

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 581.1:58.084:631.524.84

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162



Влияние дополнительного УФ-А-облучения на некоторые биохимические и морфометрические показатели картофеля в условиях защищенного грунта

С. В. Щербёнок^{1,2}, Т. Н. Лисина¹, С. Л. Елисеев², Д. Ю. Каракайтис¹¹ Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Пермский край, Россия² Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: София Вячеславовна Щербёнок, sshcherbenok@bk.ru

Актуальность. Ультрафиолетовое излучение ближнего диапазона (УФ-А) является важным экологическим фактором для растений. В условиях защищенного грунта растения могут испытывать недостаток УФ-облучения из-за поглощения его покровными материалами теплиц, что может негативно сказаться на физиологических процессах.

Материалы и методы. В данном экспериментальном исследовании проанализировано влияние УФ-А-облучения на меристемные растения картофеля сортов 'Шах' и 'Невский' после их пересадки в грунт в условиях защищенного грунта (пленочная теплица). В теплице оборудован сектор со светодиодными светильниками (длина волны – 380 нм). Растения-регенеранты подвергали ежедневному 60-минутному облучению в вечернее время в течение 10, 20 и 30 суток (варианты опыта: УФ1, УФ2, УФ3), контрольный вариант не подвергался дополнительному УФ-А-облучению.

Результаты. В ходе проведенных исследований выявлено влияние УФ-А-облучения на биохимические показатели картофеля: содержание фотосинтетических пигментов в листьях, уровень сухого вещества, крахмала и общего сахара в клубнях. Результаты эксперимента показали, что дополнительное УФ-А-облучение способствовало увеличению количества мини-клубней. У растений картофеля сорта 'Невский' общее число мини-клубней возросло на 30% в варианте опыта УФ1, в то время как средняя масса мини-клубня уменьшилась на 10%. У растений сорта 'Шах' наблюдалось увеличение количества мини-клубней на 10% во всех вариантах опыта с УФ-А-досветкой. Наибольшее содержание сухого вещества в мини-клубнях сортов 'Шах' и 'Невский' отмечали при 10-дневной досветке УФ-А-облучением. Содержание крахмала в мини-клубнях обоих сортов было высоким, наибольшим – в варианте опыта с досветкой 30 суток.

Заключение. УФ-облучение стимулирует фотосинтетические процессы, увеличивая содержание хлорофилла и каротиноидов, а также влияет на углеводный метаболизм, что приводит к повышению содержания сахаров и крахмала в клубнях картофеля, к увеличению количества сформированных мини-клубней.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., УФ-А-облучение, теплица, фотосинтетические пигменты, мини-клубни, меристемные растения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, номер регистрации НИОКТР 122031100058-3.

Коллектив авторов благодарит Научный селекционно-технологический центр в области картофелеводства Уральского НИИСХ – филиала УрФАНИЦ УрО РАН за предоставленные для исследования меристемные растения картофеля; ООО ГК «Световые и Электрические Технологии» за предоставленные для исследования светильники.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Щербёнок С.В., Лисина Т.Н., Елисеев С.Л., Каракайтис Д.Ю. Влияние дополнительного УФ-А-облучения на некоторые биохимические и морфометрические показатели картофеля в условиях защищенного грунта. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):150-162. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

The effect of additional UV-A irradiation on some biochemical and morphometric indicators in potato under greenhouse conditions

Sofya V. Shcherbyonok^{1,2}, Tatyana N. Lisina¹, Sergey L. Eliseev², Dmitriy J. Karakajtis¹¹ Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture, Perm Territory, Russia² Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia**Corresponding author:** Sofya V. Shcherbyonok, sshcherbenok@bk.ru

Background. Ultraviolet (UV-A) radiation is an important environmental factor with a significant impact on plants. Plants in greenhouses often experience a deficiency in UV-A radiation that can negatively affect their physiological processes.

Materials and methods. An experimental study was conducted to analyze the effect of UV-A irradiation on meristem plants of potato cvs. 'Shakh' and 'Nevsky' after their transplantation to a summer greenhouse. One sector of the greenhouse was equipped with lamps emitting light at a wavelength of 380 nm. Regenerated potato plants of both cultivars were exposed to radiation for 10, 20, and 30 days (experiment variants: UV1, UV2, and UV3) for one hour in the evening.

Results. The analysis revealed the effect of UV-A irradiation on the biochemical parameters in potato, including concentration of photosynthetic pigments in the leaves, as well as the content of dry matter, starch, and total sugars in the tubers. Additionally, morphometric characteristics were studied, such as the number and weight of minitubers. The obtained results showed that UV-A irradiation induced an increase in the number of minitubers and reduced their weight. For cv. 'Nevsky', the total number of minitubers increased by 30% in the UV1 variant, while their average weight decreased by 10%. For cv. 'Shakh', an increase in the number of minitubers by 10% was observed in all variants of exposure to UV-A. The maximum content of dry matter in minitubers of both cultivars was registered under the 10-day exposure, exceeding the control by 9.5%. The starch content in the two cultivars was high, with a maximum observed under UV3 treatment.

Conclusion. UV irradiation stimulates photosynthetic processes, increasing the content of chlorophyll and carotenoids, and also affects carbohydrate metabolism, which leads to an increase in the content of sugars and starch in potato tubers and an increased number of minitubers developed on regenerated plants.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., UV-A irradiation, greenhouse, photosynthetic pigments, minitubers, meristem plants

Acknowledgements: the work was performed as part of a state task; registration No. of the research and development project is 122031100058-3.

The team of authors express their gratitude to the Scientific Breeding and Technological Center for Potato Production of the Ural Research Institute of Agriculture, branch of the Ural Federal Agrarian Research Center, UrB RAS, for providing potato meristem plants for the study, and to LLC *Light and Electric Technologies* for supplying the lighting fixtures used in the research. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shcherbyonok S.V., Lisina T.N., Eliseev S.L., Karakajtis D.J. The effect of additional UV-A irradiation on some biochemical and morphometric indicators in potato under greenhouse conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):150-162. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

Введение

Картофель – одна из самых важных сельскохозяйственных культур, которую успешно возделывают в разных климатических условиях. Это делает культивирование картофеля значимым не только для сельского хозяйства, но и для экономики в целом, а также для обеспечения продовольственной безопасности населения России (Sayarova et al., 2018). Благодаря универсальности и питательным свойствам картофель стал основным продуктом питания во многих странах.

Рост и развитие картофеля зависят от множества факторов, включая климатические условия, тип почвы, доступность воды и удобрений, а также агрономические приемы. Учет этих факторов позволяет оптимизировать условия для достижения высокого урожая и улучшения качества клубней (Akkamis, Caliskan, 2024). Одним из ключевых факторов, влияющих на рост и развитие картофеля, является свет. Световые потоки с различной длиной волны играют значительную роль в фотосинтетических процессах, что оказывает влияние на рост и развитие растений картофеля (Gervais et al., 2021; Smirnova, Podolian, 2024).

Световой спектр, достигающий поверхности Земли, включает в себя около 7% ультрафиолетового излучения, и изучение его воздействия на растения имеет огромное значение. Это знание не только углубляет наше понимание основных закономерностей биологических процессов, происходящих под воздействием различных факторов, но и открывает новые перспективы для практического применения. Например, использование дополнительного УФ-излучения может стимулировать синтез органических веществ в растениях, а также изменять продолжительность физиологических фаз их развития. Это создает возможности для внедрения инновационных аграрных технологий, которые могут значительно повысить продуктивность и устойчивость сельского хозяйства (Solovchenko, Merzlyak, 2008).

