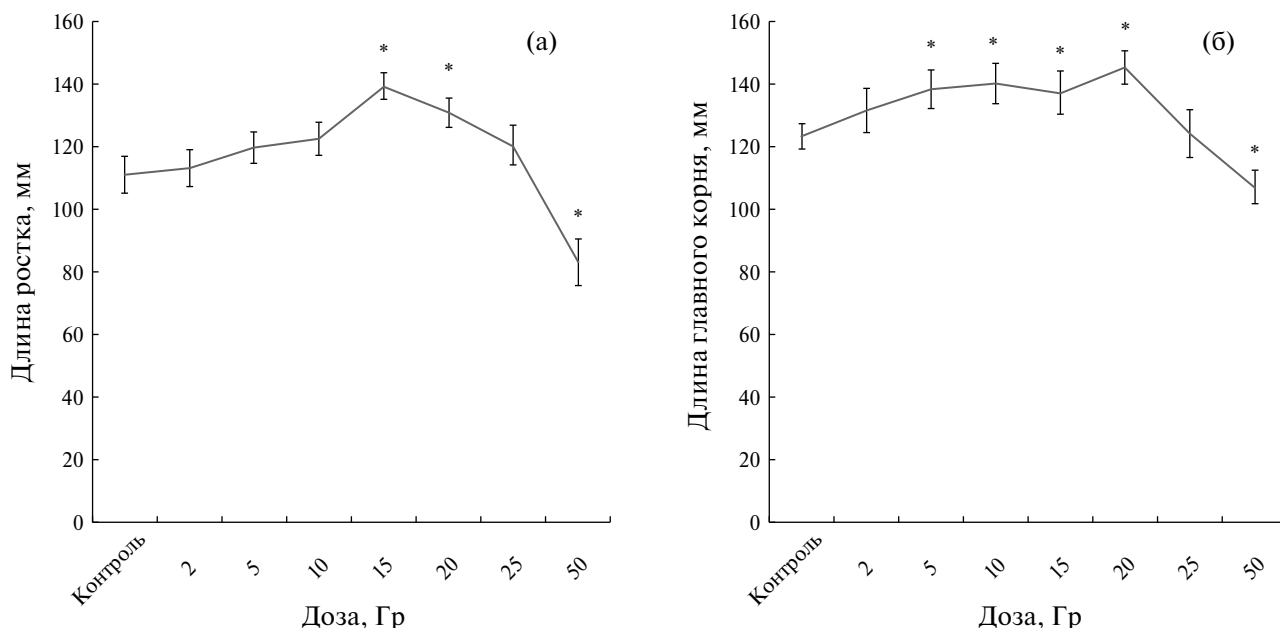


Рис. 1. Зависимость длины ростков (а) и длины главного корня (б) от дозы γ -излучения облученных семян на 7-е сутки прорастивания, данные приведены в виде: среднее \pm SE.

* Статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

Fig. 1. Dependence of the length of sprouts (a) and the length of the main root (b) on the dose of γ -irradiation of irradiated seeds on the 7th day of germination, the data are given as: mean \pm SE

* Statistically significant difference from control at $p < 0.05$

и при изучении изменения содержания хлорофилла *b* от дозы излучения (рис. 2, б).

На рис. 3 представлены результаты зависимости содержания каротиноидов от дозы γ -излучения.

Отмечено, что повышение концентраций пигмента наблюдается при воздействии излучения в дозе 15 и 20 Гр (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, позволяют сделать следующие выводы: действие γ -излучения в дозе 15 и 20 Гр значительно увеличивает длину ростков, однако увеличение длины главного корня у проростков ячменя происходит при γ -облучении в диапазоне доз от 5 до 20 Гр. Исследователи [8] предлагают связывать увеличение длины главного корня и ростка с более ранним развитием проростков ячменя, семена которых были облучены в стимулирующих дозах по сравнению с контрольными. Возможное объяснение данного эффекта связано с увеличением содержания индолилуксусной кислоты, зеатина, индолилмасляной кислоты и уменьшением концентраций абсцизовой кислоты [11]. Стоит отметить, что в диапазоне доз 4–20 Гр экспрессия генов катаболизма последнего фитогормона

усиливается [12]. Помимо фитогормонов важное влияние оказывает ферментативная система, контролирующая важные метаболические пути и антиоксидантную защиту в растительных клетках. В работе [13] авторы показывают, что каталаза, гваяколовая пероксидаза, пируваткиназа и глюкозо-6-фосфатдегидрогеназа вносят вклад в эффект стимуляции роста проростков при γ -облучении в диапазоне доз 10–20 Гр.

