

Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 1 (57). С. 12–21
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2026; (1-57): 12–21

Научная статья

УДК 633.11.581.17:633.112
Код ВАК 4.1.1

DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_12_21
EDN: KТBYDO

БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕАКЦИИ СТРЕССА КАРТОФЕЛЯ, ВЫЗВАННОГО ПОЧВЕННОЙ ЗАСУХОЙ

Дмитрий Иванович Еремин¹, Екатерина Сергеевна Родина², Виктория Викторовна Сахарова³

^{1, 2, 3} Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия

¹ soil-tyumen@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3672-6060>

² katy_291@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7636-5303>

³ saharova.vv@edu.gausz.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4996-5542>

Аннотация. Цель исследований – определение стрессоустойчивости картофеля по содержанию в листьях белкового и нитратного азота, оценка перспективных генотипов по биохимическому маркеру для включения их в селекционную программу по созданию засухоустойчивых сортов. Исследования проводили в модельном опыте с регулируемыми гидротермическими условиями на базе Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья – филиала Тюменского научного центра сибирского отделения Российской академии наук. В опыте использовали картофель 6 сортов и 8 селекционных линий, которые выращивали в двух группах. В контрольной группе растения на протяжении всей вегетации были в оптимальных гидротермических условиях, а опытная группа отличалась наличием почвенной засухи длительностью 20 суток от начала бутонизации картофеля. В листьях картофеля определяли общий, нитратный и белковый азот через 10, 15, 20 суток с момента проявления дефицита почвенной влаги. Установлено, что содержание общего азота в межфазный период «начало бутонизации – цветение» в среднем по коллекции составляет $4,9 \pm 0,7$ %, постепенно увеличиваясь до $5,8 \pm 0,7$ % от воздушно-сухой массы. Доля белкового азота составила 72 %. В ходе проведения опыта были выделены восприимчивые к засухе генотипы картофеля: Розалинд, И7, Жуковский ранний, АВ 68/15, в листьях которых содержание нитратов возрастает в 2,7... 3,3 раза относительно контроля, а отношение нитратного к белковому азоту достигает 1,5... 1,7 при оптимуме 0,3 ед. Выявлены генотипы, характеризующиеся засухоустойчивостью: Исетский, Метеор, И15, И 2/12. Содержание нитратного азота на протяжении 20 суток засухи увеличилось на 11... 39 % относительно контроля, при оптимальном отношении нитратного к белковому азоту (0,3... 0,4). Отмеченные генотипы рекомендуются для углубленного изучения природы стрессоустойчивости картофеля, а группу засухоустойчивых сортов и гибридов необходимо включить в программу по созданию засухоустойчивых сортов.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., абиотические факторы, стрессоустойчивость, почвенная засуха, биохимические маркеры засухоустойчивости, протеин, общий азот в листьях, накопление нитратов.

Благодарности: работа финансировалась за счет средств федерального бюджета на выполнение научно-исследовательских работ по государственному заказу Минсельхоза России FWRZ-2025-0002.

Для цитирования: Еремин Д.И., Родина Е.С., Сахарова В.В. Биохимические основы реакции стресса картофеля, вызванного почвенной засухой // Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 1(57). С. 12–21. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_12_21. EDN: KТBYDO.

Scientific article

BIOCHEMICAL BASIS OF STRESS RESPONSE IN POTATO CAUSED BY SOIL DROUGHT

Dmitry I. Eremin¹, Ekaterina S. Rodina², Victoria V. Sakharova³

^{1, 2, 3} Scientific Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals is a branch of the Federal Research Center of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

¹ soil-tyumen@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3672-6060>

² katy_291@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7636-5303>

³ saharova.vv@edu.gausz.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4996-5542>

Abstract. The purpose of the research is to determine the stress resistance of potatoes based on the content of protein and nitrate nitrogen in the leaves, and to evaluate promising genotypes using a biochemical marker to include them in the breeding program for creating drought-

resistant varieties. The research was conducted in a dummy experiment with controlled hydrothermal conditions on the basis of the Scientific Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals – Division of the Federal Research Centre 'Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences'. In the experiment, there were potatoes of 6 varieties and 8 breeding lines, which were grown in two groups. In the control group, the plants were in optimal hydrothermal conditions throughout the growing season, and the experimental group was characterized by the presence of a soil drought lasting for 20 days from the beginning of potato budding. Total, nitrate, and protein nitrogen were determined in potato leaves in 10, 15, and 20 days after the onset of soil moisture deficiency. It was found that, in the interphase period 'budding – flowering', the total content of nitrogen averages $4.9 \pm 0.7\%$ in the collection, gradually increasing to $5.8 \pm 0.7\%$ of the air-dry weight. The proportion of protein nitrogen was 72%. During the experiment, the potato genotypes susceptible to drought were identified as follows: Rosalind, I 7, Zhukovsky early, AB 68/15 varieties, in the leaves of which the nitrate content increases 2.7...3.3 times relative to the control group, and the ratio of nitrate to protein nitrogen reaches 1.5...1.7 with an optimum of 0.3 units. The following drought-resistant genotypes have been identified: Isetsky, Meteor, I 15, I 2/12 varieties. The content of nitrate nitrogen during 20 days of drought increased by 11...39% relative to the control group, with an optimal ratio of nitrate to protein nitrogen (0.3...0.4). The mentioned genotypes are recommended for an in-depth study of the nature of potato stress resistance, as for the group of drought-resistant varieties and hybrids, they should be included in the program for creating drought-resistant varieties.

Keywords: *Solanum tuberosum L.*, abiotic factors, stress resistance, soil drought, biochemical markers of drought resistance, protein, total nitrogen in leaves, accumulation of nitrates.