Актуально изучение освещенности в условиях защищенного грунта, используемые покрытия которого задерживают часть солнечного излучения, включая ультрафиолетовое. В современных теплицах можно контролировать микроклимат, уровень влажности и температуру, что позволяет создать оптимальные условия для роста картофеля и других культур. Однако важно учитывать, что недостаток ультрафиолетового излучения может привести к снижению фотосинтетической активности и, как следствие, к уменьшению урожайности. Картофель в условиях защищенного грунта культивируют на этапе получения мини-клубней из меристемных растений.

Эффективное управление светом и другими факторами, влияющими на рост картофеля, является ключом к успешному его культивированию. Это требует комплексного подхода, включающего как научные исследования, так и практическое применение полученных знаний в агрономии. Оптимизация условий для роста картофеля может значительно улучшить не только его урожайность, но и качество, что в свою очередь скажется на благосостоянии населения и продовольственной безопасности страны.

Целью данного исследования являлось изучение влияния досветки УФ-А с длиной волны 380 нм в течение 10, 20 и 30 суток на морфометрические и биохимические показатели растений картофеля сортов 'Шах' и 'Невский', полученных методом микроклонального размножения, после пересадки их в грунт в пленочную теплицу.

Материалы и методы

Исследования проводили в Пермском НИИ сельского хозяйства в период с июня по август 2024 г. В качестве объектов исследования взяли два сорта картофеля среднеранней группы спелости, включенные в Государственный реестр селекционных достижений по Волго-Вятскому региону: 'Шах' и 'Невский'.

Для исследования были использованы меристемные растения, которые культивировали *in vitro* на агаризированной питательной среде Мурасиге – Скуга в химических пробирках Ф1,5*1,6 см с 5 мл питательной среды. Питательную среду стерилизовали автоклавированием при температуре 120°C в течение 22 минут при давлении 1,0 атм. Затем растения помещали в климатический бокс и культивировали 28 суток при температуре 21–24°C и 16-часовом фотопериоде.

В эксперименте участвовало 256 растений, по 32 растения каждого сорта в каждом варианте опыта (4 варианта опыта). Далее растения извлекали из пробирок и высаживали в пятилитровые сосуды в теплицу. В качестве субстрата использована торфосмесь (низинный торф, верховой торф и песок в соотношении 2 : 2 : 1). Содержание основных питательных элементов в субстрате: азот (3,6 мг/100 г) по ГОСТ 27894.4-88 (ГОСТ 27894.4-88..., 1989), фосфор (4,1 мг/100 г) по ГОСТ 27894.5-88 (ГОСТ 27894.5-88..., 1989) и калий (59,0 мг/кг) по ГОСТ 27894.6-88 (ГОСТ 27894.6-88..., 1989), общее содержание органического вещества – 41,2%.

Для определения доли задерживаемого УФ-А-излучения в течение вегетационного периода проводили замеры плотности фотонного потока вне и внутри теплицы с помощью спектрометра MK350S Premium. Замеры проводили три раза в сутки: 8:00, 14:00 и 20:00.

Для данного эксперимента в теплице оборудовали сектор со светодиодными облучателями ECOLED-BIO-70-UV Fito IP65, излучающими свет длиной волны 380 нм. Растения-регенеранты картофеля сортов 'Шах' и 'Невский' подвергали данному облучению в течение 10, 20 и 30 суток (варианты опыта УФ1, УФ2 и УФ3 соответственно) ежедневно по 60 минут в вечернее время. Растения в контрольном варианте не подвергались дополнительному УФ-облучению.

Минеральное питание обеспечивалось внесением комплексного высококачественного водорастворимого удобрения «Solar Универсал 19:19:19+МЭ», содержащего равные доли азота, фосфора и калия. Полив осуществлялся по мере необходимости. Период вегетации картофеля составил 100 суток. Учет мини-клубней проводили методом сплошной уборки по ГОСТ 33996-2016 (ГОСТ 33996-2016..., 2020). Мини-клубни по наибольшему поперечному диаметру разделили на три фракции: от 9 до 20 мм, от 21 до 40 мм, от 41 мм и более.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли методом спектрофотометрии на 10-й, 20-й, 30-й, 40-й и 50-й дни эксперимента. Исследуемые листья растений взвешивали, гомогенизировали в 96-процентном этиловом спирте. Каротиноиды определяли при длине волны 440,5 нм, хлорофилл *a* – при длине волны 665 нм, хлорофилл *b* – при длине волны 649 нм. Концентрации хлорофиллов и каротиноидов рассчитывали по формулам Винтерманса – де Мотса (Wintermans, de Mots, 1965). В клубнях картофеля определяли крахмал и сахара по ГОСТ 26176-19 (ГОСТ 26176-2019..., 2020), а также сухое вещество по ГОСТ 33977-2016 (ГОСТ 33977-2016..., 2019). В дальнейшем данные представлены на воздуш-

но-сухое вещество. Исследования проводили в трехкратной повторности. Полученные данные статистически обработаны с применением методов описательной статистики, критериев «омега-квадрат» для определения нормальности распределения выборок, Стьюдента и Краскела – Уоллиса – для определения достоверности различий между вариантами (в зависимости от нормальности распределения выборки), дисперсионного анализа. Значимыми считали различия между сравниваемыми величинами с доверительной вероятностью 95% и выше ($P \leq 0,05$).

Результаты и их обсуждение

Усредненные данные измерений уровня освещенности представлены в таблице 1. В ходе наблюдений, проведенных с 3 июня по 26 августа 2024 г., установлено, что пленочное покрытие теплицы, в которой осуществлялось исследование, поглощает в среднем 55,6% солнечного света в ультрафиолетовом диапазоне. Этот уровень поглощения может оказывать влияние на фотосинтетические процессы, протекающие в растениях, что в свою очередь может сказаться на их росте и урожайности.

ствую захвату света и расширяя спектр поглощения (Theeuwes et al., 2022). Каротиноиды, обладая антиоксидантными свойствами, инактивируют различные активные формы кислорода (АФК) и тем самым защищают молекулы хлорофилла от окислительного повреждения (Pradedova et al., 2011; Golovko et al., 2022). Фотосинтетический аппарат растений обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям, включая изменения в качестве освещения и уровне ультрафиолетового излучения. Ультрафиолет может оказывать негативное влияние на фотосинтетические процессы, что приводит к изменению концентрации этих пигментов. Таким образом, мониторинг фотосинтетических пигментов позволяет не только оценивать состояние растений, но и выявлять их способности к адаптации в условиях различных стрессовых факторов (Kolodina et al., 2021; Rozenetsvet et al., 2024).