Ионизирующее излучение может оказывать разнонаправленное действие на содержание биохимических компонентов в облученных растениях и влиять на их метаболизм [14]. Можно предположить, что при низких дозах с увеличением поглощенной дозы ионизирующего излучения увеличивается количество свободных радикалов, что является не только следствием нарушения гомеостаза, а представляет собой важный компонент фенотипической адаптации, так как активные формы кислорода (АФК) являются сигнальными молекулами при развитии стрессовой реакции у растений [15]. При облучении в дозах 5–20 Гр наблюдается эффект стимуляции, однако он не всегда повторяется, и его природа объясняется неодинаково [16]. При облучении γ -квантами в стимулирующих дозах формируются адаптационно-приспособительные признаки: модулируются антиоксидантная и фитогормональная системы, усиливается

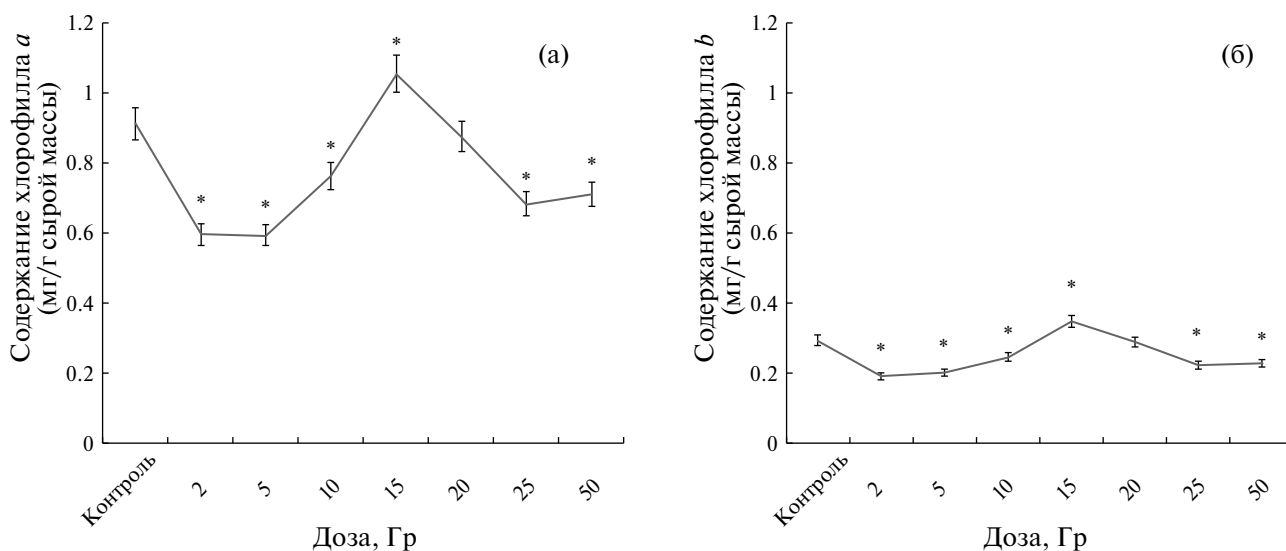


Рис. 2. Зависимость содержания хлорофилла *a* (а) и хлорофилла *b* (б) (мг/г сырой массы) от дозы γ -излучения облученных семян на 10-е сутки прорастивания, данные приведены в виде: среднее \pm SE.

* Статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$.

Fig. 2. Dependence of the content of chlorophyll *a* (a) and chlorophyll *b* (b) (mg/g fresh weight) on the dose of γ -radiation of irradiated seeds on the 10th day of germination, the data are given as: mean \pm SE.

* Statistically significant difference from control at $p < 0.05$.

