
НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 633.16:581.14:581.19.614.875:539.1.047

ОТВЕТНАЯ РЕАКЦИЯ ЯЧМЕНЯ ЯРОВОГО НА УФ- И γ -ОБЛУЧЕНИЕ

© 2024 г. О. А. Гусева*, П. Н. Цыгвинцев, А. Н. Павлов

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Обнинск, Россия

*E-mail: gusevaoks65@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

В двух вегетационных экспериментах на растениях ячменя изучено влияние раздельного и сочетанного УФ-В-, УФ-А- и γ -облучения в разных дозах для сортов “Зазерский 85” и “Владимир”. У растений оценивали содержание флавоноидов, фотосинтезирующих пигментов, показатели морфологии и урожайность. Суточная доза хронического УФ-В-облучения составляла 9 кДж/м², хронического УФ-А – от 7.2 до 72 кДж/м², разового γ -облучения – 2 и 4 Гр. Показано, что сорта ячменя ярового “Зазерский 85” и “Владимир” различаются в чувствительности к хроническому УФ-В-облучению. При прогнозах негативного влияния УФ-В-излучения на растения необходимо учитывать и существующий уровень УФ-А-излучения, поскольку их действие не аддитивно. Стимуляция роста биомассы при хроническом УФ-облучении может сопровождаться угнетением урожайности растений. Реакция растений ячменя на γ -облучение может существенно зависеть от уровня УФ-(A+B)-излучения. В целом дозозависимое влияние хронического УФ- и γ -облучения можно рассматривать как переход от аустресса к дистрессу и его необратимому срыву. Данные настоящего исследования могут быть актуальны для программ по выведению новых сортов ячменя ярового, устойчивого к повышенным уровням солнечного УФ-излучения.

Ключевые слова: ультрафиолетовое облучение, γ -облучение, ячмень, урожайность, биомасса, флавоноиды, хлорофиллы

DOI: 10.31857/S0869803124060075, **EDN:** NDGAVT

Одним из глобальных экологических факторов, действующих на фитоценозы природного и антропогенного происхождения, является ультрафиолетовое (УФ) излучение. В 80-е гг. прошлого столетия было обнаружено снижение содержанием озона в стратосфере, особенно выраженное в южной полярной области. Снижение концентрации атмосферного озона вызывает увеличение излучения на поверхность земли от солнечного спектра в УФ-В-диапазоне [1]. На современном этапе биосферных явлений, в результате появления в зимне-весенний период “озоновых дыр” в Арктике [2], отмеченная тенденция может увеличиваться. Подобный феномен может не только приводить к резкому и кратковременному повышению УФ-облучения растений, но и к хроническому снижению толщины озонового слоя в boreальной области северного полушария [3]. Несмотря на то, что УФ-В-излучение на поверхности земли является незначительной составляющей солнечного спектра, оно, тем не менее, оказывает губительное влияние на рост, морфологию, цветение, опыление,

фотосинтез, а также на метаболические процессы растений [4].

Другим глобальным экологическим фактором, который способен оказывать влияние на природные фитоценозы и агроценозы, является ионизирующее излучение (ИИ). Кванты γ -излучения обладают большей энергией по сравнению с УФ, с большей проникающей способностью [5]. γ -Излучение влияет на метаболизм растительных клеток, включая регуляцию антиоксидантной системы и накопление фенольных соединений [6, 7], скорость прорастания семян [8, 9] и другие морфофизиологические изменения [10]. При изучении влияния острого и хронического ИИ в малых дозах основное внимание сосредоточено на изучении морфометрических и генетических изменений у растений [11]. В то же время информации об изменении активности физиологических параметров под влиянием малых доз ИИ достаточно мало. В некоторых исследованиях представлены данные о влиянии малых доз ИИ

на фотосинтез. Так, у проростков арабидопсиса показано повышение таких параметров световой стадии фотосинтеза как квантовый выход фотосистемы II (Y(II)) и скорость переноса электронов по цепи (ETR) при сниженном нефотохимическом тушении флуоресценции (NPQ) и неизменном содержании хлорофилла [12, 13]. При хроническом облучении растений ряски (*Lemna minor* L.) зарегистрировано увеличение экспрессии большого количества связанных с фотосинтезом генов и максимального уровня ассимиляции [14].

Сходство физиологического действия УФ-В и γ -облучения на вегетирующие растения позволяют предположить возможность их синергизма. Поэтому целью настоящей работы являлось изучение ответной реакции двух сортов ячменя ярового на хроническое УФ-А- и УФ-В-облучение, сочетанное с острым γ -облучением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Влияние УФ-А, УФ-В и γ -облучения на растения ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) изучали в двух вегетационных экспериментах. На ячмене сорта “Зазерский 85” оценивали сравнительное влияние хронического УФ-В и УФ-А облучения, на сорте “Владимир” – сочетанное действие хронического УФ и острого γ -облучения. Растения выращивали в экспериментальной теплице с поликарбонатным покрытием в вегетационных сосудах с дерново-подзолистой супесчаной почвой из предварительно проращенных семян, от 13 до 15 растений на сосуд, в трехкратной повторности на один исследуемый вариант и контроль.

Хроническое УФ-А-облучение осуществлялось с помощью ламп Black Light BLUE фирмы Philips, а УФ-В-облучение – с помощью ламп ЛЭР-40 от момента формирования 3–4 настоящих листьев до фазы молочно-восковой спелости. Необходимо отметить, что поликарбонатное покрытие теплицы полностью экранирует солнечное УФ-А- и УФ-В-излучение, в то время как используемые в исследовании лампы ЛЭР-40 имеют максимум излучения на 320 нм, таким образом, в их спектре присутствуют почти в равной мере как УФ-В, так и УФ-А-излучение. Длительность УФ-облучения растений в первом и втором вегетационном экспериментах составляла 5 часов в сутки. Мощность УФ-излучения определяли с помощью спектрофотометра AvaSpec 2048 и программного обеспечения AvaSoft 6.2.

Во втором эксперименте по достижению фазы выход в трубку растения подвергали острому γ -облучению в дозах 2 и 4 Гр при мощности 18 Гр/ч, которое проводили с помощью установки ГУР-120 с источником γ -квантов ^{60}Co , расположенной на территории НИЦ “Курчатовский институт” – ВНИИРАЭ (РФ, Калужская обл., г. Обнинск). Суточные дозы и их мощность для двух вегетационных экспериментов представлены в табл. 1 и 2.

Отбор проб для определения биохимических параметров проводили на стадии выхода в трубку, во втором эксперименте – через сутки после γ -облучения. С помощью спектрофотометра UNICO-1201 (ООО “ЮНИКО-СИС”, Санкт-Петербург, РФ) спектрофотометрическим методом определялось содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов с выделением в этаноле 96% по методике Lichtenhaler H. K. et al. [15], флавоноидов – по методике Tevini M. et al. [16]. Измерение морфологических параметров и урожайность двух сортов ячменя ярового оценивали по достижении растений стадии технической спелости.