Acknowledgments: the work was funded from the federal budget for scientific research implementation on the state order of the Ministry of Agriculture of Russia FWRZ-2025-0002.

For citation: Eremin D.I., Rodina E.S., Sakharova V.V. Biochemical basis of stress response in potato caused by soil drought // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2026; (1-57): 12–21. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_57_12_21. EDN: KTBVDO. (In Russ.).

Введение. Засуха для современного сельского хозяйства представляет собой серьезную проблему во всем мире. По прогнозам ученых, глобальное изменение климата в будущем еще больше усугубит эту проблему. Уже сейчас климатологи фиксируют по всей планете сокращение периодичности и увеличение продолжительности почвенных и атмосферных засух [1]. Среди сельскохозяйственных культур картофель занимает особое место. Его выращивают более чем в ста странах мира и по занимаемой площади он стоит на четвертом месте, уступая пшенице, кукурузе и рису. Для картофеля дефицит почвенной влаги крайне важен, поскольку даже самая кратковременная засуха может привести к существенному снижению его продуктивности [2; 3]. Поэтому предпринимаются усилия по совершенствованию системы производства картофеля, начиная от выбора механической обработки почвы и заканчивая выведением засухоустойчивых сортов, адаптированных к дефициту влаги [4]. Традиционно селекция картофеля базируется на учете общей реакции в ответ различным абиотическим факторам, выражаемой в снижении урожайности, морфологии растения, при этом физиологический и биохимический уровни практически не рассматриваются. В последние десятилетия проблему засухоустойчивости картофеля стали рассматривать с позиции генетики и геномной инженерии. В литературе встречаются публикации об успешном внедрении генов устойчивости к засухе и получении трансгенного картофеля, обладающего суперустойчивостью к почвенной засухе [5]. Однако в современной селекции эти методы не распространены по разным причинам, но именно они дали понимание механизма, препятствующего стрессу от различных абиотических факторов. Главным образом засухоустойчивость растения определяется накоплением определенных групп фитогормонов,

белков, липидов и углеводов, а также блокированием нежелательных реакций клеточного метаболизма [6].

Это дало новый инструмент селекционерам в отношении оценки засухоустойчивости и поиска генотипов, наиболее отвечающих требованиям в селекционном отношении. Физиологический и биохимический подходы, как подтверждают исследования передовых селекционных центров, имеют право на существование наряду с традиционными морфологическими и фенотипическими подходами при создании новых сортов. К наиболее эффективным способам оценки засухоустойчивости картофеля отнесены: содержание и качественный состав хлорофилла, устойчивость клеточных мембран, содержание белкового и небелкового азота в листьях [7]. Эти показатели напрямую связаны с устьичной проводимостью, транспирацией воды и фотосинтезом [8].

Во время агрохимических исследований, которые были направлены на диагностику питания растений, учеными неоднократно отмечалось изменение соотношения белкового азота и нитратами в листьях растений [9]. Вначале это было принято за сортовые особенности, но при проведении модельных опытов в регулируемых гидротермических условиях было установлено, что при появлении стрессовых условий практически все растения характеризовались повышением содержания нитратов на фоне снижения белкового азота [10]. После детальных биохимических исследований был определен и механизм таких изменений. Он заключался в накоплении реактивных форм кислорода, которые вызывают окисление липидов и белков в клетках растений за счет появления свободных радикалов. Незначительный дисбаланс активного кислорода регулируется антиоксидантами и является сигналом растению о неблагоприятных условиях, который запускает механизм противодействия им.

На начальном этапе возникновения стресса происходит нарушение соотношения активных форм кислорода (АФК) к антиоксидантам, находящимся в клетках. По мере накопления АФК антиоксиданты расходуются, тем самым стабилизируют содержание супероксиданиона и перекиси водорода. В этот период растение готовится к сопротивлению воздействия стресс-фактора и сохранению жизнеспособности [11; 12].

При дефиците антиоксидантов в клетках растений активные формы кислорода прежде всего окисляют липиды, входящие в состав мембран, что и является биохимической и физиологической основой начала формирования стресса [13]. Следующим этапом является окисление белковых веществ и нарушение их синтеза или трансформации [14]. Помимо этого, АФК не только нарушают синтез аминокислот, но и окисляют их вплоть до нитратов. Поэтому в качестве маркера для быстрой диагностики проявления стрессов можно использовать динамику содержания нитратов в надземных частях растений.

Цель исследований – изучение биохимической реакции картофеля под действием стресса вызванного длительной почвенной засухой. Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач: изучить динамику содержания нитратного и белкового азота в листьях генотипов картофеля в оптимальных гидротермических условиях и под воздействием почвенной засухи; установить изменение содержания общего азота в листьях картофеля при почвенной засухе; рассчитать соотношение между содержанием нитратов и белкового азота в листьях картофеля при дефиците почвенной влаги.

Материалы и методы. Изучение засухоустойчивости картофеля проводили в регулируемых условиях (фитотрон) на базе молодежной лаборатории генетики и селекции, созданной в НИИСХ Северного Зауралья – филиала ФИЦ «Тюменский научный центр» СО РАН. Исследованию подверглись 6 сортов картофеля (Жуковский ранний, Розалинд, Адретта, Исетский, Ирбитский и Метеор), ранее зарекомендовавших себя по хозяйственно ценным свойствам и признанными оптимальными родительскими генотипами для селекции. Также были взяты 8 гибридов селекции НИИСХ Северного Зауралья – филиала ТюмНЦ СО РАН: И-48, И-2/12, И-7, И-15, АВ 68/15, АВ 64/10, АВ 51/10 и МЖ 81/6.

