

## РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СОРТОВ ОЗИМОГО И ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ ПО ВЫРАЖЕННОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НИЗКОДОЗОВОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ ОРИГИНАЛЬНЫХ СЕМЯН

**Е. А. Казакова**<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии, elisabethafeb19@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2975-5891;

**Е. С. Макаренко**<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экотоксикологии и радиобиологии сельскохозяйственных растений, makarenko\_ek\_obninsk@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7519-9550;

**М. С. Подлуцкий**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии, mikhail.podlutskii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7890-0469;

**А. А. Донцова**<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела селекции и семеноводства ячменя, doncova601@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6570-4303;

**С. В. Битаршвили**<sup>1</sup>, научный сотрудник лаборатории экотоксикологии и радиобиологии сельскохозяйственных растений, bitarishvili.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3623-7128;

**М. А. Лыченкова**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник лаборатории экотоксикологии и радиобиологии сельскохозяйственных растений, lychenkovamariya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6148-2021;

**И. В. Горбатова**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии, gorbatova.irina.96@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8028-4397;

**Е. Г. Филиппов**<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент по специальности, зав. отделом селекции и семеноводства ячменя, ORCID ID: 0000-0002-5916-3926;

**Д. П. Донцов**<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела селекции и семеноводства ячменя, ORCID ID: 0000-0001-9253-3864;

**Т. В. Чиж**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник группы эксплуатации гамма-установки ГУР-120, taras.chizh@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-0764-4621;

**А. С. Снегирев**<sup>1</sup>, младший научный сотрудник группы эксплуатации гамма-установки ГУР-120, Snegir.05@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2100-2449;

**П. Ю. Волкова**<sup>1</sup>, кандидат биологических наук, зав. лабораторией молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии, volkova.obninsk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2824-6232

<sup>1</sup>ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», 249032, Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; e-mail: volkova.obninsk@gmail.com;

<sup>2</sup>ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»,

347740, Ростовская обл., г. Зерноград, Научный городок, 3; e-mail: doncova601@mail.ru

Ячмень является основной зернофуражной культурой в Российской Федерации. Зерно этой культуры также используется в пищевой и пивоваренной промышленности (Филиппов, 2013). Известно, что низкие дозы гамма-излучения могут оказывать стимулирующее действие на рост и развитие растений, в частности ячменя. Однако знания о молекулярных путях, ответственных за формирование эффекта стимуляции после низкодозового облучения семян, в настоящее время остаются фрагментарны. Использование сортов, имеющих разную радиочувствительность в ответ на облучение низкими дозами, позволит изучить конкретные молекулярные механизмы формирования стимулирующего эффекта облучения. Такие знания в дальнейшем помогут в разработке сортов с высокой стабильной урожайностью по годам и обладающих высокой устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессорам. В 2019 г. с целью оценки выраженности ответной реакции на низкодозовое ионизирующее излучение на основе изменения морфологических параметров облученных и необлученных растений проведено гамма-облучение оригинальных семян девяти сортов озимого и ярового ячменя селекции ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской». Оригинальные семена каждого сорта ячменя облучали в ФГБНУ ВНИИРАЭ на гамма-установке ГУР-120 с источниками излучения <sup>60</sup>Co, в дозе 20 Гр (мощность дозы – 60 Гр/ч). Статистическая обработка данных выполнена в программной среде Microsoft Office Excel 2019. Морфологический анализ показателей длины и массы корневой и побегов проростков позволил установить наличие или отсутствие стимулирующего действия излучения на исследуемые показатели сортов и провести их последующую градацию в зависимости от величины радиобиологического эффекта. Выявлены контрастные по чувствительности к дозе 20 Гр сорта озимого и ярового ячменя. Стимулирующий эффект облучения наблюдали у сортов Фокс 1, Ратник, Ерема и Мастер, для сорта Леон зафиксировано ингибирующее действие излучения.