Статистическую обработку данных проводили с помощью стандартных методов биометрии: статистически значимое отличие от контроля ($p < 0.05$, $p < 0.01$; $p < 0.001$) рассчитывали на основе *t*-критерия Стьюдента для средних.

Таблица 1. Суточные дозы и мощности дозы хронического УФ-облучения, ($\text{kДж}/\text{м}^2$) / ($\text{Вт}/\text{м}^2$) (измерения за 2019 г.)

Table 1. Daily doses and dose rates of chronic UV-irradiation, (kJ/m^2)/ (W/m^2) (measurements for 2019)

Исследуемая группа	Вид облучения		
	лампа Black Light Blue	лампа ЛЭР-40	
		УФ-А	УФ-А
1-Контроль	0	0	0
1-1	72/4	0	0
1-2	36/2	0	0
1-3	0	18/1	18/1
1-4	0	9/0.5	9/0.5
1-5	72/4	18/1	18/1
1-6	36/2	9/0.5	9/0.5

Таблица 2. Суточные дозы и мощности дозы хронического УФ-облучения ($\text{кДж}/\text{м}^2 / \text{Вт}/\text{м}^2$) и острого γ -облучения (Гр / Гр/ч) (измерения за 2023 г.)

Table 2. Daily doses and dose rates of chronic UV-irradiation ($\text{kJ}/\text{m}^2 / (\text{W}/\text{m}^2)$) and acute γ -irradiation (Гу / Гу/ч) (measurements for 2023)

Исследуемая группа	Вид облучения			
	лампы Black Light Blue		лампы ЛЭР-40	
	УФ-А	УФ-А	УФ-В	γ
2-Контроль	0	0	0	0
2-1	7.2/0.4	0	0	0
2-2	16.2/0.9	0	0	0
2-3	0	7.2/0.4	9.0/0.5	0
2-4	0	0	0	4/18
2-5	0	0	0	2/18
2-6	7.2/0.4	7.2/0.4	9.0/0.5	0
2-7	7.2/0.4	0	0	4/18
2-8	7.2/0.4	0	0	2/18
2-9	7.2/0.4	7.2/0.4	9.0/0.5	4/18
2-10	7.2/0.4	7.2/0.4	9.0/0.5	2/18
2-11	16.2/0.9	7.2/0.4	9.0/0.5	0
2-12	16.2/0.9	0	0	4/18
2-13	16.2/0.9	0	0	2/18
2-14	16.2/0.9	7.2/0.4	9.0/0.5	4/18
2-15	16.2/0.9	7.2/0.4	9.0/0.5	2/18
2-16	0	7.2/0.4	9.0/0.5	4/18
2-17	0	7.2/0.4	9.0/0.5	2/18

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние хронического УФ-А- и УФ-В-облучения на морфологические параметры и урожайность ячменя ярового двух сортов “Зазерский 85” и “Владимир”

В первом вегетационном эксперименте при хроническом УФ-В-облучении ячменя сорта “Зазерский 85” суточная доза свыше 9 $\text{кДж}/\text{м}^2$ оказалась летальной. Так, в исследуемых группах 1-3 и 1-5 (рис. 1) растения погибли сразу на фазе третьего листа при дозе 18 $\text{кДж}/\text{м}^2$ УФ-В-из-

лучения. При меньшей дозе УФ-В-облучения (9 $\text{кДж}/\text{м}^2$) растения в группе 1-4 погибли на фазе выход в трубку. В то же время при такой же дозе хронического УФ-В-облучения в группе 1-6, где дополнительно суточный уровень УФ-А-облучения составлял 45 $\text{кДж}/\text{м}^2$, отдельные растения ячменя были способны дать урожай зерна.

Анализ морфологических параметров показал (табл. 3), что хроническое УФ-А-облучение растений ячменя при суточной дозе 36 $\text{кДж}/\text{м}^2$ (группа 1-2), привело к статистически значимому повышению ($p < 0.001$) высоты ячменя на 8%. Величина площади листьев при этом достоверно увеличилась ($p < 0.05$) на 11%. В группах 1-4 и 1-6 при сочетанном действии УФ-А- и УФ-В-облучения, высота растения и площадь листьев статистически значимо ($p < 0.001$) снизилась по сравнению с контролем (табл. 3). При этом эффект снижения был более выражен в группе 1-4, где растения подвергали только УФ-В-облучению.

Для всех исследуемых вариантов было отмечено статистически значимое снижение числа продуктивных стеблей (табл. 4), хроническое УФ-А-облучение в группах 1-2 и 1-1 приводило к уменьшению числа продуктивных стеблей на 13 и 39% относительно контроля соответственно. Присутствие УФ-В-облучения в группе 1-6 привело к значительному снижению числа стеблей – на 53% относительно контроля. Анализ структуры урожая показал (табл. 4), что при хроническом УФ-А-облучении в группах 1-2 и 1-1 число зерен в колосе главного стебля статистически значимо ($p < 0.001$) уменьшалось на 12% и на 30%, в боковом стебле – на 67% и на 91% относительно контроля соответственно. Было выявлено также снижение других показателей урожайности при хрониче-

Таблица 3. Морфологические показатели растений ячменя сорта “Зазерский 85” при хроническом УФ-облучении

Table 3. Morphological parameters of barley plants of the variety “Zazersky 85” under chronic UV-irradiation)

Вариант	Высота растения, см	Площадь листьев, дм^2
1-Контроль	62.1 ± 0.8	88.4 ± 2.4
1-1	64.3 ± 1.6	81.3 ± 4.5
1-2	$67.1 \pm 0.9^{***}$	$98.1 \pm 3.7^*$
1-6	$54.6 \pm 2.0^{***}$	$38.3 \pm 4.9^{***}$
1-4	$39.0 \pm 2.6^{***}$	$25.0 \pm 3.5^{***}$

Примечание. Статистически значимое отличие от контроля:
 $* p < 0.05$; $** p < 0.01$; $*** p < 0.001$.



Рис. 1. Внешний вид растений ячменя сорта “Зазерский 85” в фазе кущения при хроническом УФ облучении. Слева направо представлены исследуемые группы: 1 — контроль, 1-2, 1-1, 1-6, 1-5, 1-4, 1-3.

Fig. 1. Appearance of barley plants of the Zazersky 85 variety in the tillering phase under chronic UV irradiation. From left to right the study groups are presented: 1 — control, 1-2, 1-1, 1-6, 1-5, 1-4, 1-3.