Для исследований были отобраны клубни урожая 2024 года, которые были одного размера (диаметр 5-6 см) и прошедших диагностику фитопатогенов методом полимеразно-цепной реакции (ПЦР) на отсутствие вирусов. Субстрат для опыта готовили самостоятельно: 2 части торфо-песчаной смеси, 1 часть почвы с пахотного слоя опытного

поля. После тщательного перемешивания смеси были определены ее физико-химические и агрохимические свойства. Почвогрунт имел следующую характеристику: содержание органического вещества (ГОСТ 26213-2021) 20...25 %; емкость катионного обмена (ГОСТ 17.4.4.01-84) – 150 мг-экв./100 г почвы; гидролитическая кислотность (ГОСТ 26212-2021) – 16 мг-экв./100 г почвы; рН солевой вытяжки (ГОСТ Р 58594-2019) – 5,5 ед.; содержание доступных для растений форм азота, фосфора и калия (ГОСТ 26951-86; ГОСТ Р 54650-2011) составило 25, 120 и 230 мг/кг почвогрунта соответственно. Далее полученной почвосмесью заполняли пластиковые сосуды емкостью 10 литров и насыщали водой до уровня полной влагоемкости. После стекания гравитационной воды в поддон почвогрунт уплотнялся до равновесной плотности (0,8...1,0 г/см³), а его влажность соответствовала 0,7...0,8 наименьшей влагоемкости. Полив осуществляли водопроводной водой с водородным показателем (рН) 7,6 ед. и электропроводностью 20,00 мкСм/м.

Посадку клубней провели 28 марта 2025 года на глубину 10 см. Каждый генотип высаживали в трехкратном повторении в отдельных сосудах. С появлением всходов включали искусственное освещение, создавая 16-часовой световой день и 8-часовую полноценную ночь. Источником света были лампы ДНАТ мощностью 600 Вт, имеющие максимально соответствующий солнцу спектр. Температурный режим в фитотроне был оптимальным для развития картофеля: днем +20...+23, ночью +16...18 °С.

Для сравнительной оценки были сформированы 2 группы растений: контрольная, которая развивалась в оптимальных по увлажнению условиях; опытная, у которой с появлением признаков бутонизации прекращали полив и через 10 суток проводили первый отбор растительного материала для лабораторных исследований. Отборы образцов повторяли через 15 и 20 суток после прекращения полива, получая динамику изменения целевых показателей на протяжении всего засушливого периода. После последнего отбора полив возобновляли. Для анализа брали три полностью сформировавшихся листа, находящиеся на вершинах побегов. Отбор вели от всех растений, включая контроль. Химический анализ проводили отдельно по каждому растению с последующим усреднением результатов.

В агрохимической лаборатории НИИСХ Северного Зауралья определяли: массовую концентрацию азота методом Къельдаля (ГОСТ 17837-2013) на автоматическом анализаторе азота UDK 159 от производителя Velp; нитратный азот – ионометрическим методом (ГОСТ 34570-2019). Для определения белкового азота использовали фос-

фатный буфер и реагент Бредфорда [15]. Оптическую плотность установили на спектрофотометре Beckman DU ® 640 при длине волны 595 нм. Образцы листьев подвергались анализу в день сбора, чтобы исключить вероятность перехода азота из одной формы в другую.

Полученные результаты лабораторных исследований подвергли статистической обработке дисперсионным методом с применением программного продукта Microsoft Excel из пакета Microsoft Office 2019 Professional.

Результаты исследований и их обсуждение. Активное поглощение минерального азота в первой половине вегетации, как отмечают И. А. Бобренко с коллегами, является характерной особенностью картофеля [16]. К началу бутонизации среднее содержание общего азота по коллекции составило 4,9 % от воздушно-сухой массы (рисунок 1). Было отмечено варьирование по генотипам: минимум был у гибрида И7 – 4,2 %, тогда как у сорта Исетский и И15 он достиг 6,0 и 6,2 % при стандартной ошибке 0,2 %. Установленный факт указывает на сортовые особенности картофеля в отношении эффективности поглощения минерального азота из почвы. О сортовых особенностях эффективности поглощения элементов минерального питания, также ранее отмечал С. В. Жевора, после серии проведенных опытов в коллекции картофеля [17].

На протяжении 20 суток в оптимальных условиях содержание общего азота достоверно ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$ при $p = 0,05$) возросло в листьях сортов Исетский, Ирбитский, Адретта и гибридов – И15, И48, МЖ 81/6, И2/12.

Активная трансформация минерального азота в органические формы – показатель стабильно-

сти биохимического и физиологического состояния растений. В оптимальных гидротермических условиях (влажность 0,7НВ, температура почвы 16 °С), создаваемых искусственно в фитотроне среднее содержание белкового азота в период бутонизации варьировалась от 3,1 (АВ 51/10) до 4,5 (И 15) при среднем значении по коллекции 3,6 %. На протяжении 20 суток средняя величина возросла до 4,2 %, что указывает на динамичность показателя. В течение этого времени ни у одного растения картофеля не было выявлено снижения содержания протеина в листьях.

В отношении нитратного азота также были выявлены сортовые особенности. Минимальное его содержание (0,8...1,1 %) было в листьях следующих генотипов: И7, Розалинд, АВ 68/15, Жуковский ранний, АВ 51/10 (рисунок 2). Максимальное содержание нитратного азота (1,4...1,6 %) было зафиксировано в листьях селекционных линий И 2/12, И15 и сорта Исетский. На протяжении 20 суток от начала бутонизации статистически значимое ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$ при $p = 0,05$) увеличение содержания нитратов (на 0,3...0,5%) было зафиксировано в следующих генотипах: И7, И48, И15, Розалинд, АВ 68/15.