**Ключевые слова:** озимый и яровой ячмень, гамма-облучение, низкие дозы, стимуляция роста, морфология.

**Для цитирования:** Казакова Е. А., Макаренко Е. С., Подлуцкий М. С., Донцова А. А., Битаршвили С. В., Лыченкова М. А., Горбатова И. В., Филиппов Е. Г., Донцов Д. П., Чиж Т. В., Снегирев А. С., Волкова Ю. П. Радиочувствительность сортов озимого и ярового ячменя по выраженности морфологического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян // Зерновое хозяйство России. 2020. № 2(68). С. 23–28. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28.



## RADIO SENSITIVITY OF THE WINTER AND SPRING BARLEY VARIETIES ACCORDING TO THE MORPHOLOGICAL EFFECT OF LOW-DOSE GAMMA IRRADIATION ON THE ORIGINAL SEEDS

**E. A. Kazakova**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, senior researcher of the laboratory for molecular-cell basis of agricultural radiobiology, elisabethafeb19@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2975-5891;

- E. S. Makarenko**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, researcher of the laboratory for ecotoxicology agricultural radiobiology, makarenko\_ek\_obninsk@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7519-9550;
- M. S. Podlutsky**<sup>1</sup>, junior researcher of the laboratory for molecular-cell basis of agricultural radiobiology, mikhail.podlutski@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7890-0469;
- A. A. Dontsova**<sup>2</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher of the department of barley breeding and seed production, doncova601@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6570-4303;
- S. V. Bitarishvili**<sup>1</sup>, researcher of the laboratory for ecotoxicology agricultural radiobiology, bitarishvili.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3623-7128;
- M. A. Lychenkova**<sup>1</sup>, junior researcher of the laboratory for ecotoxicology agricultural radiobiology, lychenkovamariya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6148-2021;
- I. V. Gorbatova**<sup>1</sup>, junior researcher of the laboratory for molecular-cell basis of agricultural radiobiology, gorbatova.irina.96@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8028-4397;
- E. G. Filippov**<sup>2</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, docent, head of the department of barley breeding and seed production, ORCID ID: 0000-0002-5916-3926;
- D. P. Dontsov**<sup>2</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the department of barley breeding and seed production, ORCID ID: 0000-0001-9253-3864;
- T. V. Chizh**<sup>1</sup>, junior researcher of the group for operation of Gamma-device GUR-120, taras.chizh@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-0764-4621;
- A. S. Snegirev**<sup>1</sup>, junior researcher of the group for operation of Gamma-device GUR-120, Snegir.05@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2100-2449;
- P. Yu. Volkova**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, head of the laboratory for molecular-cell basis of agricultural radiobiology, volkova.obninsk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2824-6232
- <sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, 249032, Obninsk, Kievskoe Shosse, 109 km; e-mail: volkova.obninsk@gmail.com;
- <sup>2</sup>Agricultural Research Center "Donskoy", 347740, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok, 3; e-mail: doncova601@mail.ru

Barley is the main forage crop in the Russian Federation. Barley grain is also used for food and brewery (Filippov, 2013). It is common knowledge that low doses of gamma irradiation can have a stimulating effect on the growth and development of plants, in particular barley. However, there is a lack of knowledge about the molecular pathways responsible for the formation of the stimulation effect after low-dose seed irradiation. The use of varieties with different radio sensitivity to low-dose gamma irradiation will allow studying specific molecular mechanisms to form a stimulating irradiation effect. Such knowledge could further help in the development of varieties with a large stable productivity over the years and with high resistance to biotic and abiotic stressors. In 2019 there was conducted a gamma irradiation of the original seeds of nine winter and spring barley varieties developed in the FSBSI "Agricultural Research Center "Donskoy" in order to assess intensity of the response on low-dose ionizing irradiation based on changes in the morphological parameters of irradiated and unirradiated plants. The original seeds of each barley variety were irradiated at the FSBSI "All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology" by the gamma device "GUR-120" with <sup>60</sup>Co radiation sources at a dose of 20 Gy (dose rate of 60 Gy/hour). The statistical data processing was performed by the Microsoft Office Excel 2019. The morphological analysis of the length and weight of roots and sprouts made it possible to establish the presence or absence of the stimulating irradiation effect on the studied indicators of the varieties and to conduct their subsequent ranking according to the value of the radiobiological effect. There have been identified the winter and spring barley varieties with different sensitivity to a dose of 20 Gy. The stimulating irradiation effect was established in such varieties as "Foks 1", "Ratnik", "Yerema" and "Master". The variety "Leon" had an inhibitory irradiation effect.