ском УФ-А-облучении. Так, масса зерна с главного колоса снижалась на 20 и 49%, а масса 1000 зерен снижалась на 9 и 32% относительно контроля в группах 1-2 и 1-1 соответственно. Сочетанное действие хронического УФ-В- и УФ-А-облучения при суточных дозах 9 и 45 кДж/м² соответственно снизило массу зерна на 70%, а массу 1000 зерен на 57% относительно контроля.

Второй вегетационный эксперимент с сортом “Владимир”, при более низких уровнях хронического УФ-В- и УФ-А-облучения, показал (табл. 5) принципиально другие групповые различия в некоторых морфологических параметрах. Было выявлено статистически значимое повышение высоты растений, общего числа стеблей и биомассы в группе 2-3 при влиянии сочетанного УФ-А- и УФ-В-облучения на 23% 25

и 28% относительно контроля соответственно. Аналогичные изменения данных параметров наблюдались в группах 2-6 и 2-11: высота растений достоверно увеличилась на 8%, общее число стеблей — на 16%, биомасса — на 14% относительно контроля. То есть, хроническое УФ-В-облучение в суточной дозе 9 кДж/м² привело не к снижению, а к увеличению общей биомассы растений. При этом сочетанное возрастание дозы УФ-А-облучения снижало данный эффект.

Следует отметить, что у ячменя сорта “Владимир” отсутствовал урожай зерна с боковых стеблей при УФ-А-облучении растений дозой свыше 7,2 кДж/м².

Увеличение отдельных морфологических параметров и сухой биомассы сочеталось со сни-

Таблица 4. Структура урожая ячменя сорта “Зазерский 85” в фазе полной спелости после хронического УФ-облучения

Table 4. Yield structure of barley variety “Zazersky 85” in the firm-ripe stage after chronic UV-irradiation

Показатель	Исследуемая группа			
	1-Контроль	1-1	1-2	1-6
Общее число стеблей, шт.	2.1 ± 0.1	1.3 ± 0.05***	1.8 ± 0.1	1.0 ± 0.1***
Число продуктивных стеблей, шт.	1.71 ± 0.08	1.08 ± 0.04***	1.26 ± 0.06***	0.82 ± 0.1***
Длина главного колоса, см	8.65 ± 0.14	6.89 ± 0.18***	8.83 ± 0.19	4.25 ± 0.4***
Число зерен в главном колосе, шт.	21.6 ± 0.4	15.1 ± 0.8***	18.9 ± 0.5***	9.1 ± 1.0***
Число зерен в боковом колосе, шт.	8.1 ± 1.1	0.7 ± 1.2***	2.7 ± 1.1***	1.4 ± 1.1***
Масса зерна с главного колоса, шт.	1.08 ± 0.02	0.54 ± 0.03***	0.86 ± 0.03***	0.32 ± 0.04***
Масса зерна с бокового колоса, шт.	0.32 ± 0.03	0.02 ± 0.03***	0.09 ± 0.04***	0.04 ± 0.04***
Масса 1000 зерен, г	48.5 ± 1.1	44.4 ± 1.1**	32.9 ± 1.4***	20.7 ± 2.2***

Примечание. Статистически значимое отличие от контроля: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Таблица 5. Морфологические параметры и структура урожая ячменя сорта “Владимир” в фазе полной спелости при хроническом УФ-облучении

Table 5. Morphological parameters and yield structure of barley variety “Vladimir” in the firm-ripe stage under chronic UV-irradiation

Показатель	Исследуемая группа					
	2-Контроль	2-1	2-2	2-3	2-6	2-11
Высота растения, см	40.5 ± 0.8	41.1 ± 1.5	45.5 ± 0.9*	49.9 ± 1.1*	43.6 ± 1.1*	43.6 ± 2.9
Общее число стеблей, шт.	1.2 ± 0.1	1.6 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.5 ± 0.2*	1.4 ± 0.2*	1.4 ± 0.1*
Число продуктивных стеблей, шт.	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.05	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.1
Длина главного колоса, см	5.0 ± 0.2	5.4 ± 0.3	5.3 ± 0.2	6.2 ± 0.8	4.4 ± 0.8	4.5 ± 0.4
Число зерен в главном колосе, шт.	8.7 ± 0.6	7.3 ± 0.8	5.9 ± 0.8*	6.1 ± 1.1	5.8 ± 0.7*	4.5 ± 0.6*
Число зерен в боковом колосе, шт.	11.5 ± 0.8	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Масса зерна с главного колоса, шт.	0.4 ± 0.08	0.3 ± 0.03	0.2 ± 0.03*	0.3 ± 0.05	0.2 ± 0.03*	0.2 ± 0.01*
Масса зерна с бокового колоса, шт.	0.3 ± 0.02	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Масса 1000 зерен, г	42.6 ± 1.3	39.2 ± 1.2	39.9 ± 0.1	42.2 ± 1.1	40.0 ± 0.9	40.0 ± 0.9
Масса соломы, г	7.0 ± 0.1	7.1 ± 0.2*	7.9 ± 0.2*	9.0 ± 0.4*	8.0 ± 0.1*	8.0 ± 0.02*

Примечание. Статистически значимое отличие от контроля: * – $p < 0.05$.

жением урожайности (табл. 5). Было выявлено снижение числа продуктивных стеблей, длины главного колоса, числа и массы зерна с главного колоса как при УФ-В-облучении, так и при его сочетанном действии с УФ-А (группы 2-3, 2-6 и 2-11). Также наблюдалось снижение числа продуктивных стеблей в этих группах на 23% относительно контроля. На фоне хронического УФ-В-облучения в дозе 9 кДж/м² при максимальных дозах УФ-А-облучения 14,4 и 23,4 кДж/м² (группы 2-6 и 2-11) число зерен достоверно сни-

зилось на 34% и 48%, соответственно, а масса зерна главного колоса – на 50% относительно контроля.

На рис. 2 представлены фото главного колоса растений ячменя сорта “Владимир” при влиянии как сочетанного хронического УФ-В- и УФ-А-облучения. По фото наглядно видно, что вследствие деформации и неправильного формирования главного колоса, наблюдалось отсутствие урожая зерна.