Таким образом, в оптимальных условиях для роста и развития в межфазный период бутонизация-цветение, в листьях происходит постепенное повышение белковых форм азота, при относительно стабильном содержании нитратов, количество которых поддерживается благодаря постоянному движению от корней к листьям. Данный механизм был хорошо изучен многими физиологами и биохимиками [18; 19]. В среднем по коллекции генотипов картофеля можно отметить, что в оптимальных условиях содержание нитратного азота

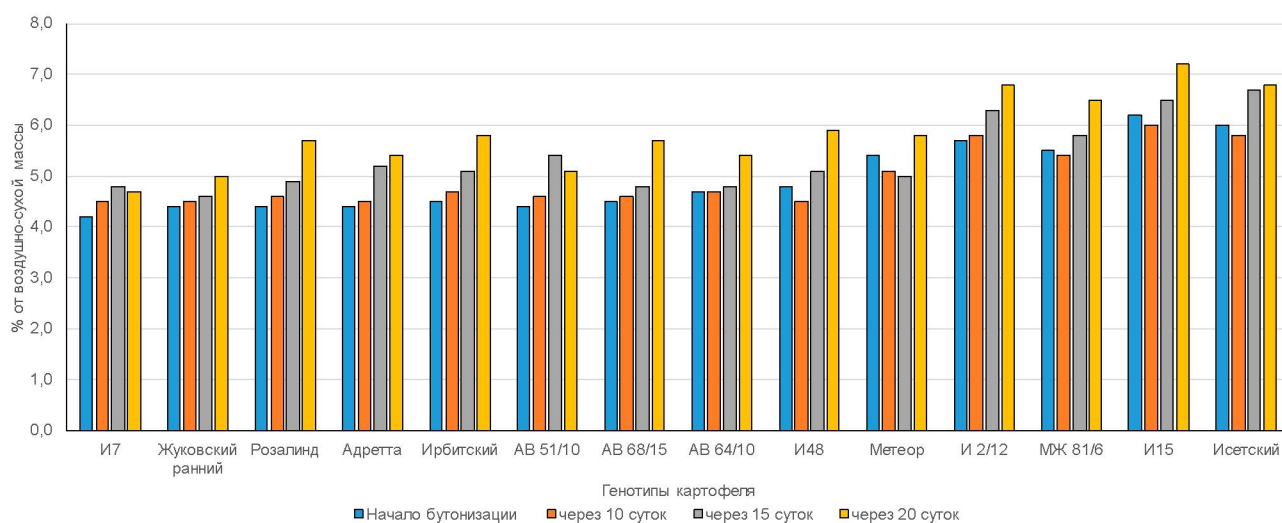


Рисунок 1 – Содержание общего азота в листьях картофеля

при оптимальных по увлажнению условиях, % от воздушно-сухой массы

Figure 1 – Total nitrogen content in potato leaves under optimal moisture conditions, % of air-dry weight

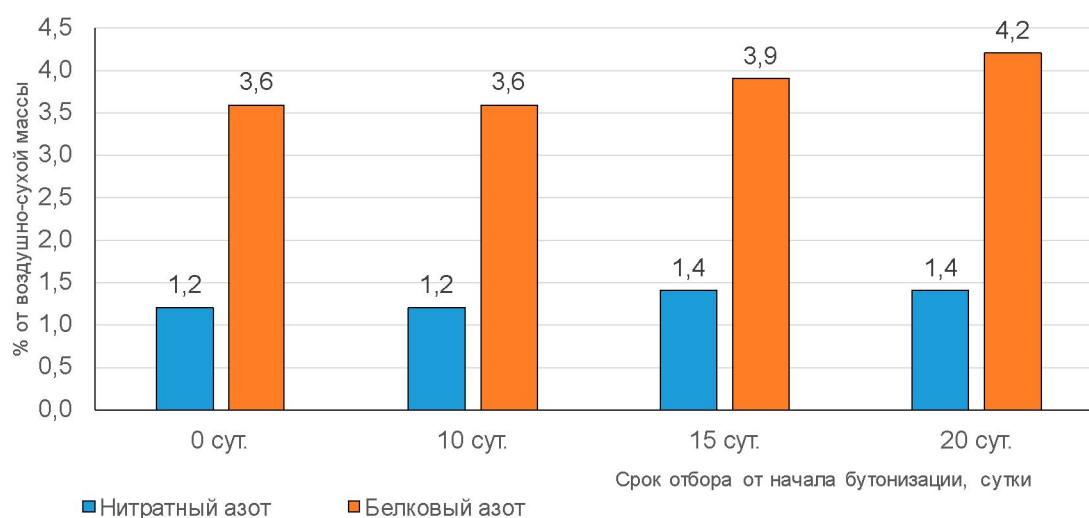


Рисунок 2 – Динамика содержания нитратного и белкового азота в листьях картофеля (в среднем по 14 генотипам) при оптимальном увлажнении, %

Figure 2 – Dynamics of nitrate and protein nitrogen content in potato leaves (on average for 14 genotypes) with optimal moisture, %

в период от бутонизации до цветения выращиваемая изменяется незначительно – от 1,2 до 1,4 %, при коэффициенте вариации 9 %. Содержание белкового азота в листьях достоверно увеличивается от 3,6 до 4,2 %. При изучении биохимической реакции на стресс, вызванный абиотическими факторами, необходимо учесть, что накопление белкового азота происходит и в оптимальных условиях. Поэтому оценка только по одному из показателей (нитраты и белковый азот) не будет отражать реакцию картофеля на стресс. Для мониторинга состояния физиологических и биохимических процессов лучше использовать отношение содержания нитратного и белкового азота в листьях картофеля. Наши исследования показали, что при оптимальных условиях для роста и развития картофеля данный показатель составил 0,3...0,4 независимо от генотипа и продолжительности межфазного периода «бутонизация – цветение».