**Keywords:** winter and spring barley, gamma-irradiation, low doses, growth stimulation, morphology.

**Введение.** Низкие дозы гамма-излучения могут оказывать стимулирующее действие на рост и развитие растений (Majeed et al., 2018). В литературе описаны многочисленные примеры положительных эффектов предпосевного гамма-облучения семян сельскохозяйственных культур, в том числе увеличение размеров побегов и корней, а также увеличение биомассы (Araújo et al., 2016; Majeed et al., 2018). В исследованиях, проведенных ранее сотрудниками ФГБНУ ВНИИРАЭ, установлено, что облучение семян ярового ячменя в дозе 20 Гр вызывает стимуляцию роста проростков (Geras'kin et al., 2017). На сегодняшний день показано, что формирование стимулирующих эффектов облучения происходит по сходным с другими стрессорами молекулярным путям (Wiegant et al., 2013). Знания о конкретных молекулярных механизмах формирования стимулирующего эффекта облучения остаются фрагментарными, при этом наиболее перспективным подходом к изучению молекулярных основ эффекта радиационной стимуляции является использование высокопроизводительных методов молекулярной биологии. Однако проведение подобных исследований целесообразно на оригинальных или элитных семенах сортов с контрастным фенотипом, поскольку семена следующих репродукций характеризуются большой вариабельностью радиобиологического эффекта (Volkova et al., 2019).

Таким образом, для выявления молекулярных путей, ответственных за формирование эффекта стимуляции после низкодозового облучения семян, первоочередной задачей является подбор спектра сортов, имеющих разную радиочувствительность в ответ на низкодозовое облучение.

В 2019 г. в ФГБНУ ВНИИРАЭ был проведен эксперимент по гамма-облучению оригинальных семян девяти сортов озимого и ярового ячменя селекции ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» для выявления наличия или отсутствия стимулирующего эффекта и последующего ранжирования сортов по выраженности ответной реакции на облучение низкими дозами ионизирующего излучения.

**Материалы и методы исследований.** Для проведения скрининга использовали оригинальные семена девяти сортов ячменя селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской» урожая 2017 г.: Виват, Ерема, Мастер, Тимофей, Фокс 1 (озимый ячмень), Грис, Леон, Ратник, Федос (яровой ячмень).

**Облучение и проращивание семян.** Облучение оригинальных семян каждого сорта проводили в ФГБНУ ВНИИРАЭ на гамма-установке ГУР-120 с источниками излучения <sup>60</sup>Со, в дозе 20 Гр (мощность дозы – 60 Гр/ч). Ранее сотрудниками ФГБНУ ВНИИРАЭ было установлено, что данная доза излучения стимулирует рост проростков при облучении

семян ячменя сорта Нур (Geras'kin et al., 2017). В качестве контроля использовали необлученные семена каждого из девяти изучаемых сортов.

Облученные и необлученные семена высевали на смоченные в дистиллированной воде рулоны фильтровальной бумаги, затем аккуратно заворачивали их и помещали в лабораторные стаканы с 200 мл дистиллированной воды. В каждый рулон помещали в среднем 100 семян, по 8 рулонов на вариант опыта. Всего в эксперименте использовали порядка 15 000 семян. Проращивание осуществляли в инкубаторе MIR-254 (Сапуо, Япония) при температуре 20 °С в темноте (Гераськин и др., 2015).

**Оценка морфологических параметров проростков.** Для каждого сорта ячменя проведена оценка морфологических параметров облученных и контрольных проростков. Длину побегов и корней измеряли на 8-е сутки прорастания с помощью линейки (систематическая погрешность измерений – 0,1 см). Массу побегов и корней после высушивания при комнатной температуре оценивали на аналитических весах Ohaus PA213C (США), дискретность измерений – 0,001 г.