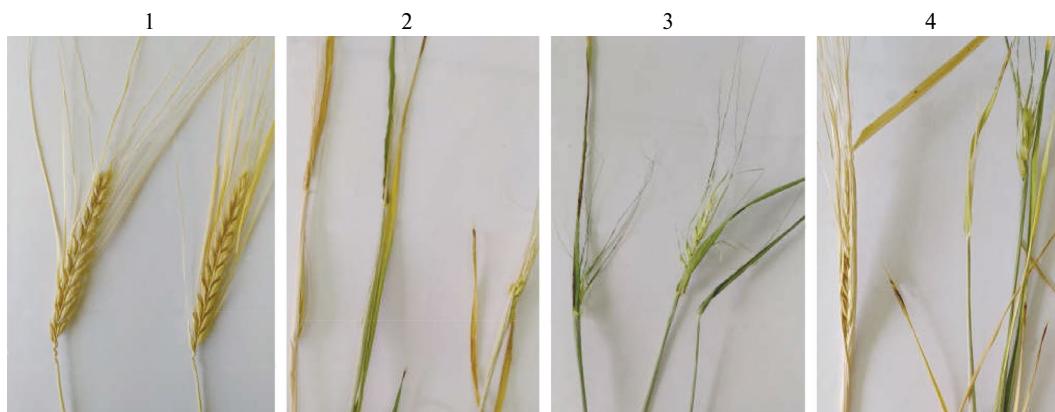


Рис. 2. Внешний вид главного колоса ячменя сорта “Владимир” при облучении растений УФ-В и сочетанным УФ (A+B), где 1 – 2-контроль; 2 – группа 2-3; 3 – группа 2-11; 4 – группа 2-6.

Fig. 2. Appearance of the main ear of barley variety “Vladimir” when plants are irradiated with UV-B and combined UV (A+B), where 1 – 2-control; 2 – group 2-3; 3 – group 2-11; 4 – group 2-6).

Содержание флавоноидов в листьях ячменя при хроническом УФ-облучении

Статистически значимое увеличение концентрации флавоноидов в листьях ячменя было выявлено при УФ-В-облучении (группы 1-4, 1-6, 2-3, 2-6 и 2-11 на рис. 3). При этом в сочетании с хроническим УФ-А-облучением эффект был тем менее выражен, чем выше была доза УФ-А. Стоит обратить внимание и на более высокий уровень содержания флавоноидов в контроле сорта “Владимир” по сравнению с сортом “Зазерский 85”. Вероятно, этим объясняется различная устойчивость этих сортов к действию хронического УФ-В-облучения.

Содержание хлорофиллов а и b, каротиноидов в листьях ячменя при действии хронического УФ-облучения

Анализ содержания хлорофиллов и каротиноидов (табл. 6) в листьях ячменя показал статистически значимое снижение показателей при увеличении интенсивности УФ-облучения для сорта “Зазерский 85”. Так, содержание хлорофилла *a* в группах 1-2 и 1-1 снижалось на 11% и 14%, а в группе 1-4 на 50% относительно контроля. Аналогичным образом, снижалось содержание хлорофилла *b*. При сочетанном действии УФ-А- и УФ-В-облучения в группе 1-6 можно отметить, что дополнительное УФ-А-облучение частично нивелировало негативное влияние УФ-В на содержание фотосинтетических пигментов в ли-

стях ячменя – показатели в 1-6 группе ближе к контролю, чем в группе 1-4.

Для ячменя сорта “Владимир” (табл. 6) статистически значимое ($p < 0.05$) снижение содержания хлорофиллов наблюдалось для групп 2-1 и 2-6, не выявляя взаимосвязи с дозами УФ-облучения и, вероятно, данное отклонение является каким-то артефактом наблюдения. При этом обращает на себя внимание также более высокая концентрация всех фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя сорта “Владимир” по сравнению с сортом “Зазерский 85”.

Реакция растений ячменя в ответ на острое γ -облучение

Во втором вегетационном эксперименте на фоне хронического УФ-облучения ячменя сорта “Владимир” проводили дополнительное γ -облучение по достижении растений фазы выход в трубку.

Анализ полученных данных показал (табл. 7) статистически значимое дозозависимое увеличение ($p < 0.05$) содержания флавоноидов на 10 и 17% в группах 2-5 и 2-4 относительно контроля, соответственно. В группе 2-12 (на фоне хронического УФ-А-облучения) при дозе 4 Гр также отмечено статистически значимое ($p < 0.05$) увеличение содержания флавоноидов на 21% относительно контроля. При этом доза 2 Гр (группа 2-13)

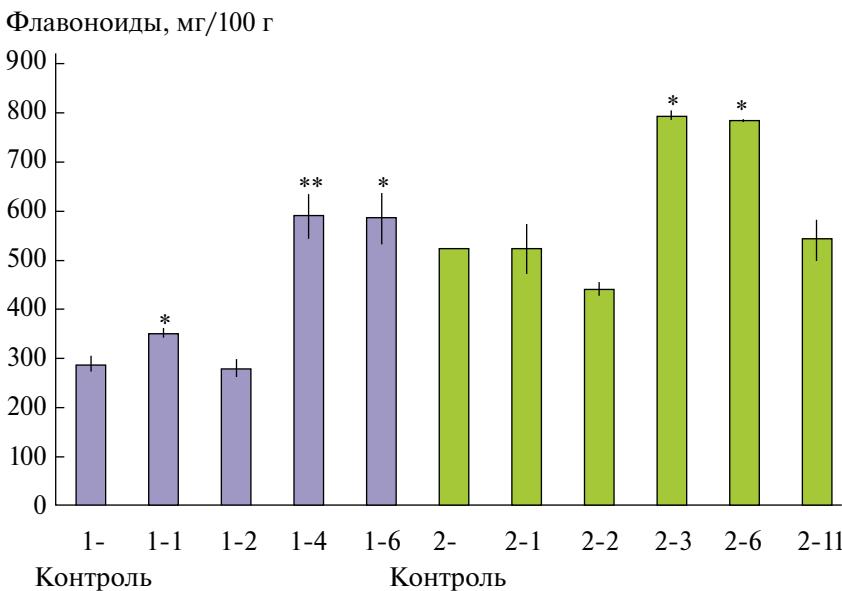


Рис. 3. Содержание флавоноидов в листьях ячменя при хроническом УФ облучении.

Примечание. Фиолетовым цветом обозначены данные для сорта ячменя “Зазерский 85”, зеленым цветом – для сорта ячменя “Владимир”. Статистически значимое отличие от контроля: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Fig. 3. Content of flavonoids in barley leaves under chronic UV-irradiation)

Note. The data for the barley variety “Zazerskiy 85” are shown in purple, and for the barley variety “Vladimir” in green. Statistically significant difference from the control: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Таблица 6. Содержание фотосинтезирующих пигментов в листьях двух сортов ячменя при влиянии хронического УФ-излучения

Table 6. Content of photosynthetic pigments in leaves of two varieties of barley under the influence of chronic UV-irradiation