Проявление стресса у картофеля, возникающего от воздействия различных факторов (биотические, абиотические), неминуемо приводит к нарушению биохимических и физиологических процессов на клеточном уровне. Именно поэтому даже кратковременный стресс способен достаточно сильно влиять на продуктивность растений. Как показали наши исследования, дефицит почвенной влаги на протяжении 10 суток от начала бутонизации привел к серьезным изменениям в листьях картофеля. Уже на этом этапе изучаемые генотипы разделились по устойчивости к стрессу. Содержание белкового азота в листьях не изменилось только у селекционной линии И15 и сорта Исетский – отклонения относительно контроля (оптималь-

ные условия) не превышали ошибку опыта (таблица). В листьях генотипов Жуковский ранний и АВ 68/15 за этот же период произошло снижение содержания протеина на 26 и 31 % относительно контроля, что указывает на явное нарушение биохимических реакций. Увеличение продолжительности почвенной засухи до 15 суток привело к тому, что в группу наиболее чувствительных генотипов картофеля вошли Розалинд, И7, АВ 64/10, И48, у которых снижение содержания протеина в листьях составило 28...39 % относительно растений, не испытывающих дефицита почвенной влаги (контроль). Нужно отметить, что генотипы Исетский, И15, И 2/12 проявляли минимальные нарушения синтеза протеина в вегетирующей массе – снижение составило 3...7 % относительно контроля.

Моделирование экстремальной почвенной засухи продолжительностью 20 суток привело проявлению мощнейшего стресса, по которому можно судить о стрессоустойчивости отдельных генотипов картофеля. Так, АВ 68/15, Жуковский ранний, Розалинд, И7 за этот период потеряли 55...61 % синтезированного ранее протеина. Это подтверждает восприимчивость указанных генотипов к почвенной засухе. В этих же условиях селекционная линия И15 сохранила протеин в листьях на первоначальном уровне (4,3 %). Селекционная линия И 2/12 и сорт Исетский имели положительную тенденцию к восстановлению синтеза протеина – в их листьях на 20 сутки почвенной засухи содержание белкового азота возросло на 8 и 15% относительно показателей, полученных на 15-е сутки).

Кратковременная засуха (10 суток) привела к расширению диапазона содержания нитратов в листьях растений – от 1,3 (АВ 64/10, Розалинд) до 1,7...1,9 % (Метеор, АВ 68/15, Жуковский ранний). На данном этапе проявились генотипы с контрастной реакцией на почвенную засуху (таблица). Генотипы Исетский, И15, И 2/12, МЖ 81/6, АВ 64/10 не имели статистически значимой разницы относительно контроля ($F_{\text{факт.}} < F_{\text{теор.}}$ при $p = 0,05$). Противоположная по эффекту группа (И7, АВ 68/15, Жуковский ранний) характеризовалась максимальным накоплением нитратов в листьях – 1,4...1,9 % от воздушно-сухой массы. Превышение относительно контроля, растущего в оптимальных гидротермических условиях, составило 70...76 %, что указывает на формирование стресса. Продолжающаяся почвенная засуха (в течение 15 суток) увеличила содержание нитратного азота у этих генотипов на 123...167 %, тогда как у группы устойчивых этот показатель не превышал 20 %.

В условиях экстремальной засухи (в течение 20 суток) в листьях генотипов картофеля: Исетский, Метеор, И15, И 2/12 было зафиксировано достоверное превышение содержания нитратов на 11...39 % относительно контроля, тогда как

у группы восприимчивых к засухе этот показатель был в 6–12 раз больше.

Для оценки совокупного эффекта от влияния засухи на биохимические реакции, протекающие в клетках картофеля, можно воспользоваться отношением содержания нитратного и белкового азота в листьях. Как было отмечено ранее, варьирование отношения нитратного к белковому азоту в листьях в начале бутонизации картофеля было минимальным – 0,3...0,4 ед. (рисунок 3). При кратковременном дефиците влаги (в течение 10 суток) диапазон значений увеличился до 0,3...0,8 ед. Наиболее высокие значения (0,6...0,8) были у генотипов АВ 51/10, АВ 68/15 и Жуковского раннего. После 15 суток засухи лишь 4 генотипа характеризовались отношением нитратного к белковому азоту на уровне контроля – И15, И 2/12, Исетский, МЖ 81/6. Длительный дефицит почвенной влаги (в течение 20 суток) не оказал существенного влияния на биохимические и физиологические реакции этих генотипов.

Остальные генотипы картофеля в разной степени реагировали на почвенную засуху. Средний уровень угнетения был зафиксирован у сортов Метеор, Ирбитский и Адретта, а также у селекционных линий И48, АВ 64/10, АВ 51/10 – отношение

Таблица – Содержание белкового и нитратного азота в листьях картофеля в условиях почвенной засухи, % от воздушно-сухой массы

Table – The content of protein and nitrate nitrogen in potato leaves in conditions of soil drought, % of the air-dry weight