Из полученных значений длин побегов и корней по всем рулонам были исключены выбросы с использованием критерия Стьюдента, также проведена проверка данных на соответствие оптимальному объему выборки. Для каждого сорта значения длины побегов и корней, а также их массы, пересчитанной на 100 проростков, представлены в формате «среднее значение ± SE». Базируясь на полученных данных по морфологическим параметрам проростков, сорта ячменя были ранжированы по выраженности ответной реакции на облучение.

**Ранжирование сортов.** Для оценки эффекта облучения для каждого морфологического показателя вычисляли отношение длины и массы побегов и корней растений, облученных в дозе 20 Гр, к соответствующим показателям контрольных проростков, а далее сравнивали полученное значение с единицей. Если

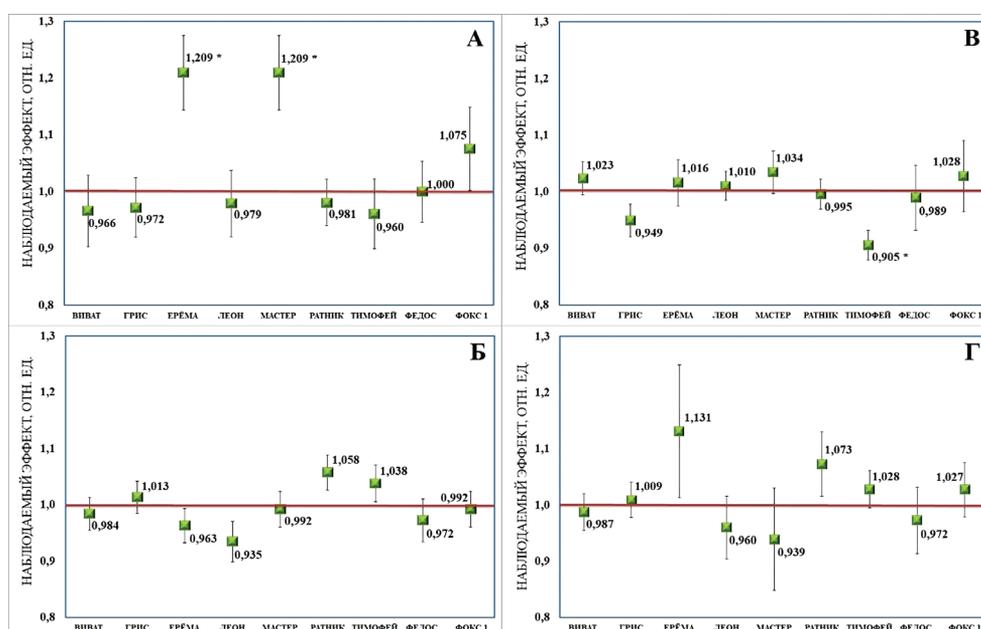
отношение морфологических показателей облученных растений к контрольным было больше 1, то делала заключение о наличии стимулирующего эффекта облучения. Если полученное отношение было меньше 1, говорили об ингибировании роста, а близкие к 1 значения рассматривали как отсутствие эффекта. Значимость наблюдаемого эффекта оценивали с использованием t-критерия Стьюдента.

Выраженность стимулирующего эффекта оценивали, основываясь на шкале ранжирования, состоящей из 9 ступеней – от 1 до 9 (по количеству исследуемых сортов). Сорта присваивали ранг, где единица соответствовала сорту с минимальным отношением морфологического показателя в облученной выборке к контрольной, а девятка – сорту, у которого это отношение было наибольшим. По этому принципу сорта были ранжированы по каждому из изученных показателей: длине побегов, длине корней, массе побегов, массе корней.

Далее ранги, полученные для всех четырех показателей, суммировали и сводили в общую таблицу. По итоговой сумме была предложена оценка сортов, по которой на первом месте оказывался сорт, для которого наблюдался максимальный суммарный стимулирующий эффект, а на последнем – сорт с максимальным ингибированием роста в результате облучения.

Статистическая обработка данных выполнена в программной среде Microsoft Office Excel 2019.