Определение содержания фотосинтетических пигментов, включая хлорофилл *a* и *b* и каротиноиды, проводили на 10-е, 20-е, 30-е, 40-е и 50-е сутки эксперимента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уровень хлорофиллов увеличивается на протяжении всего периода облучения, однако после прекращения воздей-

Таблица 1. Интенсивность света в области ультрафиолета в период проведения опыта

Table 1. Light intensity in the ultraviolet range during the experiment

Дата / Date	Плотность фотонного потока вне теплицы, mW/m ² / Photon flux density outside the greenhouse, mW/m ²			Плотность фотонного пото- ка внутри теплицы, mW/m ² / Photon flux density inside the greenhouse, mW/m ²			Снижение УФ, % / UV reduction, %		
	8:00	14:00	20:00	8:00	14:00	20:00	8:00	14:00	20:00
03.06.2024	20,52	9,91	6,75	8,37	5,71	2,93	59	42	57
10.06.2024	38,96	82,80	7,52	13,01	25,64	3,08	67	69	59
17.06.2024	38,31	82,13	5,50	14,83	41,62	2,50	61	49	55
24.06.2024	7,39	37,31	3,45	3,22	17,20	1,61	56	54	53
01.07.2024	33,28	47,31	18,84	15,42	27,77	8,08	54	41	57
08.07.2024	7,35	80,89	14,22	3,03	26,61	5,07	59	67	64
15.07.2024	17,63	19,05	18,42	9,83	9,06	9,24	44	52	50
22.07.2024	7,41	39,20	2,07	3,29	17,76	0,98	56	55	53
29.07.2024	8,16	33,30	3,21	3,15	15,50	1,58	61	53	51
05.08.2024	21,97	34,24	2,50	10,53	15,50	1,03	52	55	60
12.08.2024	17,86	14,83	1,96	8,16	6,39	0,86	54	57	56
19.08.2024	4,96	26,55	0,88	2,17	12,13	0,37	56	54	58
26.08.2024	11,13	58,96	0,92	5,53	27,19	0,33	50	54	64
Среднее	18,08	43,58	6,63	7,74	19,10	2,90	56,07	54,00	56,70

В середине июня в полдень был зафиксирован максимум поглощения – 69%. Количественное содержание фотосинтетических пигментов, таких как хлорофиллы *a* и *b* и каротиноиды, представляет собой один из ключевых биохимических аспектов их адаптации к стрессовым факторам (Nikonovich et al., 2018). Хлорофилл *a* является основным компонентом фотосистем I и II, в то время как хлорофилл *b* выполняет вспомогательную роль, способ-

ствия ультрафиолетового излучения наблюдается резкое снижение их содержания. Аналогичные изменения фиксировались и для каротиноидов. Статистически значимые различия в содержании пигментов выявили уже на первом этапе измерений (рис. 1). Растения обоих сортов в экспериментальных вариантах опыта демонстрировали более высокие уровни содержания пигментов по сравнению с растениями в контрольном варианте.

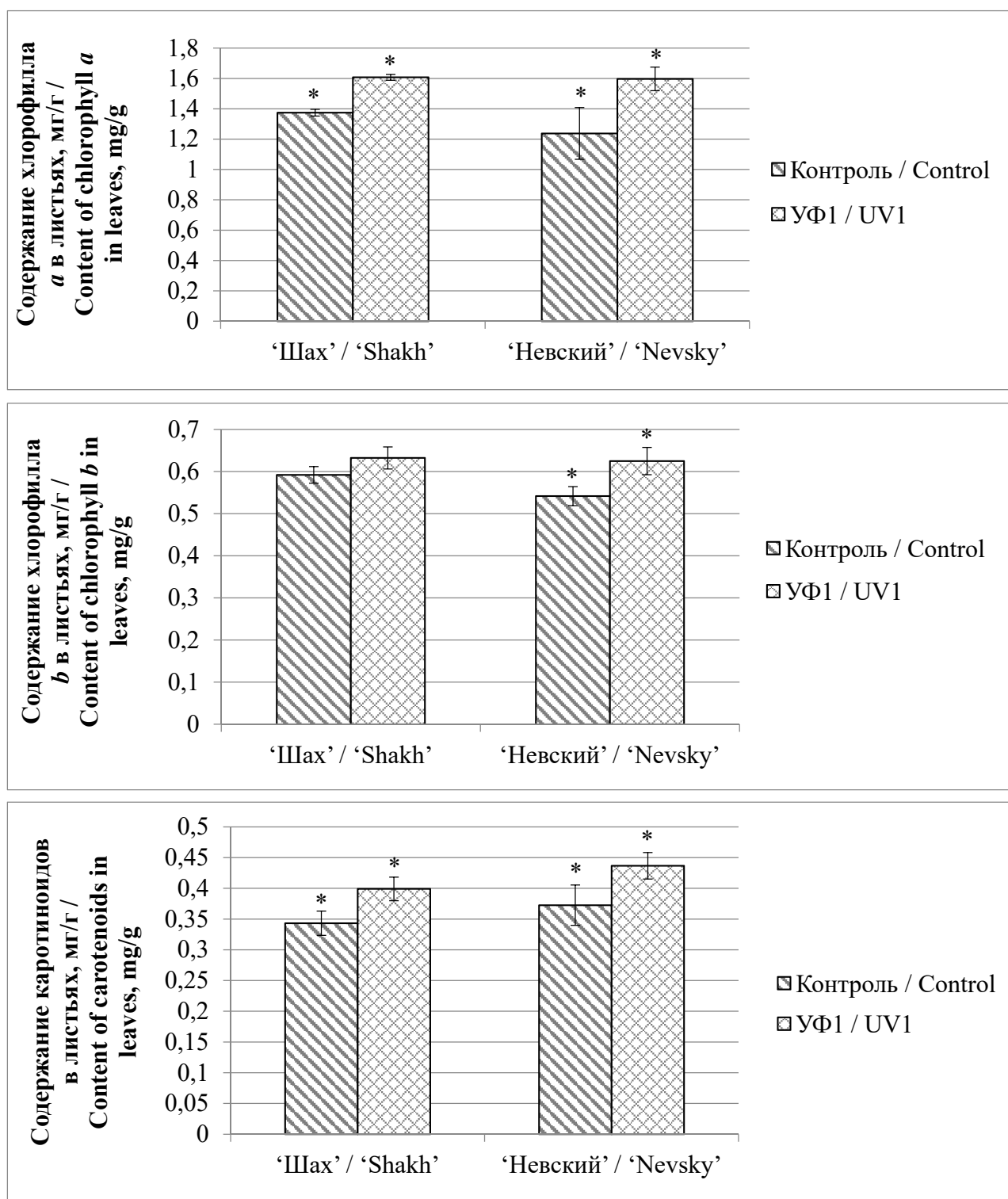


Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов на 10-й день эксперимента
(* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 1. Content of photosynthetic pigments on the 10th day of the experiment
(* – significant differences between the experiment variants)

На 20-е сутки эксперимента растения сорта 'Шах' продемонстрировали аналогичную динамику, при этом экспериментальный вариант УФ2 существенно отличался от контрольной группы и варианта УФ1 (рис. 2). В то же время растения сорта 'Невский' проявили противоположную реакцию, что может свидетельствовать о нали-

чии сортовых специфических характеристик, влияющих на способность адаптироваться к воздействию ультрафиолетового излучения. Эти результаты подчеркивают важность учета различий в реакциях между сортами, а также их уникальных адаптивных механизмов в ответ на различные условия облучения.