Генотип	Белковый азот					Нитратный азот				
	0 сут.	10 сут.	15 сут.	20 сут.	Средн.	0 сут.	10 сут.	15 сут.	20 сут.	Средн.
АВ 51/10	3,1	2,6	2,5	2,6	2,7	1,1	1,5	1,7	2,6	1,7
АВ 64/10	3,5	3,2	2,5	2,5	2,9	1,2	1,3	1,9	2,2	1,6
АВ 68/15	3,3	2,3	1,7	1,7	2,3	1,0	1,7	2,4	2,7	1,9
Адретта	3,1	2,8	2,5	2,4	2,7	1,2	1,4	1,6	2,4	1,6
Жуковский ранний	3,3	2,4	1,8	1,7	2,3	1,1	1,9	2,4	2,9	2,1
И 2/12	4,1	3,8	4,0	4,3	4,1	1,4	1,5	1,6	2,0	1,6
И15	4,5	4,7	4,2	4,3	4,4	1,5	1,4	1,7	2,0	1,6
И48	3,5	3,2	2,5	2,7	3,0	1,3	1,6	1,8	2,1	1,7
И7	3,2	2,6	2,0	1,8	2,4	0,8	1,4	2,2	2,7	1,8
Ирбитский	3,2	2,8	2,7	2,7	2,9	1,2	1,5	1,7	2,1	1,6
Исетский	4,3	4,2	4,0	4,6	4,3	1,6	1,5	1,4	1,8	1,6
Метеор	3,9	3,5	3,1	2,9	3,4	1,3	1,7	1,9	1,7	1,7
МЖ 81/6	4,1	3,8	3,3	3,8	3,7	1,3	1,4	1,6	2,0	1,6
Розалинд	3,3	2,9	2,0	1,8	2,5	1,0	1,3	1,8	2,6	1,7
Среднее	3,6	3,2	2,8	2,8		1,2	1,5	1,8	2,3	

Для белкового азота: НСР05 для фактора А (генотипы) – 0,3 %

НСР05 для фактора В (продолжительность засухи) – 0,2 %

Взаимодействие АВ – 0,4 %

Для нитратного азота: НСР05 для фактора А (генотипы) – 0,4 %

НСР05 для фактора В (продолжительность засухи) – 0,5 %

Взаимодействие АВ – 0,6 %

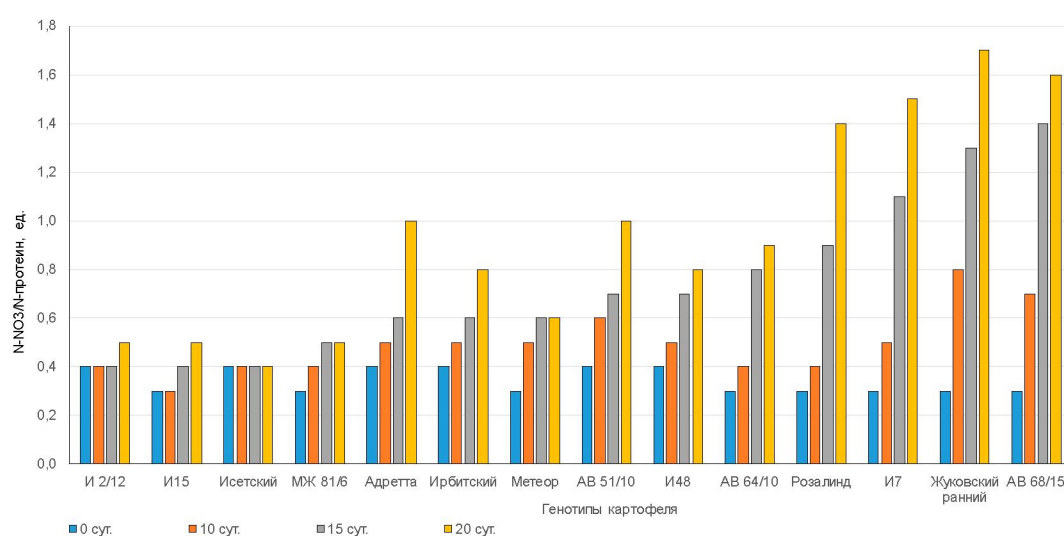


Рисунок 3 – Динамика отношения нитратов к протеину в листьях картофеля при воздействии почвенной засухи, ед.

Figure 3 – Dynamics of the ratio of nitrates to protein in potato leaves under the influence of soil drought, units

нитратного к белковому азоту в листьях составило 0,6...1,0, что в 2 раза выше значений оптимума (0,3...0,4 %). Особо нужно выделить генотипы Розалинд, И7, АВ 68/15 и Жуковский ранний, у которых изучаемый показатель достиг критического уровня – 1,4...1,7 ед., что характерно для погибающих растений [20]. Группой ученых из Канады (Quebec) было установлено, что помимо разрушения белковых веществ и аминокислот в растительных клетках под действием АФК происходит чрезмерное повышение концентрации нитратных и нитритных форм азота, которые парализуют работу устьичного аппарата и хлоропластов. Изменения несут деструкционный характер, который не восстанавливается при прекращении засухи [21; 22].

Заключение. В ходе модельного опыта установлены сортовые особенности накопления общего азота, нитратов и протеина в листьях картофеля в межфазный период «бутонизация – цветение». В среднем по коллекции в оптимальных гидротермических условиях накапливается 4,9...5,8 % общего азота. Максимальное содержание его отмечено в селекционной линии И15 – 6,0–7,2 %, минимальное (4,2–4,7 %) в листьях И7. Содержание нитратов в листьях картофеля варьируется в пределах от 0,8 до 1,9 % в зависимости от сорта и продолжительности межфазного периода «бутонизация – цветение». Количество белкового азота в листьях может изменяться в зависимости от генотипа картофеля и продолжительности вегетации в пределах 3,1–5,1 % от воздушно-сухой массы. Несмотря на динамику и широкие диапазоны значений содержания нитратного и белкового азота в листьях картофеля, их отношение является стабильным показателем – в среднем по коллекции картофеля он составляет 0,3...0,4 ед.

Кратковременная засуха (в течение 10 суток) приводит картофель в стрессовое состояние, выражаемое в изменении азотного режима вегетирующих частей. Содержание нитратного азота в листьях генотипов картофеля И7, АВ 68/15 и Жуковского раннего возросло на 70...76 %, тогда как у сорта Исетский и селекционных линий И15, И 2/12, МЖ 81/6, АВ 64/10 данный показатель оставался на уровне контроля (2,0...2,3 %). Увеличение продолжительности почвенной засухи до 20 суток привело к снижению содержания белкового азота и повышению в листьях количества нитратов у сортов Адретта, Розалинд, Жуковский ранний, а также у селекционных линий АВ 51/10, АВ 68/15, И7 на 104...228 %, что указывает на мощное проявление стресса растений под действием почвенной засухи. В листьях картофеля генотипов Исетский, Метеор, И15, И 2/12 содержание нитратов было минимальным – 11...39 % относительно контроля.