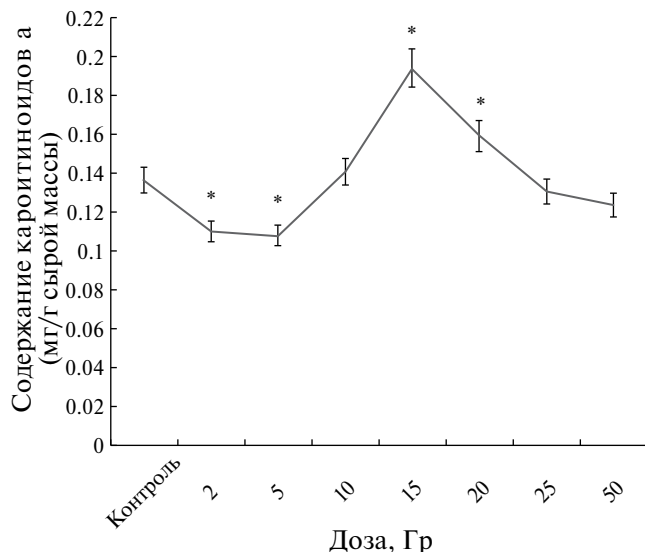


Рис. 3. Зависимость содержания каротиноидов (мг/г сырой массы) от дозы γ -излучения облученных семян на 10-е сутки прорастивания, данные приведены в виде: среднее \pm SE

* Статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$.

Fig. 3. Dependence of the content of carotenoids (mg/g fresh weight) on the dose of γ -radiation of irradiated seeds on the 10th day of germination, the data are given as: mean \pm SE.

* Statistically significant difference from control at $p < 0.05$.

интенсивность работы пентозофосфатного пути окисления глюкозы, благодаря изменению окислительно-восстановительного гомеостаза хлоропластов увеличивается содержание хлорофиллов и каротиноидов, которые защищают структуры клеток от повреждающего действия свободных радикалов [4]. АФК косвенно изменяют клеточный метаболизм и активируют важнейшие физиологические функции, которые выражаются в интенсификации накопления ауксинов, повышении активности деления клеток меристемы зародышевых корешков и, как следствие этого, усилении роста корешков и ростков [17].

Дальнейшее увеличение поглощенной дозы ионизирующего излучения вызывает повышение концентрации ингибитора прорастания – абсцизовой кислоты, вследствие чего тормозится рост корней и проростков. В исследовании [11] показано, что γ -облучение семян ячменя сорта Нур в дозе 50 Гр вызывало накопление абсцизовой кислоты в проростках на ранних этапах онтогенеза.

У высших растений молекулы хлорофилла *a* и хлорофилла *b* входят в состав пигмент-белковых

комплексов, поскольку в свободном виде, будучи сильнейшими фотосенсибилизаторами, они могут вызвать разрушение мембран тилакоидов и стромы хлоропласта за счет фотодинамического эффекта. Под действием ионизирующего излучения усиливается распад белковых комплексов, происходит растяжение тилакоидных мембран и потеря гран в хлоропластах, что приводит к уменьшению концентрации фотосинтезирующих пигментов и сдвигу в обмене веществе в целом [4, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведенного исследования выявлено стимулирующее действие γ -облучения в дозах 15 и 20 Гр на длину ростка ячменя обыкновенного сорта Витязь, на длину корня стимулирующее действие γ -облучения выявлено в диапазоне доз 5–20 Гр. Анализ содержания хлорофиллов *a* и *b* выявил повышение концентраций у проростков облученных семян в дозе 15 Гр. По содержанию каротиноидов стимулирующими дозами γ -облучения являлись 15 и 20 Гр. Наблюдаемые в настоящей работе эффекты хорошо согласуются с данными, полученными другими авторами на других сортах ячменя. Безусловно, необходимо продолжать исследования механизмов формирования эффекта гормезиса, преимущественно на генетическом уровне, так как не существует единой концепции формирования данного феномена.