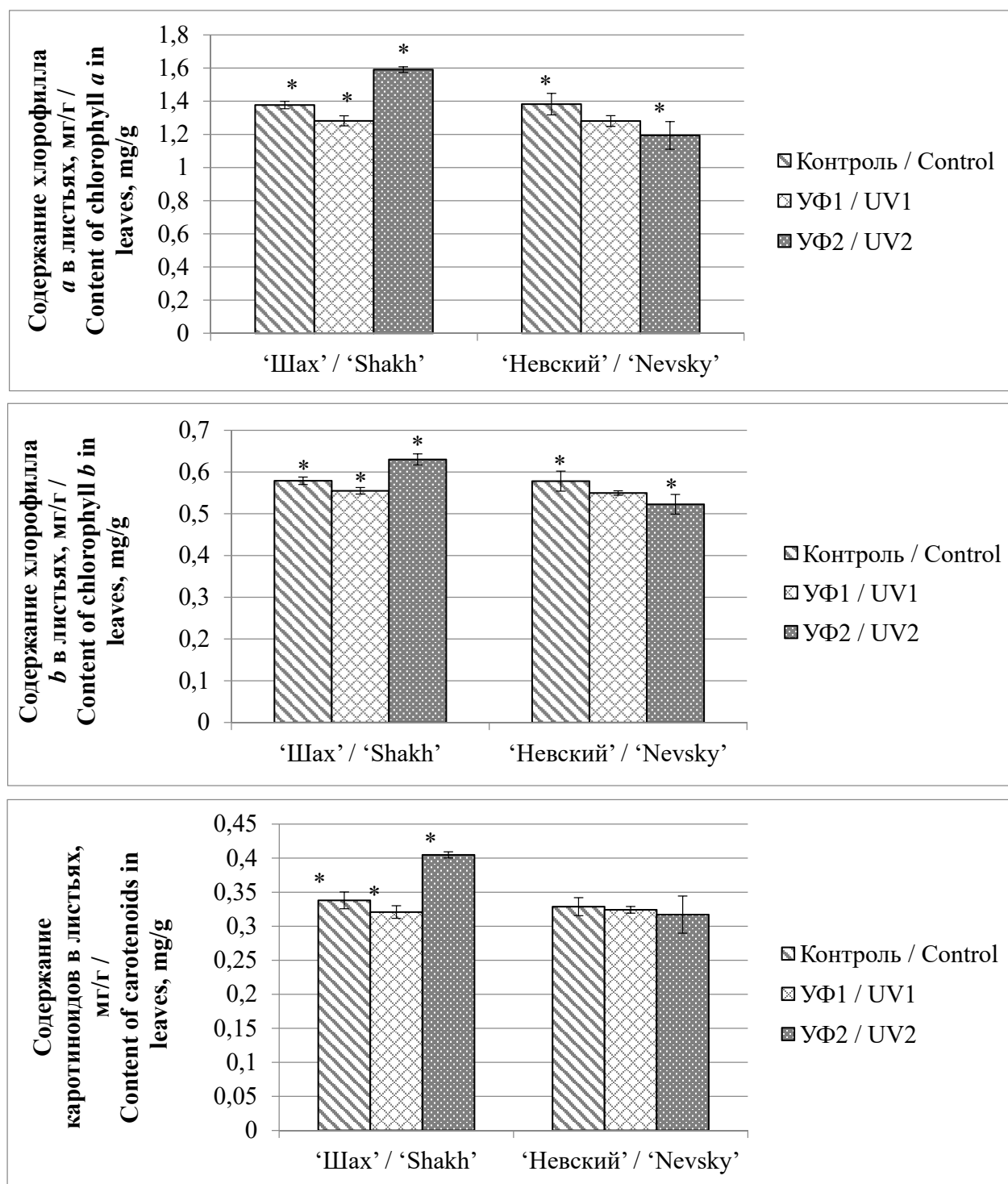


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов на 20-й день эксперимента

(* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 2. Content of photosynthetic pigments on the 20th day of the experiment

(* – significant differences between the experiment variants)

На 30-е и 40-е сутки эксперимента у растений, подвергавшихся дополнительному облучению, наблюдалось снижение уровня всех фотосинтетических пигментов. Это, вероятно, указывает на перестройку светособирающего комплекса и адаптацию хлоропластов к условиям окислительного стресса.

На рисунке 3 представлены данные, полученные на 50-е сутки эксперимента, которые показывают, что растения обоих сортов сохраняют достаточно высокое со-

держание фотосинтетических пигментов даже в условиях ультрафиолетового облучения вариантом УФ2. Эти результаты подчеркивают устойчивость растений исследуемых сортов к стрессовым факторам, а также их способность адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды.

Это наблюдение свидетельствует о том, что оба сорта способны эффективно адаптироваться к данному уровню ультрафиолетового воздействия, что в свою очередь

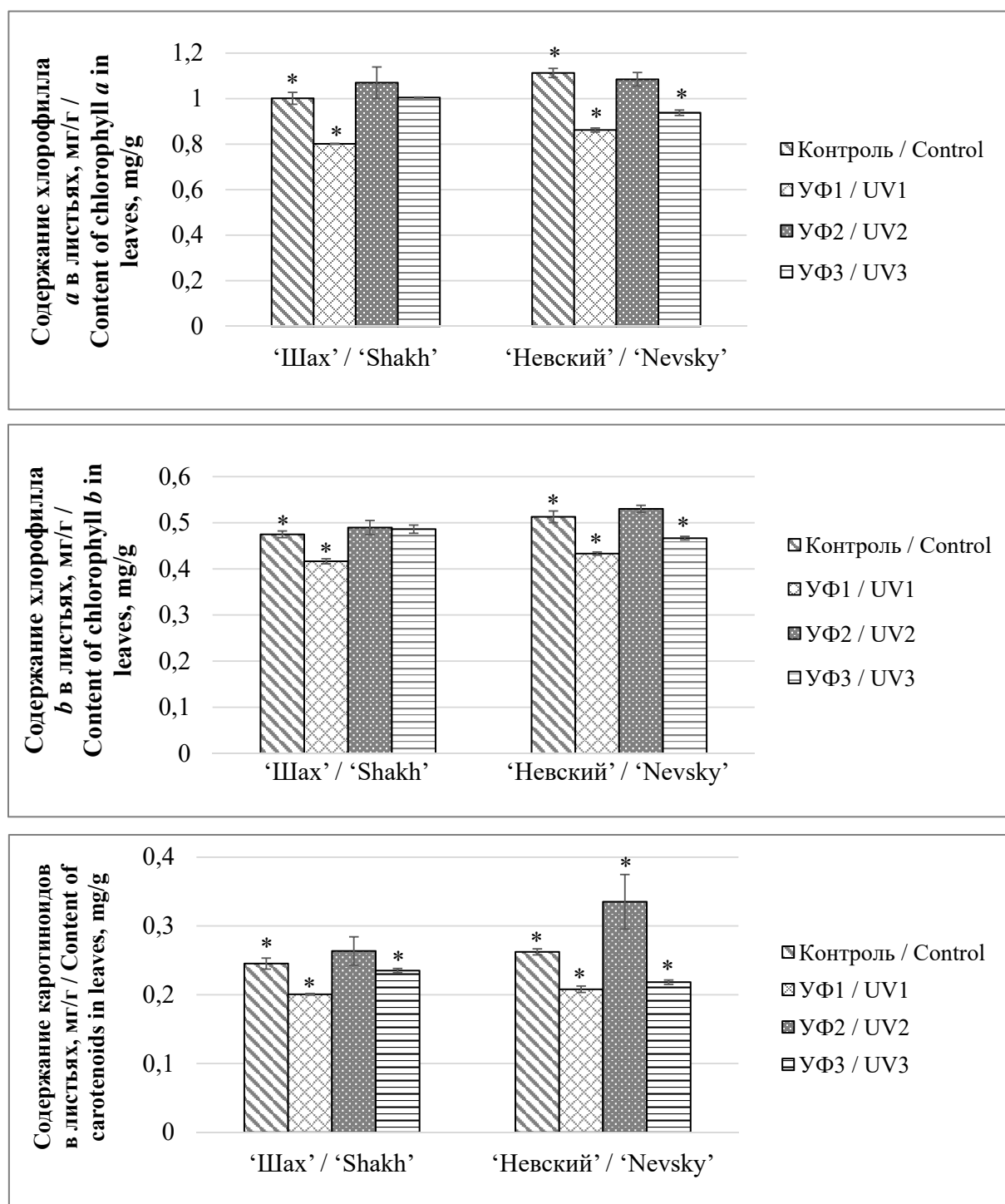


Рис. 3. Содержание фотосинтетических пигментов на 50-й день эксперимента
 (* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 3. Content of photosynthetic pigments on the 50th day of the experiment
 (* – significant differences between the experiment variants)

может положительно сказаться на их фотосинтетической активности.