Установлено, что отношение между нитратным и белковым азотом в листьях служит надежным показателем стрессоустойчивости картофеля. В оптимальных гидротермических условиях он составляет 0,3...0,4 ед. и не имеет существенных сортовых различий. Под действием засухи данное отношение у восприимчивых генотипов (Розалинд, И7, АВ 68/15, Жуковский ранний) возрастает до 1,4...1,7 ед., а у стрессоустойчивых (Исетский, И15, И 2/12, МЖ 81/6, Метеор) этот показатель остается на уровне контроля (0,3...0,4 ед.) и не поднимается выше 0,5 ед.

Для изучения природы стрессоустойчивости картофеля рекомендуются генотипы, обладающие контрастным эффектом на почвенную засуху: восприимчивые (Розалинд, И7, АВ 68/15, Жуковский ранний) и засухоустойчивые (Исетский, И15,

И 2/12, МЖ 81/6). Сорты картофеля с выраженной устойчивостью к почвенной засухе (Исетский, Метеор и Ирбитский) рекомендуются для включения в программу по созданию засухоустойчивых сортов. Селекционные линии И15, И 2/12, МЖ 81/6, И48 необходимо считать ценными и продолжить с ними селекционную работу.

В качестве биохимического маркера рекомендуется использовать отношение содержания нитратного к белковому азоту в листьях вегетирующего картофеля.

Список источников

1. Effect of climate change on potato yield and starch content / M. Gouerou [et al.] // *Field Crops Research*. 2025. Vol. 330. P. 109951. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.109951. EDN: ZJAWGV.
2. Potato Response to Drought Stress: Physiological and Growth Basis / T. Gervais [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.698060. EDN: XZAFOE.
3. Газданова И.О., Догузова Н.Н., Пухаев А.Р. Анализ устойчивости сортов картофеля Российской селекции к болезням в Северо-Кавказском регионе // *Нива Поволжья*. 2025. № 4(76). DOI: 10.36461/NP.2025.76.4.002. EDN: EONXCK.
4. Влияние морфологических параметров растений на продуктивность картофеля в условиях засушливого климата / А.Л. Бакунов [и др.] // *Вестник КрасГАУ*. 2025. № 8 (221). С. 53-64. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-53-64. EDN: SITPUV.
5. Chairi F., Lateur M., Muhovski Y. Genotypic variation in agronomic and physiological responses of potato cultivars to water stress under greenhouse conditions // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. P. 1692962. DOI: 10.3389/fpls.2025.1692962. EDN: IOWTJE.
6. Bell L., Radha K., Hill D. The smell of spud-stress: a pilot study testing the viability of volatile organic compounds as markers of drought stress in potato (*Solanum tuberosum*) // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. P. 1579611. DOI: 10.3389/fpls.2025.1579611. EDN: BMIUSC.
7. Moderate intermittent water deficit enhances dry matter remobilization, nitrogen uptake, and water and nitrogen use efficiency in winter wheat / Ch. Ru [et al.] // *Agriculture Communications*. 2025. Vol. 3. No. 3. P. 100098. DOI: 10.1016/j.agrcom.2025.100098. EDN: NFQKPU.
8. Beauclaire Q., Vanden Brande F., Longdoz B. Key role played by mesophyll conductance in limiting carbon assimilation and transpiration of potato under soil water stress // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. DOI: 10.3389/fpls.2024.1500624. EDN: VRMOLG.
9. Ермохин Ю.И., Абеуов С.К., Шойкин О.Д. Оценка доли участия каждого элемента питания в создании прибавки урожая клубней картофеля от NPK в условиях Павлодарской области // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021. № 1 (195). С. 28-35. EDN: VMOMIK.
10. Effects of Elevated Temperature on Agronomic, Morphological, Physiological and Biochemical Characteristics of Potato Genotypes: 2. Physiological and Biochemical Traits / E.K. Naawe [et al.] // *Potato Research*. 2024. DOI: 10.1007/s11540-024-09815-z. EDN: KSWKXY.
11. Активные формы кислорода и компоненты антиоксидантной системы – участники метаболизма растений. Взаимосвязь с фенольным и углеводным обменом / К.М. Никерова [и др.] // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2021. № 3. С. 5-20. DOI: 10.17076/eb1312. EDN: DZLLLLP.
12. Reactive oxygen species scavenging mechanisms associated with polyethylene glycol mediated osmotic stress tolerance in Chinese potato / M.R. Sahoo [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 5404. DOI: 10.1038/s41598-020-62317-z. EDN: TIBMOD.
13. Ферменты антиоксидантной системы клетки в условиях засухи / К. Алиев [и др.] // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*. 2016. Т. 59. № 7-8. С. 350-355. EDN: XEGASN.
14. Davies M.J. Reactive species formed on proteins exposed to singlet oxygen // *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2004. Vol. 3. No. 1. P. 17-25. DOI: 10.1039/b307576c. EDN: FLWBUN.
15. Eremin D.I., Lyubimova A.V., Akhtyamova A.A. Protein nitrogen as an indicator of determining the degree of stress in oats during soil drought // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023. Vol. 23. No. 12. P. 46-54. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-46-54. EDN: EMRGQX.
16. Бобренко И.А., Матвейчик О.А., Кормин В.П. Агрхимические нормативные показатели минерального питания картофеля в лесостепи Западной Сибири // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2021. № 1 (41). С. 12-19. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_12. EDN: CBBHRB.
17. Жевора С.В. Реакция сортов картофеля на введение в систему минерального питания стабилизированного карбамида UTEC46 // *Плодородие*. 2021. № 3 (120). С. 76-80. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.14. EDN: QWFATS.