Исследуемая группа	Хлорофилл <i>a</i> , мг/100 г	Хлорофилл <i>b</i> , мг/100 г	Каротиноиды, мг/100 г
1-Контроль	34 ± 1	14 ± 0.5	7 ± 0.2
1-1	26 ± 0.3***	10 ± 0.1**	6 ± 0.1**
1-2	31 ± 0.1**	12 ± 0.1*	6 ± 0.1*
1-4	17 ± 0.3***	7 ± 0.3***	5 ± 0.1***
1-6	25 ± 1***	10 ± 0.4**	6 ± 0.03**
2-Контроль	99 ± 5	43 ± 2	19 ± 1
2-1	69 ± 1*	30 ± 0.4*	14 ± 0.2*
2-2	100 ± 1	44 ± 0.3	20 ± 0.3
2-3	104 ± 1	38 ± 1	23 ± 0.04*
2-6	37 ± 5*	37 ± 2	24 ± 1*
2-11	97 ± 4	29 ± 4	23 ± 0.5

Примечание. Статистически значимое отличие от контроля:
* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

также приводила к некоторому увеличению содержания флавоноидов. Напротив, на фоне хронического УФ-В-облучения, дополнительное γ -облучение приводило к статистически значимому ($p < 0.05$) снижению содержания флавоноидов в группах 2-17 и 2-16, 2-9, 2-15 на 54 и 65, 13, 47% относительно контроля соответственно.

При анализе данных по содержанию фотосинтезирующих пигментов (табл. 7), были отмечены статистически значимые ($p < 0.05$) отклонения в содержании хлорофилла *a* в отдельных группах. Но, как в случае с действием УФ, данные отклонения не согласуются ни с дозами, ни с видом облучения.

При воздействии на растения ячменя сорта «Владимир» на стадии выход в трубку γ -излучением в дозе 2 Гр, в отсутствии хронического УФ-облучения, наблюдалось статистически значимое ($p < 0.05$) повышение средней высоты растений на 8% относительно контроля (табл. 8). При этом сочетанное УФ-А- (16.2 кДж/м²) и γ -облучение (2 Гр) в группе 2-13 способствовало статистически значимому ($p < 0.05$) снижению средней высоты на 6% относительно контроля.

Таблица 7. Содержание флавоноидов и фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя сорта “Владимир” при остром γ -облучении и хроническом УФ-облучении в фазе выхода в трубку

Table 7. Content of flavonoids and photosynthetic pigments in leaves of barley variety “Vladimir” under acute γ -irradiation and chronic UV-irradiation in the booting phase

Экспериментальная группа (Гр)	Флавоноиды, мг/100г	Хлорофилл <i>a</i> , мг/100 г	Хлорофилл <i>b</i> , мг/100 г	Каротиноиды, мг/100 г
2-Контроль (0)	524 ± 1	99 ± 5	43 ± 2	19 ± 1
2-5 (2)	577 ± 1*	81 ± 6	36 ± 2	16 ± 1
2-4 (4)	614 ± 7*	89 ± 2*	35 ± 4	17 ± 1
2-1 (0)	524 ± 49	69 ± 1	30 ± 0.4	14 ± 0.2
2-8 (2)	521 ± 30	75 ± 1	33 ± 6	15 ± 2
2-7 (4)	588 ± 10	98 ± 1*	43 ± 0.3*	20 ± 0.3*
2-2 (0)	443 ± 14	100 ± 1	44 ± 0.3	20 ± 0.3
2-13 (2)	471 ± 6	72 ± 4*	32 ± 0.1*	14 ± 2.4
2-12 (4)	537 ± 0.1*	97 ± 2	43 ± 0.4	19 ± 0.4
2-3 (0)	796 ± 8	104 ± 1	23 ± 1	23 ± 0.1
2-17 (2)	361 ± 47*	98 ± 6	30 ± 1	23 ± 1
2-16 (4)	278 ± 56*	100 ± 2	36 ± 2	22 ± 2
2-6 (0)	786 ± 1	37 ± 5	37 ± 2	24 ± 1
2-10 (2)	791 ± 7	86 ± 4*	31 ± 2	20 ± 1
2-9 (4)	681 ± 4*	118 ± 2*	42 ± 1	26 ± 1
2-11 (0)	544 ± 42	97 ± 4	29 ± 4	23 ± 0.5
2-15 (2)	288 ± 34*	94 ± 0.1	34 ± 0.1	21 ± 0.4
2-14 (4)	540 ± 89	112 ± 2	41 ± 0.4	25 ± 0.4

Примечание. Группы без воздействия γ -излучения являются контрольными.

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

В то же время сочетанное УФ-А- (7.2 кДж/м²) и γ -облучение (2 Гр) в группе 2-13 способствовало статистически значимому ($p < 0.05$) повышению числа зерен в главном колосе на 36% относительно контроля. Добавление УФ-В в сочетании с γ -излучением (доза 4 Гр) в группе 2-16 привело уже к статистически значимому ($p < 0.05$) снижению числа зерен в главном колосе на 49%. При этом в группах 2-15 и 2-14 (сочетанное

Таблица 8. Морфологические параметры и структура урожая ячменя сорта “Владимир” в фазе полной спелости при остром γ - и хроническом УФ-облучении**Table 8.** Morphological parameters and structure of the harvest of barley variety “Vladimir” in the firm-ripe stage under acute γ - and chronic UV-irradiation

Эксперименталь- ная группа (Гр)	Средняя высота, см	Число продуктивных стеблей, шт.	Число зерен главного колоса, шт.	Масса зерна главного колоса, г	Масса соломы, г
2-Контроль (0)	40.5 ± 0.8	1.1 ± 0.1	8.7 ± 0.6	0.4 ± 0.03	7.0 ± 0.1
2-5 (2)	43.7 ± 1.1*	1.3 ± 0.1	10.5 ± 0.9	0.4 ± 0.04	8.0 ± 0.3*
2-4 (4)	43.3 ± 1.3	1.1 ± 0.1	9.1 ± 0.9	0.4 ± 0.04	7.5 ± 0.1*
2-1 (0)	41.1 ± 1.5	1.1 ± 0.1	7.2 ± 0.8	0.2 ± 0.03	7.1 ± 0.2
2-8 (2)	42.0 ± 1.0	1.1 ± 0.1	6.6 ± 0.7	0.3 ± 0.03	7.9 ± 0.1*
2-7 (4)	40.8 ± 0.9	1.0 ± 0.1	5.7 ± 0.7	0.2 ± 0.03	7.9 ± 0.1*
2-2 (0)	45.5 ± 0.9	1.0 ± 0.1	5.9 ± 0.8	0.2 ± 0.03	7.9 ± 0.2
2-13 (2)	42.6 ± 1.0*	1.0 ± 0.1	8.0 ± 0.6*	0.3 ± 0.02	7.9 ± 0.04
2-12 (4)	43.7 ± 0.8	0.7 ± 0.1	4.4 ± 0.9	0.2 ± 0.03	8.4 ± 0.2
2-3 (0)	49.9 ± 1.1	0.8 ± 0.1	6.1 ± 1.1	0.3 ± 0.05	9.0 ± 0.4
2-17 (2)	48.2 ± 1.3	0.8 ± 0.1	5.9 ± 0.8	0.2 ± 0.05	9.4 ± 0.4
2-16 (4)	48.5 ± 1.3	0.6 ± 0.1	3.1 ± 0.8*	0.2 ± 0.03	10.4 ± 0.1*
2-6 (0)	43.6 ± 1.1	0.8 ± 0.1	5.8 ± 0.7	0.2 ± 0.03	8.0 ± 0.1
2-10 (2)	43.6 ± 1.3	0.8 ± 0.1	5.2 ± 1.0	0.2 ± 0.04	8.0 ± 0.2
2-9 (4)	43.6 ± 1.4	0.8 ± 0.1	5.6 ± 1.1	0.2 ± 0.04	8.0 ± 0.2
2-11 (0)	43.6 ± 2.9	0.8 ± 0.1	5.8 ± 0.6	0.2 ± 0.01	8.0 ± 0.02
2-15 (2)	42.1 ± 1.0	0	0	0	7.2 ± 0.1*
2-14 (4)	38.3 ± 2.3	0	0	0	6.1 ± 0.02*