При наименьшем содержании фотосинтетических пигментов у растений сорта 'Невский' отмечено статистически достоверное увеличение количества мини-клубней на растение в варианте УФ1 по сравнению с контролем (6,59 шт. и 5,06 шт. соответственно) (рис. 4), что может свидетельствовать о том, что один из механизмов адаптации растений картофеля к УФ-облучению

осуществляется за счет снижения суммарного содержания фотосинтетических пигментов.

По общему количеству мини-клубней отмечена тенденция увеличения их количества при дополнительном УФ-А-облучении у картофеля обоих сортов (табл. 2).

При дополнительном воздействии УФ-А-облучения на растения картофеля отмечалось достоверное уменьшение средней массы мини-клубней фракции 21–40 мм у сортов 'Шак' и 'Невский' в вариантах освещения УФ2

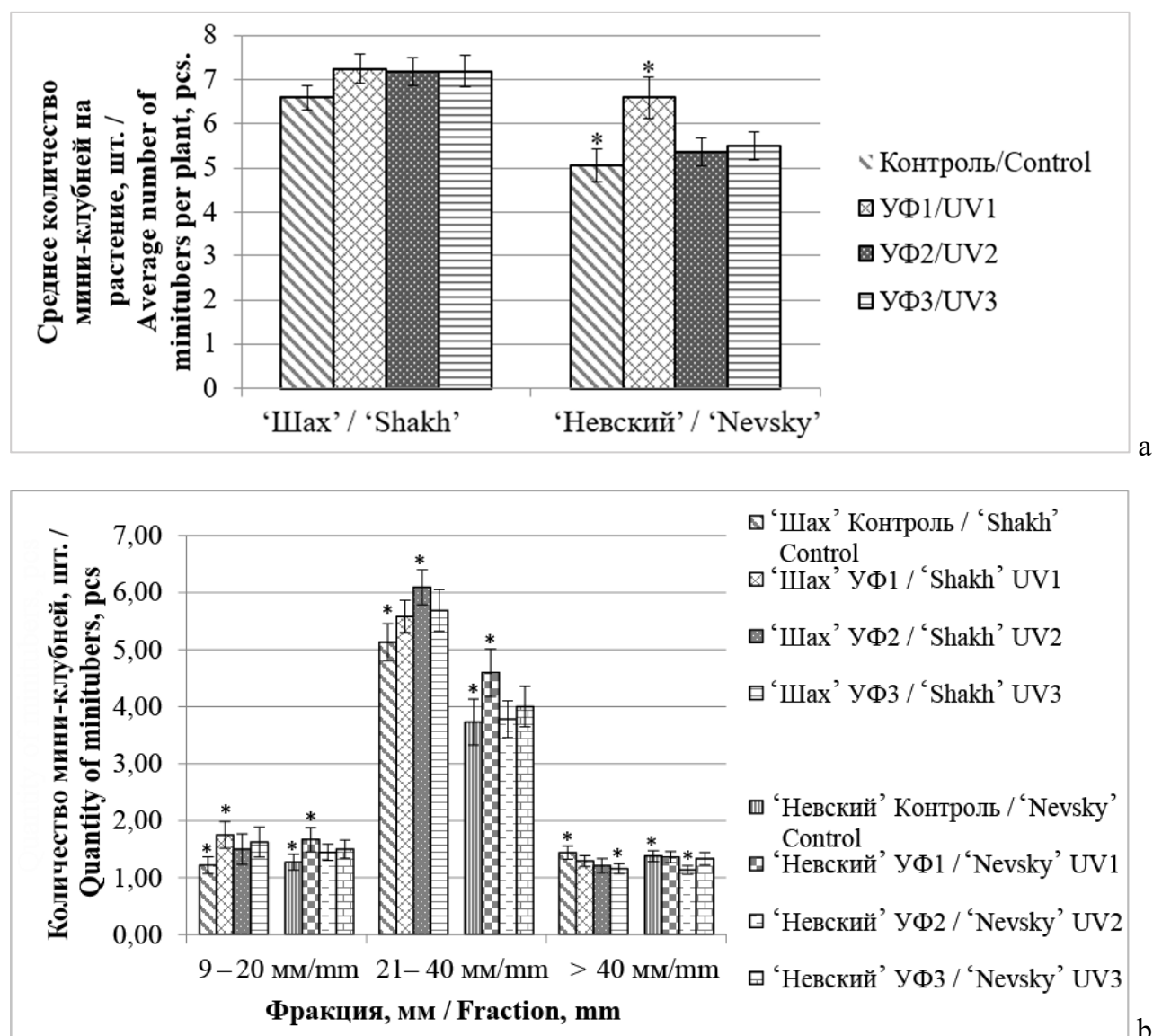


Рис. 4. Количество мини-клубней сортов 'Шах' и 'Невский': а – среднее количество на растение, шт.; б – количество мини-клубней на растение во фракциях (* – значимые различия между вариантами опыта)
Fig. 4. Number of minitubers in cvs. 'Shakh' and 'Nevsky': а – average number of minitubers per plant, pcs.; б – number of minitubers per plant within the fractions (* – significant differences between the experiment variants)

Таблица 2. Общее количество мини-клубней на вариант опыта (в варианте 32 растения), шт.

Table 2. Total number of minitubers per variant (with 32 plants in each variant), pcs.

Сорт / Cultivar	Контроль / Control	УФ1 / UV1	УФ2 / UV2	УФ3 / UV3
'Шах' / 'Shakh'	211	232	230	230
'Невский' / 'Nevsky'	162	210	172	176

и УФ1 соответственно (рис. 5). У сорта 'Невский' в варианте облучения УФ1 произошло уменьшение средней массы мини-клубней на 10%, в то время как количество мини-клубней возросло на 30% (табл. 3).

Такое уменьшение массы клубней в условиях дополнительного УФ-облучения по сравнению с контрольной группой может указывать на перераспределение ресурсов внутри растения. В данном случае растения, подвергшиеся дополнительному воздействию ультрафиолетовых лучей, могут концентрировать свою энергию не на

увеличении массы клубней, а на формировании большего их количества, что желательно на этом этапе семеноводства.