**Результаты и их обсуждение.** Сравнение морфологических показателей облученных в дозе 20 Гр и контрольных проростков ячменя позволило установить характер ответа исследуемых сортов на облучение, выражающийся в стимуляции или ингибировании роста проростков, а в отдельных случаях – в отсутствии эффекта облучения (рис. 1). Из рисунка видно, что статистически значимая ( $p < 0,05$ ) стимуляция наблюдалась только для сортов Ерема и Мастер по показателю «длина побегов», а ингибирование – для сорта Тимофей по показателю «масса побегов».



**Рис. 1.** Эффект гамма-облучения семян ячменя в дозе 20 Гр на морфологические показатели проростков (А – длины побегов; Б – длины корней; В – массы побегов; Г – массы корней)

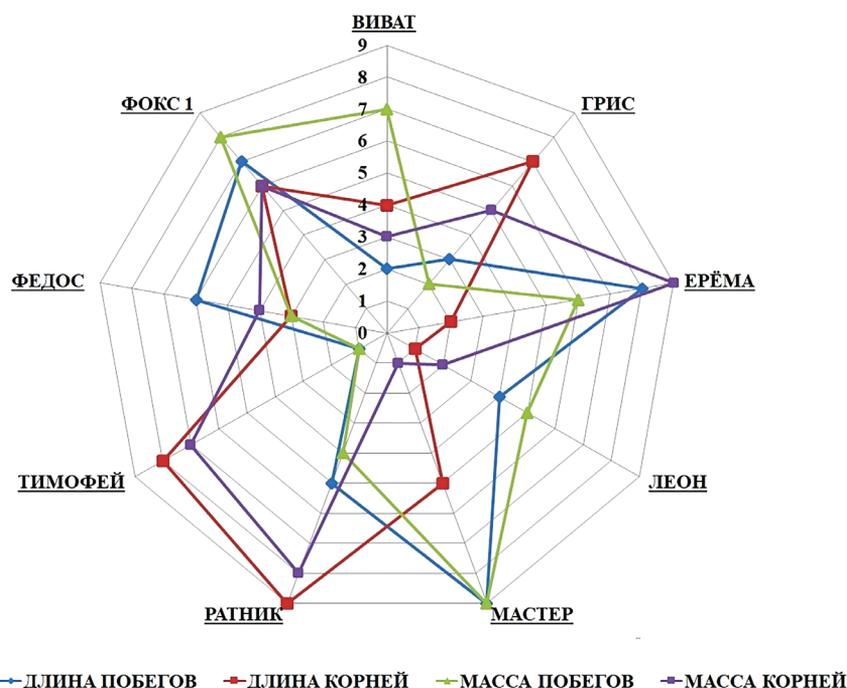
Примечание: значения выше единицы (красной черты) – стимуляция; ниже – ингибирование; около 1 – отсутствие эффекта; \* – эффект статистически значим,  $p < 0,05$

**Fig. 1.** The effect of gamma irradiation of barley seeds by dose of 20 Gy on morphological indicators of seedlings (A – shoot lengths; Б – root lengths; В – shoot weight; Г – root weight)

Note: values above one (red line) – stimulation; lower – inhibition; about 1 – no effect; \* – the effect is statistically significant,  $p < 0.05$

Выраженность выявленных эффектов была оценена по 9-балльной шкале. На рисунке 2 графически представлены результаты ранжирования сортов по показателям длины и массы корней и побегов после облучения семян. Так, например, сорту Мастер

был присвоен максимальный 9-й ранг по показателям длины и массы побега. Сорта Ерема и Ратник получили наивысший ранг по массе и длине корней соответственно. Сорт Леон ни по одному из показателей не присвоено ранга выше 5 (рис. 2).