Примечание. Группы без воздействия γ -излучения являются контрольными.

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

УФ-А-, УФ-В- и γ -облучение) наблюдалось полное отсутствие продуктивных стеблей и урожая зерна с главного колоса.

При УФ-А-облучении в двух исследуемых дозах и УФ-В-облучении масса соломы в группах 2-5 и 2-4, 2-8 и 2-7, 2-16 статистически значимо ($p < 0.05$) увеличивалась на 14 и 7, на 11, 16% в отличие от контроля соответственно. В то же время при сочетанном УФ-А-, УФ-В- и γ -облучении в группах 2-15 и 2-14 наблюдалось статистически значимое ($p < 0.05$) снижение массы соломы на 10 и 24% относительно контроля, соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщая результаты экспериментов можно отметить, что для ячменя сорта “Зазерский 85” при хроническом УФ-В-облучении суточная доза свыше 9 кДж/ m^2 оказалась летальной. В то же время сочетанное действие хронического УФ-А-облучения в суточной дозе 45 кДж/ m^2 ослабляло данный эффект, отдельные растения ячменя были способны дать урожай зерна. В целом, хроническое УФ-А-облучение растений ячменя при суточной дозе до 36 кДж/ m^2 стимулировало нарастание биомассы растений, одновременно угнетая генеративную функцию, что приводило

к уменьшению урожайности. Сочетанное действие хронического УФ-В- и УФ-А-облучения при суточных дозах 9 и 45 кДж/м² соответственно снизило массу зерна на 70%, а массу 1000 зерен на 57% относительно контроля.

Сорт “Владимир” показал принципиально другие реакции в ответ на хроническое УФ-В- и УФ-А-облучение. Хроническое УФ-В-облучение в суточной дозе 9 кДж/м² привело не к снижению, а к увеличению общей биомассы растений. При этом сочетанное возрастание дозы УФ-А-облучения снижало данный эффект.

Негативное воздействие УФ-В-излучения на порядок существеннее, чем УФ-А, что соответствует спектру действия Колдвела и Флинта [17], однако при их совместном действии эффект оказывается значительно ниже, хотя эффективная доза, рассчитанная по спектру действия, была бы выше, суммируя воздействие УФ-В- и УФ-А-излучения. Возможно, данный парадокс возникает из-за энергетического подхода к определению спектра действия ультрафиолета. Если рассматривать не энергию, а количество фотонов в общем потоке, то понятно, что при добавлении значительной доли УФ-А-излучения к УФ-В, удельное количество высокоэнергетических фотонов УФ-В значительно падает, что может снижать вероятность их попадания на акцепторы и, соответственно, снижать уровень негативного воздействия.

Увеличение концентрации флавоноидов в листьях ячменя было выявлено при хроническом УФ-В-облучении для обоих сортов ячменя. При этом в сочетании с хроническим УФ-А-облучением эффект был тем менее выражен, чем выше была доза УФ-А. Различная устойчивость сортов к действию хронического УФ-В-облучения может быть вызвана более высоким уровнем содержания флавоноидов для сорта “Владимир” по сравнению с сортом “Зазерский 85”.

Воздействие УФ-В-излучения на растительные организмы способно индуцировать биосинтез фенилпропаноидов и флавоноидов, которые поглощают УФ-излучение. В эпидермисе листьев фенольные соединения уменьшают окислительное повреждение и защищают фотосинтетический аппарат, препятствуя проникновению УФ-В-излучения во внутренние фотосинтетические слои. Фенольные соединения и флавоноиды в меньшей степени подвергаются катаболическим превращениям и, поэтому, дольше сохраняют информацию о воздействии стресса

на растительный организм [18]. Количество содержание фотосинтетических пигментов может являться одним из индикаторов влияния стрессового фактора и показывает адаптацию растений, так как фотосинтетический аппарат достаточно чувствителен к воздействиям излучения солнечного спектра, в частности к УФ-излучению [19]. Снижение интенсивности фотосинтеза под воздействием УФ-В-излучения (наряду с другими влияющими факторами) связывают с уменьшением содержания фотосинтетических пигментов [20]. Такие пигменты как каротиноиды обеспечивают защиту компонентов растительной клетки от влияния избыточного УФ-излучения, преобразовывая его энергию в видимый свет, что проявляется в явлении флуоресценции [21].

Значимое снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях ячменя при хроническом УФ-облучении отмечено только для сорта “Зазерский 85”. При сочетанном действии УФ-А- и УФ-В-облучения можно отметить, что дополнительное УФ-А-облучение частично нивелировало негативное влияние УФ-В на содержание фотосинтетических пигментов в листьях ячменя. При этом обращает на себя внимание также более высокая концентрация всех фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя сорта «Владимир» по сравнению с сортом “Зазерский 85”.

УФ-В-излучение способно вызывать два противоположных стресса в метаболизме растений, что тесно связано с дозой облучения [22]. В частности, облучение растений УФ-В в умеренной дозе может привести к обратимому и эластичному эустрессу (гормезису), который способствует активации вторичных метаболитов защиты растений. Когда воздействие превышает допустимое влияние, растения подвергаются необратимому и пластичному дистрессу, который приводит к метаболическому повреждению или гибели растительных клеток/тканей в экстремальных случаях. Например, в исследовании Jiao et al. [23] была выявлена оптимальная доза УФ-В-излучения – 108 кДж/м², которая оказалась способна поддерживать баланс между эустрессом и дистрессом в культурах корневых волосков лекарственного растения вайды красильной для максимального накопления флавоноидов.