Основными компонентами, содержащимися в клубнях картофеля, являются крахмал, сахара, клетчатка, азотистые соединения, жиры и зольные элементы (Serderov et al., 2019; Shanina et al., 2024). Содержание этих веществ может значительно варьировать в зависимости от множества факторов. Во-первых, сортовые характеристики картофеля играют ключевую роль, определяя генетиче-

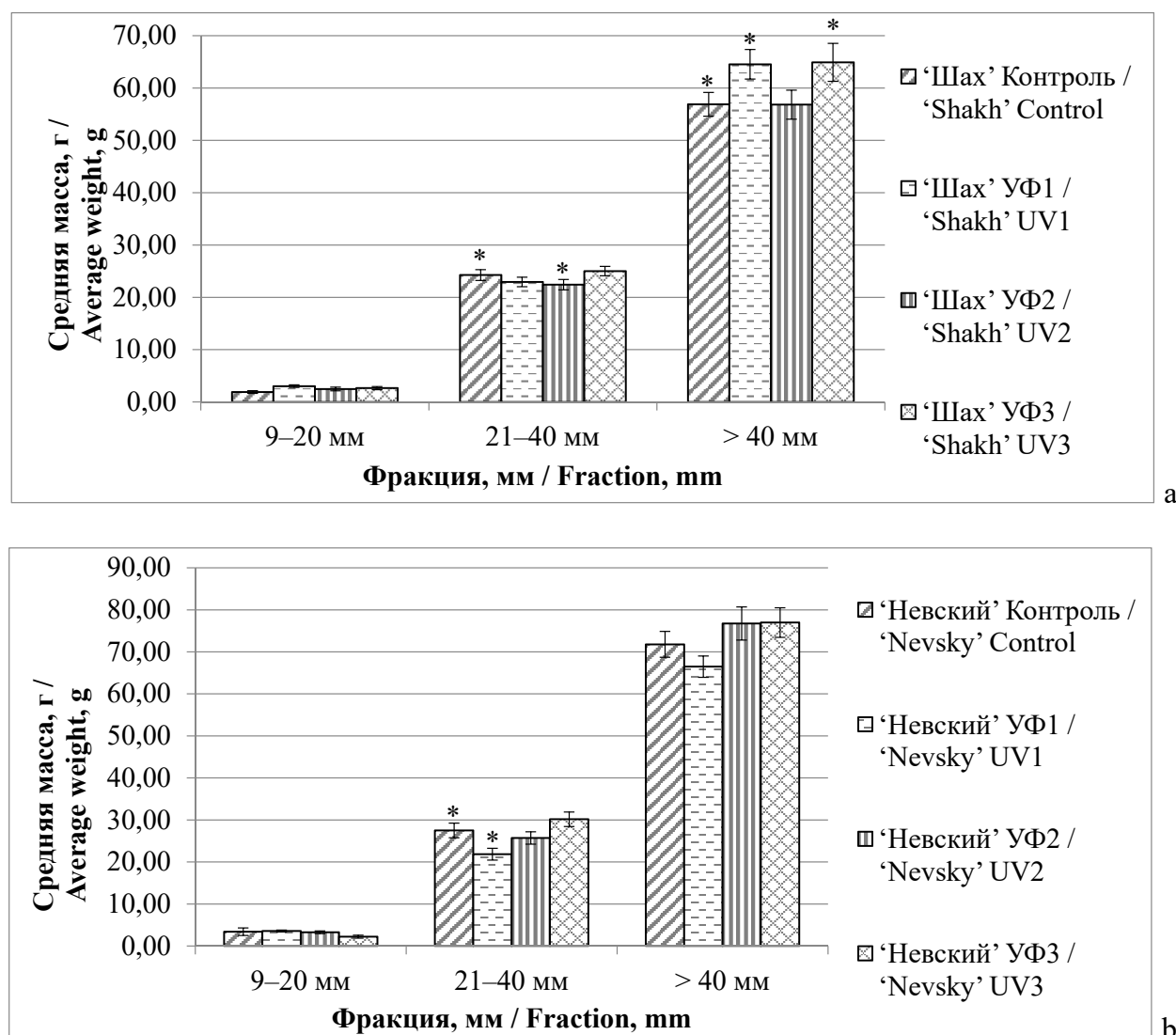


Рис. 5. Средняя масса мини-клубней, г: а – сорт 'Шах'; б – сорт 'Невский'
 (* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 5. Average weight of minitubers, g: а – cv. 'Shakh'; б – cv. 'Nevsky'
 (* – significant differences between variants of the experiment)

скую предрасположенность к накоплению определенных веществ. Во-вторых, условия выращивания, включая тип субстрата, уровень удобрений, режим полива и агротехнические приемы, а также, что особенно важно, освещение, оказывают значительное влияние на биохимический состав клубней. Это связано с тем, что картофель является светолюбивым растением и недостаток света может негативно сказаться на его развитии и накоплении питательных веществ (Serderov et al., 2019; Qi et al., 2020).

В рамках исследования проанализировано содержание сухой массы, крахмала и сахаров в мини-клубнях картофеля. Результаты этих исследований представлены в таблице 4.

Наибольшее содержание сухого вещества в мини-клубнях наблюдается при 10-суточной УФ-досветке у сорта 'Шах' – 25,15%. Отмечена тенденция его увеличения по сравнению с контрольным вариантом на 9,4%. Аналогичные результаты наблюдали у растений сорта 'Невский'. В вариантах УФ1 и УФ3 увеличение содержания сухого вещества по сравнению с контрольным вариантом составило 10,1% и 10,8% соответственно.

Основную часть сухого вещества клубня картофеля составляют углеводы, которые играют ключевую роль в его биологии и определяют питательную ценность. Углеводы являются главным продуктом фотосинтеза, обеспечивая растения необходимой энергией для роста и развития. Они служат основным субстратом для дыхательных процессов, а также выступают в качестве формы запаса и транспортировки углерода в растении (Sergeeva et al., 2022; Ahmad et al., 2024).

Углеводы способствуют повышению устойчивости картофеля к низким температурам и другим неблагоприятным условиям окружающей среды. Эти вещества также являются важными показателями продуктивности картофеля, так как их содержание напрямую влияет на урожайность и качество клубней. В клубне картофеля углеводы в основном представлены в форме крахмала (Voronkova, 2012; Kurdziel et al., 2022).

Содержание крахмала в мини-клубнях обоих сортов картофеля было достаточно высоким. При досветке 30 суток (УФ3) зафиксировано значимое увеличение содержания крахмала до 19,45% у мини-клубней сорта

Таблица 3. Средняя масса общего количества мини-клубней на вариант опыта (в варианте опыта 32 растения), г**Table 3. Average weight of the total number of minitubers per variant (with 32 plants in each variant), g**

Сорт / Cultivar	Контроль / Control	УФ1 / UV1	УФ2 / UV2	УФ3 / UV3
‘Шах’ / ‘Shakh’	27,68	30,16	27,24	30,86
‘Невский’ / ‘Nevsky’	34,23	30,63	35,24	36,45

Таблица 4. Содержание сухого вещества, крахмала и общего сахара в мини-клубнях, %**Table 4. Content of dry matter, starch, and total sugars in minitubers, %**

Сорт / Cultivar	Вариант / Variant	Сухое вещество / Dry matter	Крахмал / Starch	Общий сахар / Total sugars
‘Шах’ / ‘Shakh’	Контроль / Control	22,98 ± 3,25	17,39 ± 1,02	0,6 ± 0,12
	УФ1/UV1	25,15 ± 2,14	16,56 ± 0,87	0,9 ± 0,25
	УФ2/UV2	23,07 ± 2,56	17,33 ± 0,59	0,7 ± 0,10
	УФ3/UV3	21,36 ± 2,34	19,45 ± 0,98*	1,1 ± 0,19*
‘Невский’ / ‘Nevsky’	Контроль / Control	19,58 ± 2,81	16,59 ± 0,85	0,8 ± 0,27
	УФ1/UV1	21,56 ± 1,67	16,87 ± 0,50	0,6 ± 0,16
	УФ2/UV2	19,77 ± 2,09	16,55 ± 0,73	1,1 ± 0,19
	УФ3/UV3	21,69 ± 1,48	15,19 ± 0,69	1,3 ± 0,20*

Примечание: * – значимые различия между вариантом опыта и контрольным вариантом

Note: * – significant differences between the experiment and the control variants

‘Шах’. В мини-клубнях сорта ‘Невский’ статистических значимых различий по содержанию крахмала между вариантами опыта не выявлено.