**Рис. 2.** Ранги от 1 до 9, присвоенные сортам по показателям длины и массы корней и побегов, исходя из характера морфологического ответа проростков на облучение семян (9 – максимальная стимуляция; 1 – максимальное ингибирование)

**Fig. 2.** The ranks from 1 to 9 assigned to the varieties according to the length and weight of roots and sprouts, based on the nature of the morphological response of sprouts on seed irradiation (9 – maximum stimulation; 1 – maximum inhibition)

По сумме рангов четырех морфологических показателей сорт Фокс 1 получил максимальную позицию при ранжировании (табл. 1). Упомянутые выше сорта Ратник, Ерема и Мастер имели по крайней мере одну максимальную оценку по какому-либо морфологическому показателю и заняли 2–4-е места в оценке

ответа на облучение. Для сорта Леон сумма рангов оказалась наименьшей (9-е место в оценке ответа на облучение). Остальные сорта (Грис, Тимофей, Виват и Федос) по сумме рангов заняли 5–8-е места соответственно (табл. 1).

### 1. Результаты ранжирования сортов *H. vulgare* по выраженности эффекта гамма-облучения оригинальных семян дозой 20 Гр

#### 1. The ranking results of the varieties *H. vulgare* according to the effect of gamma irradiation with a dose of 20 Gy on the original seeds

Сорт	Сумма рангов	Наблюдаемый эффект облучения по сумме рангов	Оценка сорта
ФОКС 1	27	Стимуляция	1
РАТНИК	26	Стимуляция	2
ЕРЕМА	25	Стимуляция	3
МАСТЕР	24	Стимуляция	4
ГРИС	17	Нет эффекта	5
ТИМОФЕЙ	17	Нет эффекта	6
ВИВАТ	16	Нет эффекта	7
ФЕДОС	16	Нет эффекта	8
ЛЕОН	12	Ингибирование	9

Примечание: результаты ранжирования базируются на сумме рангов, присвоенных сортам по каждому из морфологических показателей.

Таким образом, по результатам ранжирования было установлено, что для сортов Фокс 1, Ратник, Ерема и Мастер доза облучения в 20 Гр является стимулирующей, причем у сорта Фокс 1 наблюдался максимальный суммарный стимулирующий эффект. Напротив, у сорта Леон зафиксировано ингибирование роста. Морфологические параметры проростков сортов Грис, Тимофей, Виват и Федос не отличались от таковых у необлученных семян (табл. 1). Данные, приведенные на рисунках 1 и 2, демонстрируют принципиальную возможность ранжирования изученных сортов по радиочувствительности.

Известно, что стимулирующее действие гамма-излучения в низких дозах чаще наблюдают в случаях, когда качество семян ниже оригинальных, а положительный эффект облучения проявляется сильнее на семенах первой и последующих репродукций (Geras'kin et al., 2017.). Однако высокая гетерогенность этих репродукций затрудняет воспроизводство стимулирующего эффекта и его детальное изучение, поэтому выявление сортов, у которых облучение ори-

гинальных семян также приводит к индукции стимулирующего эффекта, является необходимым этапом на пути к расшифровке молекулярных основ эффекта радиационной стимуляции. В данной работе на оригинальных семенах было показано, что у проростков четырех из девяти сортов ячменя наблюдается стимуляция ростовых процессов после облучении их семян в дозе 20 Гр.

**Выводы.** Девять сортов озимого и ярового ячменя ранжированы по выраженности эффекта гамма-облучения оригинальных семян в дозе 20 Гр на основе морфологического анализа выросших из облученных семян проростков. Выявлены контрастные по чувствительности к данной дозе сорта: для четырех сортов (Фокс 1, Ратник, Ерема и Мастер) наблюдается стимулирующее действие облучения, а для сорта Леон – ингибирование роста. Контрастные сорта будут использованы в дальнейших экспериментах по поиску молекулярных механизмов стимулирующего действия низкодозового гамма-облучения.