γ-Облучение в дозах 2 и 4 Гр также вызывает дозозависимое увеличение содержания флавоноидов в листьях ячменя. Однако, на фоне хронического УФ-В-облучения, дополнительное γ-об-

лучение приводило к статистически значимому ($p < 0.05$) снижению содержания флавоноидов.

При облучении растений ячменя сорта “Владимир” на стадии выход в трубку γ -излучением в дозах 2 и 4 Гр наблюдалась небольшая стимуляция роста биомассы ячменя, этот эффект сохранялся и при низких уровнях хронического УФ-А-облучения. На фоне хронического УФ-В-облучения эффект стимуляции γ -излучением отсутствовал. При этом наблюдались изменения в структуре урожая, а при хроническом УФ-облучении в дозах 9.0 и 23.4 кДж/м² для УФ-В и УФ-А, соответственно, отмечена полная продуктивная гибель растений.

Биологические эффекты γ -излучения в основном обусловлены образованием свободных радикалов посредством гидролиза воды, что может привести к расширению тилакоидных мембран, изменению фотосинтеза, модуляции антиоксидантной системы, накоплению фенольных соединений и фотосинтезирующих пигментов [24]. В работе Hussein [25] было обнаружено накопление общих флавоноидов у ячменя, схожие результаты наблюдались в работе Hanafy и Akladious [26]. В листьях растений пажитника γ -излучение было обнаружено накопление свободных радикалов, которые могут действовать как сигналы стрессора, способствующие синтезу флавоноидных соединений с высокими антиоксидантными свойствами.

Более того, биосинтез флавоноидов на растении может быть связан с их антиоксидантной и защитной ролью в росте и развитии растений. Однако в нашем исследовании не наблюдалось существенных изменений в накоплении, как флавоноидов, так и фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя ярового сорта “Владимир” при γ -облучении растений на фазе выхода в трубку. Также не выявлено существенных изменений в морфологических показателях и урожайности. Увеличение содержания флавоноидов, снижение или полная потеря урожайности у сорта “Владимир” наблюдались при сочетанном влиянии всех типов облучения. Мы предполагаем, что существенный вклад в потерю урожая зерна внесло хроническое УФ-В-облучение в сочетании с максимальной дозой УФ-А-излучения. При этом растения уже находились в фазе дистресса, и дополнительное, незначительное само по себе для данного сорта, γ -облучение в дозах 2 и 4 Гр вызвало необратимые изменения, приведшие к генеративной гибели растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что два сорта ячменя ярового “Зазерский 85” и “Владимир” различаются в чувствительности к хроническому УФ-В-облучению и, возможно, данные различия определяются сортовыми особенностями в накоплении флавоноидов. При прогнозах негативного влияния УФ-В-излучения на растения необходимо учитывать и существующий уровень УФ-А-излучения, поскольку их действие не аддитивно. Стимуляция роста биомассы при хроническом УФ-облучении может сопровождаться угнетением урожайности растений. Реакция растений ячменя на γ -облучение может существенно зависеть от уровня УФ-(A+B)-излучения. В целом дозозависимое влияние хронического УФ- и γ -облучения можно рассматривать как переход от аустресса к дистрессу и его необратимому срыву. Данные настоящего исследования могут быть актуальны для программ по выведению новых сортов ячменя ярового, устойчивого к повышенным уровням солнечного УФ-излучения.

Источники финансирования: работа выполнена без целевого финансирования.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Caldwell M.M. Solar UV irradiation and the growth and development of higher plants. *Photophysiology*. 1971;6:131–177.
2. Небывалая убыль стратосферного озона в Арктике весной 2011 года. *World Meteorology Organization. Press release*. ВМО-№ 912. Женева. 5 апреля 2011. [Nebyvalaya ubyl' stratosfernogo ozona v Arktike vesnoj 2011 goda. *World Meteorology Organization. Press release*. VMO-№ 912. Zheneva. 5 aprelya 2011. (In Russ.)]
3. Zuev V.V., Zueva N.E., Korotkova E.M. The comparative analysis of observational series of total ozone content and UV-B radiation in boreal forest zones. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016;29(1):67–72. <https://doi.org/10.1134/s1024856016010152>.
4. Jansen M., Gaba V., Greenberg B. Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. *Trends Plant Sci*. 1998;3:131–135. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(98\)01215-1](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(98)01215-1).
5. Kim D.Y., Hong M.J., Park C.S., Seo Y.W. The effects of chronic radiation of gamma ray on protein expression and oxidative stress in *Brachypodium distachyon*. *Int. J. Radiat. Biol.* 2015;91(5):407–19. <http://dx.doi.org/10.3109/09553002.2015.1012307>