При использовании варианта УФ3 в мини-клубнях обоих исследованных сортов происходило увеличение содержания сахаров по сравнению с контролем на 0,5%. Фотосинтетические процессы и накопление сахаров взаимосвязаны. Сахара служат основным источником энергии для растений, обеспечивая необходимые условия для процессов фотосинтеза и дыхания. В частности, глюкоза и фруктоза, являясь простыми сахарами, используются в качестве субстратов для синтеза более сложных углеводов, таких как крахмал, который накапливается в клубнях и служит запасом питательных веществ (Haider et al., 2023; Fleming, Morris, 2024).

Дисперсионный анализ полученных данных позволил сделать выводы о величине вклада в общую изменчивость изучаемых показателей фактора досветки УФ-А и фактора генотипа (сорта), а также их совместном вкладе (табл. 5).

Таблица 5. Оценка вклада исследуемых факторов в общую изменчивость изучаемых показателей, %**Table 5. Evaluation of the contribution of the studied factors to the total variability of the examined indicators, %**

Факторы / Factors	Исследуемый показатель / Indicator examined				
	Количество мини-клубней на одно растение / Number of minitubers per plant	Средняя масса мини-клубней / Average weight of minitubers	Общий сахар / Total sugars	Содержание крахмала / Starch content	Содержание хлорофиллов / Chlorophyll content
Фактор наследственности (генотип, сорт) / Genetic factor (genotype, cultivar)	40,2	15,2	17,8	35,8	21,1
Фактор освещения / Radiation factor	25,0	33,6	12,7	3,5	12,2
Взаимодействие факторов / Interaction of factors	5,1	12,4	56,5	55,8	43,7
Прочие факторы / Other factors	29,7	38,7	13,0	4,9	22,9

Взаимодействие факторов освещения и генотипа наиболее значимо для показателей содержания общего сахара, крахмала и хлорофиллов. На количество сформированных мини-клубней влияет преимущественно фактор наследственности (генотип / сорт). На среднюю массу мини-клубней влияют многие прочие факторы, но фактор УФ-А-досветки вносит существенный вклад.

Заключение

УФ-А-облучение способно активировать фотосинтетические процессы, что в свою очередь приводит к увеличению содержания хлорофилла и каротиноидов в растениях. УФ-А-облучение может способствовать увеличению количества мини-клубней, при этом возможно снижение их массы. У растений сорта 'Невский' общее количество мини-клубней увеличилось на 30% при использовании варианта УФ1, в то время как средняя масса клубней снизилась на 10%. Это может указывать на то, что УФ-А-облучение стимулирует клубнеобразование, но при этом может привести к уменьшению среднего размера клубня, что требует дальнейшего изучения механизмов, лежащих в основе этих изменений. Учитывая, что при получении семенного посадочного материала важно именно количество сформированных мини-клубней, то УФ-А-досветка может быть рекомендована для использования в производстве мини-клубней в пленочных теплицах, покровные материалы которых задерживают УФ-А.

Кроме того, УФ-А-облучение может оказывать влияние на углеводный метаболизм, что способствует повышению уровня сахаров и крахмала в клубнях картофеля. Содержание крахмала в мини-клубнях обоих сортов было высоким, при этом наибольшие значения отмечены при дополнительном УФ-А-облучении в течение 30 суток. Это указывает на то, что УФ-А-облучение может не только повышать количество клубней, но и улучшать их качественные характеристики, что является важным аспектом для селекции и агрономической практики.

Влияние фактора УФ-А-облучения для культивирования растений картофеля *in vitro* является значимым фактором для некоторых показателей: средняя масса мини-клубней, количество мини-клубней на одно растение. Для показателей содержания общего сахара, крахмала и хлорофиллов играет большую роль взаимодействие фактора УФ-А-облучения и особенностей генотипа (сорта).

Таким образом, результаты наших исследований подчеркивают потенциал использования УФ-А-облучения как эффективного технологического приема, способствующего повышению как количественных, так и качественных показателей клубней картофеля. Однако для оптимизации этого процесса и минимизации негативных эффектов, таких как снижение массы клубня, необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение различных режимов облучения и их влияния на конкретные сорта картофеля.

References / Литература

Ahmad D., Ying Y., Bao J. Understanding starch biosynthesis in potatoes for metabolic engineering to improve starch quality: A detailed review. *Carbohydrate Polymers*. 2024;15(346):122592. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122592
 Akkamis M., Caliskan S. Effects of different irrigation levels and nitrogen fertilization on some physiological indicators

of potato. *Potato Research*. 2024;67:815-831. DOI: 10.1007/s11540-023-09668-y

Fleming S.A., Morris J.R. Perspective: potatoes, quality carbohydrates, and dietary patterns. *Advances in Nutrition*. 2024;15(1):100138. DOI: 10.1016/j.advnut.2023.10.010
 Gervais T., Creelman A., Li X.Q., Bizimungu B., De Koeper D., Dahal K. Potato response to drought stress: physiological and growth basis. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:698060. DOI: 10.3389/fpls.2021.698060
 Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;(1):17-26. [in Russian] (Головко Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор. *Теоретическая и прикладная экология*. 2022;(1):17-26). DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026
 GOST 26176-2019. Interstate standard. Fodders, mixed feeds. Methods for determination of soluble and hydrolysable carbohydrates. Moscow: Standartinform; 2020. [in Russian] (ГОСТ 26176-2019. Межгосударственный стандарт. Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидрализуемых углеводов. Москва: Стандартинформ; 2020). URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/71328/> [дата обращения: 23.12.2024].
 GOST 27894.4-88. State standard of the USSR. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determination of nitrate nitrogen. Moscow; 1989. [in Russian] (ГОСТ 27894.4-88. Государственный стандарт Союза ССР. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения нитратного азота. Москва; 1989). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294826/4294826848.pdf> [дата обращения: 23.12.2024].
 GOST 27894.5-88. State standard of the USSR. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determination of mobile forms of phosphorus. Moscow; 1989. [in Russian] (ГОСТ 27894.5-88. Государственный стандарт Союза ССР. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения подвижных форм фосфора. Москва; 1989). URL: <https://meganorm.ru/Index/11/11448.htm> [дата обращения: 23.12.2024].
 GOST 27894.6-88. State standard of the USSR. Peat and products of its processing for agriculture. Method for determination of mobile forms of potassium. Moscow; 1989. [in Russian] (ГОСТ 27894.6-88. Государственный стандарт Союза ССР. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Метод определения подвижных форм калия. Москва; 1989). URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294826/4294826846.htm> [дата обращения: 23.12.2024].
 GOST 33977-2016. Interstate standard. Fruit and vegetable products. Methods for determination of total solids content. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 33977-2016. Межгосударственный стандарт. Продукты переработки фруктов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64328/> [дата обращения: 23.12.2024].
 GOST 33996-2016. Interstate standard. Seed potatoes. Specifications and methods of determining the quality. Moscow: Standartinform; 2020. [in Russian] (ГОСТ 33996-2016. Межгосударственный стандарт. Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. Москва: Стандартинформ; 2020). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143601> [дата обращения: 23.12.2024].