Вклад авторов: все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афони́на Светлана Олеговна (Afonina Svetlana Olegovna), astakhina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3776-1703>

Комарова Людмила Николаевна (Komarova Liudmila Nikolaevna), komarova_1411@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0491-4486>

Рассказова Марина Михайловна (Rasskazova Marina Mikhailovna), rassmarina@mail.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джафаров Э.С. Предпосевное гамма-облучение семян как фактор, стимулирующий развитие растений в солевых условиях. В кн.: *Актуальные проблемы радиационной биологии: Материалы конференции (Дубна, 25–27 октября 2022 г.)*. Дубна: ОИЯИ, 2022: 30–34. [Dzhafarov E.S. Predposevnoe gamma-obluchenie semyan kak faktor, stimuliruyushchij razvitie rastenij v solevykh usloviyah = Pre-sowing gamma irradiation of seeds as a factor stimulating plant development in saline conditions. *Aktual'nye problemy radiacionnoj biologii: Materialy konferencii (Dubna, 25–27 oktyabrya 2022 g.)*. Dubna: OIYAI, 2022: 30–34. (In Russ.)]
2. Чурюкин Р.С., Гераськин С.А. Проявление эффекта гормезиса у растений ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в контрастных условиях произрастания при γ -облучении семян. *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(4):820–829. [Churyukin R.S., Geras'kin S.A. Hormesis in barley (*Hordeum vulgare* L.) plants derived from γ -irradiated seeds under contrasting wether conditions. *Agricultural Biology*. 2017;52(4):820–829. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.4.820rus>
3. Чурюкин Р.С., Гераськин С.А. Влияние облучения (^{60}Co) семян ячменя на развитие растений на ранних этапах онтогенеза. *Радиация и риск*. 2013; 22(3):80–92. [Churyukin R.S., Geras'kin S.A. Effect of γ -irradiation on development of barley seeds in early stages of ontogeny. *Radiation and Risk*. 2013;22(3):80–92. (In Russ.)]
4. Волкова П.Ю. Адаптивные реакции растений на действие ионизирующего излучения в низких дозах: Дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. [Volkova P.Yu. Adaptivnyye reakcii rastenij na dejstvie ioniziruyushchego izlucheniya v nizkikh dozah = Adaptive responses of plants to the action of ionizing radiation in low doses: Dis. ... d-ra biol. nauk = Dissertation Dr. Biol. Sci. Obninsk, RIRAE, 2020. (In Russ.)]
5. Глуховцев В.В., Абрамов Т.В., Столпивская Е.В. и др. Авторское свидетельство 42777 РФ, Ячмень яровой Витязь, №9610340 заявлено 10.12.2003, опубликовано 13.07.2010. [Gluhovcev V.V., Abramov T.V., Stolpivskaya E.V., Muhtulova A.S., Carevskij S.Yu. Avtorskoe svidetel'stvo 42777 RF, Yachmen' yarovoj Vityaz', №9610340 zayavleno 10.12.2003, opublikovano 13.07.2010. (In Russ.)]
6. ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести (с Изменениями N 1, 2). [GOST 12038-84. Agricultural seeds. Methods for determination of germination (In Russ.)]
7. Чурюкин Р.С. Закономерности формирования биологических эффектов при γ -облучении семян ячменя: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2017. [Churyukin R.S. Zakonomernosti formirovaniya effektivov pri γ -obluchenii semyan yachmenya = Patterns of formation of biological effects during γ -irradiation of barley seeds: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk = Ph. D. Biol. Sci. Thesis. Obninsk: RIRAE, 2017. (In Russ.)]
8. Гераськин С.А., Чурюкин Р.С., Казакова Е.А. Модификация развития ячменя на ранних этапах онтогенеза при воздействии γ -облучения на семена. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2015;55(6):607–615. [Geras'kin S.A., Churukin R.S., Kazakova E.A. Modification of Barley Development at Early Stages after Exposure of Seeds to γ -Irradiation. *Radiation Biology. Radioecology*. 2015;55(6):607–615. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0869803115060065>
9. Казакова Е.А., Макаренко Е.С., Подлущий М.С. и др. Радиочувствительность сортов озимого и яровой ячменя по выраженности морфологического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян. *Зерновое хозяйство России*. 2020;(2):23–28. [Kazakova E.A., Makarenko E.S., Podlutsky M.S. et al. Radio Sensitivity of the winter and spring barley varieties according to the morphological effect of low-dose gamma irradiation on the original seeds. *Grain Economy of Russia*. 2020;(2):23–28. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28>
10. Шубина А.Г. Содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях одуванчика лекарственного (*Taraxacum Officinale*) и березы повислой (*Betula Pendula Roth*), растущих в г. Тамбове. *Вестн. Томского гос. ун-та*. 2011;16(1):353–355. [Shubina A.G. Contents of chlorophyll and carotenoids in dandelion les drug leaves (*Taraxacum officinale*) and silver birch (*Betula pendula Roth*), growing in Tambov. *Tomsk State University Journal*. 2011;16(1):353–355. (In Russ.)]
11. Bitarishvili S.V., Volkova P.Yu., Geras'kin S.A. γ -irradiation of barley seeds and its effect on the phytohormonal status of seedlings. *Rus. J. Plant Physiol*. 2018;65(3):446–454. <https://doi.org/10.1134/S1021443718020024>
12. Битаршвили С.В., Бондаренко В.С., Гераськин С.А. Влияние γ -облучения на экспрессию генов, кодирующих ферменты метаболизма абсцизовой кислоты в зародышах семян ячменя. *Экол. генетика*. 2018;16(4):85–89. [Bitarishvili S.V., Bondarenko V.S., Geras'kin S.A. Influence of γ -irradiation on the expression of encoding ABA metabolism enzymes in barley embryos. *Ecological genetics*. 2018;16(4):85–89. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/ecogen16485-89>
13. Волкова П.Ю., Чурюкин Р.С., Гераськин С.А. Влияние гамма-облучения семян на активность ферментов в проростках ячменя. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016;56(2):190–196. [Volkova P.Yu., Churyukin R.S., Geras'kin S.A. Influence of γ -irradiated seeds on the enzyme activity in barley seedlings. *Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(2):190–196. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0869803116020144>