6. Wi S.G., Chung B.Y., Kim J-H. et al. Ultrastructural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stems after gamma irradiation. *J. Plant. Biol.* 2005;48:195–200. <https://doi.org/10.1007/bf03030408>.
7. Kim J.-H., Lee M.H., Moon Y.R. et al. Characterization of metabolic disturbances closely linked to the delayed senescence of *Arabidopsis* leaves after γ irradiation. *Environ. Exp. Bot.* 2009;67(2):363–371. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.07.001>
8. Abdel-Hady M., Okasha E., Soliman S., Talaat M. Effect of gamma radiation and gibberellic acid on germination and alkaloid production in *Atropa belladonna* L. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2008;32(3):401–405.
9. Borzouei A., Kafi M., Khazaei H. et al. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Pak. J. Bot.* 2010; 42(4):2281–2290.
10. Shah T.M., Mirza J.I., Haq M.A., Atta B.M. Induced genetic variability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) II. Comparative mutagenic effectiveness and efficiency of physical and chemical mutagens. *Pak. J. Bot.* 2008;40(2):605–613.
11. Гринберг М.А., Громова Е.Н., Гудков С.В., Воденеев В.А. Влияние хронического облучения в малых дозах на электрогенез и фотосинтетическую активность проростков гороха. *Экол. биофизика.* 2018;3(3):680–685. [Grinberg M.A., Gromova E.N., Gudkov S.V., Vodeneev V.A. Vliyanie hronicheskogo oblucheniya v malyh dozah na elektrogenez i fotosinteticheskuyu aktivnost' prorostkov goroha. *Ekologicheskaya biofizika.* 2018; 3(3): 680–685. (In Russ.).]
12. Vanhoudt N., Horemans N., Wannijn J. et al. Primary stress responses in *Arabidopsis thaliana* exposed to gamma radiation. *J. Environ. Radioact.* 2013;129:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.011>.
13. Biermans G., Horemans N., Vanhoudt N. et al. Biological effects of α -radiation exposure by 241Am in *Arabidopsis thaliana* seedlings are determined both by dose rate and 241Am distribution. *J. Environ. Radioact.* 2015;149:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.007>.
14. Van Hoeck A., Horemans N., Nauts R. et al. Lemma minor plants chronically exposed to ionising radiation: RNA-seq analysis indicates a dose rate dependent shift from acclimation to survival strategies. *Plant Science.* 2017;257:84–95. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.01.010>.
15. Lichtenhaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society of Transaction.* 1983;11:591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>.
16. Tevini M., Iwanzik W., Thoma U. Some effects of enhanced UV-B irradiation on the growth and composition of plants. *Planta.* 1981;153(4):388–394. <https://doi.org/10.1007/bf00384258>.
17. Caldwell M.M., Ballare C.L., Bornman J.F. et al. Terrestrial ecosystems increased solar radiation and interactions with other climatic factors. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2003; 2: 29–38. <https://doi.org/10.1039/b211159b>
18. Храмова Е.П., Тарасов О.В., Крылова Е.И. Влияние радиационного фактора на изменчивость биохимических показателей на примере растений *Pentaphylloides Fruticosa* (L.) O. Schwarz. *Растительный мир Азиатской России.* 2009;4(2):72–78. [Hramova E.P., Tarasov O.V., Krylova E.I. Vliyanie radiacionnogo faktora na izmenchivost' biohimicheskikh pokazatelej na primere rastenij Pentaphylloides Fruticosa (L.) O. Schwarz. *Rastitel'nyj mir Aziatkoj Rossii.* 2009; 4(2): 72–78. (In Russ.).]
19. Карпова Е. А., Фершалова Т. Д. Динамика содержания пигментов в листьях *Begonia grandis Dryander subsp. grandis* при интродукции в Западной Сибири (г. Новосибирск). *Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология.* 2016;33(1):140–158. [Karpova E.A., Fershalaeva TD. Dynamics of leaf pigments content of *Begonia grandis Dryander subsp. grandis* introduced in West Siberia (Novosibirsk). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya.* 2016;(33(1)):140–158. (In Russ.).] <http://dx.doi.org/10.17223/19988591/33/9>.
20. Duarte G.T., Volkova P.Y., Geras'kin S.A. The response profile to chronic radiation exposure based on the transcriptome analysis of Scots pine from Chernobyl affected zone. *Environ. Poll.* 2019;250:618–626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.064>.
21. Джрафоров Э.С., Годжаева Г.А., Джрафарлы А.К., Оруджева Дж.Р. Изменение содержания отдельных элементов антиоксидантной системы защиты *Alhagi Pseudalhagi* (Bieb.) в условиях хронического гамма-облучения. *Bonp. radiaц. bezopasnosti.* 2013;71(3):12–24. [Dzhafarov E.S., Godzhaeva G.A., Dzhafarly A.K., Orudzheva Dzh.R. Izmenenie soderzhaniya otdel'nyh elementov antioksidantnoj sistemy zashchity Alhagi Pseudalhagi (Bieb.) v usloviyah hronicheskogo gamma-oblucheniya. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti.* 2013;71(3):12–24. (In Russ.).]
22. Hideg É., Jansen M.A., Strid Å. UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? *Trends Plant Sci.* 2013;18:107–115. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.003>.
23. Jiao J., Gai Q.Y., Yao L.P. et al. Ultraviolet radiation for flavonoid augmentation in *Isatis tinctoria* L. hairy root cultures mediated by oxidative stress and biosynthetic gene expression. *Industrial Crops and Products.* 2018;118:347–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.046>
24. Geng X., Zhang Y., Wang L., Yang X. Pretreatment with high-dose gamma irradiation on seeds enhances the tolerance of sweet osmanthus seedlings to salinity stress. *Forests.* 2019;10(5):406. <https://doi.org/10.3390/f10050406>.

25. Hussein H.A.A. Influence of radio-grain priming on growth, antioxidant capacity, and yield of barley plants. *Biotechnol. Rep.* [Internet]. 2022 Jun;34:e00724. <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00724>
26. Hanafy R.S., Akladious S.A. Physiological and molecular studies on the effect of gamma radiation in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) plants. *J. Gen. Eng. Biotechnol.* 2018;16(2):683–692. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.02.012>.

Response of Spring Barley to UV and γ -Irradiation

O. A. Guseva*, P. N. Tsygintsev, A. N. Pavlov

Russian Institute of Radiobiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russian Federation

*E-mail: gusevaoks65@yandex.ru

In two vegetation experiments on barley plants, the effect of separate and combined UV-B, UV-A and γ -irradiation in different doses was studied for the varieties “Zazersky 85” and “Vladimir”. The plants were assessed for flavonoid content, photosynthetic pigments, morphology parameters and yield. The daily dose of chronic UV-B-irradiation was 9 kJ/m², chronic UV-A – from 7.2 to 72 kJ/m², single γ -irradiation 2 and 4 Gy. It has been shown that spring barley varieties “Zazersky 85” and “Vladimir” differ in their sensitivity to chronic UV-B irradiation. When predicting the negative impact of UV-B radiation on plants, it is necessary to take into account the existing level of UVA radiation, since their effect is not additive. Stimulation of biomass growth under chronic UV irradiation may be accompanied by suppression of plant productivity. The response of barley plants to γ -irradiation can be significantly dependent on the level of UV-(A+B) radiation. In general, the dose-dependent effect of chronic UV and γ -irradiation can be considered as a transition from austress to distress and its irreversible disruption. The data from this study may be relevant for programs to develop new varieties of spring barley that are resistant to elevated levels of solar UV radiation.

Keywords: ultraviolet radiation, γ -radiation, barley, grain yield, biomass, flavonoids, chlorophylls

ИНФОРМАЦИИ ОБ АВТОРАХ

Гусева Оксана Александровна (Guseva Oksana Alexandrovna), <https://orcid.org/0000-0002-8814-6324>, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Обнинск, Россия (Russian Institute of Radiobiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russian Federation); e-mail: gusevaoks65@yandex.ru. Вклад в подготовку публикации: проведение экспериментов; анализ полученных результатов, написание текста статьи.

Цыгинцев Павел Николаевич (Tsygintsev Pavel Nikolaevich), <https://orcid.org/0000-0003-0214-7447>, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального

исследовательского центра “Курчатовский институт”, Обнинск, Россия (Russian Institute of Radiobiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russian Federation); e-mail: paul-gomel@mail.ru. Вклад в подготовку публикации: проведение экспериментов; анализ полученных результатов, написание текста статьи.

Павлов Александр Николаевич (Pavlov Alexander Nikolaevich) <https://orcid.org/0000-0001-7714-2419>, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Обнинск, Россия (Russian Institute of Radiobiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russian Federation); e-mail: 49434@mail.ru. Вклад в подготовку публикации: проведение γ -облучения и анализ доз γ -облучения.