#### Библиографические ссылки

1. Гераскин С. А., Чурюкин Р. С., Казакова Е. А. Модификация  $\gamma$ -облучением семян развития растений ячменя на ранних этапах онтогенеза // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 6. С. 607–615. DOI: 10.7868/S0869803115060065.
2. Филиппов Е. Г. Эффективность возделывания новых сортов ячменя // Зерновое хозяйство России. 2013. № 4. С. 36–40.
3. Araújo S. S., Paparella S., Dondi D., Bentivoglio A., Carbonera D., Balestrazzi A. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7:646. DOI: 10.3389/fpls.2016.00646.
4. Geras'kin S., Churyukin R., Volkova P. Radiation exposure of barley seeds can modify the early stages of plants' development // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 171. Pp. 71–83. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.06.008.
5. Majeed A., Muhammad Z., Ullah R., Ali H. Gamma irradiation i: Effect on germination and general growth characteristics of plants // *Pakistan Journal of Botany*. 2018. Vol. 50, no. 6. Pp. 2449–2453.
6. Volkova P. Yu., Duarte G. T., Soubigou-Taconnat L., Kazakova E. A., Pateyron S., Bondarenko V. S., Bitarishvili S. V., Makarenko E. S., Churyukin R. S., Lychenkova M. A., Gorbatova I. V., Meyer C., Geras'kin S. A. Early response of barley embryos to low- and high-dose gamma irradiation of seeds triggers changes in the transcriptional profile and an increase in hydrogen peroxide content in seedlings // *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2019. DOI: 10.1111/jac.12381.
7. Wiegant F. A., de Poot S. A., Boers-Trilles V. E., Schreij A. M. Hormesis and cellular quality control: A possible explanation for the molecular mechanisms that underlie the benefits of mild stress // *Dose Response*. 2013. Vol. 11. Pp. 413–430. DOI: 10.2203/dose-respo nse.12-030.

#### References

1. Geras'kin S. A., Churyukin R. S., Kazakova E. A. Modifikaciya  $\gamma$ -oblucheniem semyan razvitiya rastenij yachmenya na rannih etapah ontogeneza [Modification of barley seeds by  $\gamma$ -radiation in the early stages of ontogenesis] // *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2015. T. 55, № 6. S. 607–615. DOI: 10.7868/S0869803115060065.
2. Filippov E. G. Effektivnost' vozdelevaniya novyh sortov yachmenya [The efficiency of cultivation of the new barley varieties] // *Zernovoe hozyajstvo Rossii*. 2013. № 4. S. 36–40.
3. Araújo S. S., Paparella S., Dondi D., Bentivoglio A., Carbonera D., Balestrazzi A. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7:646. DOI: 10.3389/fpls.2016.00646.
4. Geras'kin S., Churyukin R., Volkova P. Radiation exposure of barley seeds can modify the early stages of plants' development // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 171. Pp. 71–83. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.06.008.
5. Majeed A., Muhammad Z., Ullah R., Ali H. Gamma irradiation i: Effect on germination and general growth characteristics of plants // *Pakistan Journal of Botany*. 2018. Vol. 50, no. 6. Pp. 2449–2453.
6. Volkova P. Yu., Duarte G. T., Soubigou-Taconnat L., Kazakova E. A., Pateyron S., Bondarenko V. S., Bitarishvili S. V., Makarenko E. S., Churyukin R. S., Lychenkova M. A., Gorbatova I. V., Meyer C., Geras'kin S. A. Early response of barley embryos to low- and high-dose gamma irradiation of seeds triggers changes in the transcriptional profile and an increase in hydrogen peroxide content in seedlings // *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2019. DOI: 10.1111/jac.12381.
7. Wiegant F. A., de Poot S. A., Boers-Trilles V. E., Schreij A. M. Hormesis and cellular quality control: A possible explanation for the molecular mechanisms that underlie the benefits of mild stress // *Dose Response*. 2013. Vol. 11. Pp. 413–430. DOI: 10.2203/dose-respo nse.12-030.

Поступила: 26.12.19; принята к публикации: 19.03.20.

**Критерии авторства.** Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Авторский вклад.** Казакова Е. А. – проведение морфологических анализов, подготовка рукописи; Макаренко Е. С. – проведение морфологических анализов; Подлуцкий М. С. – выполнение статистической

обработки результатов; Донцова А. А. – выполнение полевых опытов и сбор данных, подготовка рукописи; Битаришвили С. В., Лыченкова М. А., Горбатова И. В. – проведение морфологических анализов; Филиппов Е. Г., Донцов Д. П. – выполнение полевых опытов и сбор данных; Чиж Т. В., Снегирев А. С. – облучение семян; Волкова П. Ю. – концептуализация и проектирование исследования, анализ данных и интерпретация, подготовка рукописи.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**