- Haider M.W., Nafees M., Iqbal R., Asad H.U., Azeem F., Shaheen G. et al. Postharvest starch and sugars adjustment in potato tubers of wide-ranging dormancy genotypes subjected to various sprout forcing techniques. *Scientific Reports*. 2023;13(1):14845. DOI: 10.1038/s41598-023-37711-y
- Kolodina E.V., Chirkova V.Yu., Sharlaeva E.A. Influence of ultra-violet radiation on the content of photosynthetic pigments in lettuce leaves (Vliyaniye ultrafioletovogo izlucheniya na sodержaniye fotosinteticheskikh pigmentov v listyakh salata). *Trudy molodykh uchenykh Altayskogo gosudarstvennogo universiteta = Transactions by Young Scientists of Altai State University*. 2021;(18):8-10. [in Russian] (Колодина Е.В., Чиркова В.Ю., Шарлаева Е.А. Влияние ультрафиолетового излучения на содержание фотосинтетических пигментов в листьях салата. *Труды молодых ученых Алтайского государственного университета*. 2021;(18):8-10).
- Kurdziel M., Łabanowska M., Pietrzyk S., Pająk P., Królikowska K., Szwengiel A. The effect of UV-B irradiation on structural and functional properties of corn and potato starches and their components. *Carbohydrate Polymers*. 2022;289:119439. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119439
- Nikonovich T.V., Kardis T.V., Kilchevsky A.V., Filipenya V.L., Chizhik O.V., Trofimov Yu.V. et al. Analysis of varietal differences in regenerated potato plants *in vitro* using LED lamps (Analiz sortovykh razlichiy rasteniy-regenerantov kartofelya *in vitro* pri ispolzovanii svetodiodnykh svetilnikov). *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2018;(1):73-78. [in Russian] (Никонович Т.В., Кардис Т.В., Кильчевский А.В., Филипеня В.Л., Чижик О.В., Трофимов Ю.В. и др. Анализ сортовых различий растений-регенерантов картофеля *in vitro* при использовании светодиодных светильников. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;(1):73-78).
- Pradedova E.V., Isheeva O.D., Salyaev R.K. Classification of the antioxidant defense system as the ground for reasonable organization of experimental studies of the oxidative stress in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2011;58(2):210-217. DOI: 10.1134/S1021443711020166
- Qi W., Ma J., Zhang J., Gui M., Li J., Zhang L. Effects of low doses of UV-B radiation supplementation on tuber quality in purple potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Signaling and Behavior*. 2020;15(9):1783490. DOI: 10.1080/15592324.2020.1783490
- Rozentsvet O.A., Bogdanova E.S., Bakunov A.L., Sablina N.A., Rubtsov S.L., Mielekhin A.V. Dynamics of yield, tuber quality and parameters of the photosynthetic apparatus during long-term reproduction of potato varieties. *Zemledelie = Crop Farming*. 2024;(8):31-35. [in Russian] (Розенцвет О.А., Богданова Е.С., Бакунов А.Л., Саблина Н.А., Рубцов С.Л., Милехин А.В. Динамика урожайности, качества клубней и параметров фотосинтетического аппарата при длительном репродукции сорта картофеля. *Земледелие*. 2024(8):31-35). DOI: 10.24412/0044-3913-2024-8-31-35
- Sayapova M.G., Karpukhin M.Yu., Keyta F. Potato seed production (Semenovodstvo kartofelya). *Youth and Science*. 2018;(7):54. [in Russian] (Саяпова М.Г., Карпукхин М.Г., Кейта Ф. Семеноводство картофеля. *Молодежь и наука*. 2018;(7):54).
- Serderov V.K., Chanbabaev T.G., Serderova D.V. Change of maintenance of dry substances and starch in tubers of potato in dependence on terms of till. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;(2):80-83. [in Russian] (Сердеров В.К., Ханбабаев Т.Г., Сердерова Д.В. Изменение содержания сухого вещества и крахмала в клубнях картофеля в зависимости от условий возделывания. *Овощи России*. 2019;(2):80-83). DOI: 10.18619/2072-9146-2019-2-80-83
- Sergeeva E.M., Larichev K.T., Salina E.A., Kochetov A.V. Starch metabolism in potato *Solanum tuberosum* L. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(3):250-263. DOI: 10.18699/VJGB-22-32
- Shanina E.P., Oberiukhtin D.A., Chernitskiy A.E. Potato juice vs. traditional potato use – A new insight (review). *Agricultural Biology*. 2024;59(1):22-38. DOI: 10.15389/agrobiology.2024.1.22eng
- Smirnova Yu.D., Podolian E.A. Techniques for increasing the efficiency of microclonal propagation of potatoes (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):319-329. [in Russian] (Смирнова Ю.Д., Подольян Е.А. Приемы повышения эффективности микроклонального размножения картофеля (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(3):319-329). DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329
- Solovchenko A.E., Merzlyak M.N. Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008;55(6):719-737. DOI: 10.1134/S1021443708060010
- Theeuwes T.P.J.M., Logie L.L., Harbinson J., Aarts M.G.M. Genetics as a key to improving crop photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 2022;73(10):3122-3137. DOI: 10.1093/jxb/erac076
- Voronkova M.V. Protein-carbohydrate complex of potato tubers. *Scientific Notes of Orel State University. Series: Natural, Technical and Medical Sciences*. 2012;(6-1):373-377. [in Russian] (Воронкова М.В. Белково-углеводный комплекс клубней картофеля. *Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки*. 2012;(6-1):373-377).
- Wintermans J.E.G., de Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll *a* and *b* and their pheophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1965;109(2):448-453. DOI: 10.1016/0926-6585(65)90170-6

Информация об авторах

София Вячеславовна Щербёнок, младший научный сотрудник, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УРО РАН, 614532 Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, аспирант, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, 614990 Россия, Пермь, ул. Петропавловская, 23, sshcherbenok@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9610-6207>

Татьяна Николаевна Лисина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского

центра УрО РАН, 614532 Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, pniish@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0316-0010>

Сергей Леонидович Елисеев, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, 614990 Россия, Пермь, ул. Петropавловская, 23, info@pgatu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8990-7407>

Дмитрий Юрьевич Каракайтис, младший научный сотрудник, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, 614532 Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, pniish@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3858-2419>

Information about the authors

Sofya V. Shcherbyonok, Associate Researcher, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture – division of Perm Federal Research Center, UrB RAS, 12 Kultury St., Lobanovo, Perm Territory 614532, Russia, Postgraduate Student, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, 23 Petropavlovskaya St., Perm 614990, Russia, ssherbenok@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9610-6207>

Tatyana N. Lisina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture – division of Perm Federal Research Center, UrB RAS, 12 Kultury St., Lobanovo, Perm Territory 614532, Russia, pniish@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0316-0010>

Sergey L. Eliseev, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, 23 Petropavlovskaya St., Perm 614990, Russia, info@pgatu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8990-7407>

Dmitriy J. Karakajtis, Associate Researcher, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture – division of Perm Federal Research Center, UrB RAS, 12 Kultury St., Lobanovo, Perm Territory 614532, Russia, pniish@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3858-2419>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.03.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 18.07.2025. The article was submitted on 01.03.2025; approved after reviewing on 02.06.2025; accepted for publication on 18.07.2025.