14. Jan S., Parween T., Siddiqi T.O. Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environ. Rev.* 2012;20(1):17–39. <https://doi.org/10.1139/a11-021>
15. Ерофеева Е.А. Гормезис и парадоксальные эффекты у растений в условиях автотранспортного загрязнения и при действии поллютантов в эксперименте: Дис. ... д-ра биол. наук. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2016. [Erofeeva E.A. Gormezis i paradoksal'nye efekty u rasteniy v usloviyah avtotransportnogo zagryazneniya i pri dejstvii pollyutantov v eksperimente = Hormesis and paradoxical effects in plants under conditions of motor vehicle pollution and under the influence of pollutants in an experiment: Dis. ... d-ra biol. nauk = Dissertation Dr. Biol. Sci. Nizhnij Novgorod, Lobachevsky University, 2016. (In Russ.)].
16. Левин В.И. Агроэкологические эффекты воздействия на семена растений электромагнитных полей различной модальности: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: Рязанская Государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Костычева, 2000. [Levin V.I. Agroekologicheskie efekty vozdeystviya na semena rastenii elektromagnitnyh polej razlichnoj modal'nosti = Agroecological effects of exposure of plant seeds to electromagnetic fields of various modalities: Avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk = Dr. Biol. Sci. Thesis. M.: Ryazan State Agricultural Academy P.A. Kostycheva, 2000. (In Russ.)].
17. Гагаринский Е.Л., Филимонов В.В., Касаткин М.Ю. Влияние осмотического стресса на развитие проростков мягкой пшеницы. *Бюл. Ботанического сада Саратовского гос. ун-та.* 2014;12:162–171. [Gagarinsky E.L., Filimonov V.V., Kasatkin M.Yu. Influence of osmotic stress on wheat seedlings development. *Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University.* 2014;12:162–171. (In Russ.)].
18. Aly A.A., Eliwa N.E., Maraei R.W. Physiological and molecular studies on ISSR in two wheat cultivars after exposing to gamma radiation. *Scienceasia.* 2019;45(5):436–445. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2019.45.436

**Assessment of Radiobiological Effects
of γ -Irradiation of Barley Seeds *Hordeum vulgare* L.
© 2024 г. S. O. Afonina¹, *, L. N. Komarova¹, M. M. Rasskazova¹**

¹*Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia*

* *E-mail: astakhina@list.ru*

The effect of γ -irradiation (⁶⁰Co) in the dose range from 2 to 50 Gy on the morphological (length of the sprout, length of the main root) and biochemical parameters (the content of photosynthetic pigments – chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids) of sprouts of irradiated seeds of common barley variety Vityaz was studied.

Keywords: barley, seeds, γ -radiation, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids, photosynthesis