18. Yield and Nitrogen Use of Irrigated Processing Potato in Response to Placement, Timing and Source of Nitrogen Fertilizer in Manitoba / X. Gao [et al.] // *American Journal of Potato Research*. 2018. Vol. 95. No. 5. P. 513-525. DOI: 10.1007/s12230-018-9656-y. EDN: NTOMEB.

19. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part II: Plant Nutrition and Tuber Quality / M. Naumann [et al.] // *Potato Research*. 2020. Vol. 63. Pp. 121-137. DOI: 10.1007/s11540-019-09430-3.

20. Early Changes in Nitrate Uptake and Assimilation Under Drought in Relation to Transpiration / V. Gloser [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. DOI: 10.3389/fpls.2020.602065. EDN: ZHEVBI.

21. Impacts of Water Stress Severity and Duration on Potato Photosynthetic Activity and Yields / M.M. Jacques [et al.] // *Frontiers in Agronomy*. 2020. Vol. 2. P. 590312. DOI: 10.3389/fagro.2020.590312. EDN: HHPDDS.

22. Crop Water Deficit and Supplemental Irrigation Requirements for Potato Production in a Temperate Humid Region (Prince Edward Island, Canada) / S. Danielescu [et al.] // *Water*. 2022. Vol. 14. No. 17. P. 2748. DOI: 10.3390/w14172748. EDN: GPJTRO.

References

1. Gouerou M. [et al.] Effect of climate change on potato yield and starch content. *Field Crops Research*. 2025; (330): 109951. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.109951. EDN: ZJAWGV.

2. Gervais T. [et al.] Potato Response to Drought Stress: Physiological and Growth Basis. *Frontiers in Plant Science*. 2021; (12). DOI: 10.3389/fpls.2021.698060. EDN: XZAF0E.

3. Gazdanova I.O., Doguzova N.N., Pukhaev A.R. Analiz ustoichivosti sortov kartofelya Rossiiskoi selektsii k boleznyam v Severo-Kavkazskom regione [Analysis of disease resistance of Russian potato varieties in the North Caucasus region]. *Volga Region Farmland*. 2025; 4(76). DOI: 10.36461/NP.2025.76.4.002. EDN: EONXCK. (In Russ).

4. Bakunov A.L. [et al.] Vliyanie morfologicheskikh parametrov rastenii na produktivnost' kartofelya v usloviyakh zasushlivogo klimata [The influence of plant morphological parameters on potato productivity in arid climates]. *The Bulletin of KrasGAU*. 2025; 8(221): 53-64. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-53-64. EDN: SITPUV. (In Russ).

5. Chairi F., Lateur M., Muhovski Y. Genotypic variation in agronomic and physiological responses

of potato cultivars to water stress under greenhouse conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2025; (16): 1692962. DOI: 10.3389/fpls.2025.1692962. EDN: IOWTJE.

6. Bell L., Radha K., Hill D. The smell of spud-stress: a pilot study testing the viability of volatile organic compounds as markers of drought stress in potato (*Solanum tuberosum*). *Frontiers in Plant Science*. 2025; (16): 1579611. DOI: 10.3389/fpls.2025.1579611. EDN: BMIUSC.

7. Ru Ch. [et al.] Moderate intermittent water deficit enhances dry matter remobilization, nitrogen uptake, and water and nitrogen use efficiency in winter wheat. *Agriculture Communications*. 2025; 3(3): 100098. DOI: 10.1016/j.agrcom.2025.100098. EDN: NFQKPU.

8. Beauclaire Q., Vanden Brande F., Longdoz B. Key role played by mesophyll conductance in limiting carbon assimilation and transpiration of potato under soil water stress. *Frontiers in Plant Science*. 2024; (15). DOI: 10.3389/fpls.2024.1500624. EDN: VRMOLG.

9. Ermokhin Yu.I., Abeuov S.K., Shoikin O.D. Ot-senka doli uchastiya kazhdogo ehlementa pitaniya v sozdanii pribavki urozhaya klubnei kartofelya ot NRK v usloviyakh Pavlodarskoi oblasti [Evaluation of the contribution of each nutrient to the increase in potato tuber yield from NRK in the Pavlodar region]. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021; 1(195): 28-35. EDN: VMOMIK. (In Russ).

10. Naawe E.K. [et al.] Effects of Elevated Temperature on Agronomic, Morphological, Physiological and Biochemical Characteristics of Potato Genotypes: 2. Physiological and Biochemical Traits. *Potato Research*. 2024. DOI: 10.1007/s11540-024-09815-z. EDN: KSWKXY.

11. Nikerova K.M. [et al.] Aktivnye formy kislorda i komponenty antioksidantnoi sistemy - uchastniki metabolizma rastenii. Vzaimosvyaz' s fenol'nym i uglevodnym obmenom [Reactive oxygen species and antioxidant system components are involved in plant metabolism. Relationship with phenolic and carbohydrate metabolism]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2021; (3): 5-20. DOI: 10.17076/eb1312. EDN: DZLLLP. (In Russ).

12. Sahoo M.R. [et al.] Reactive oxygen species scavenging mechanisms associated with polyethylene glycol mediated osmotic stress tolerance in Chinese potato. *Scientific Reports*. 2020; 10(1): 5404. DOI: 10.1038/s41598-020-62317-z. EDN: TIBMOD.

13. Aliyev K. [et al.] Fermenty antioksidantnoi sistemy kletki v usloviyakh zasukhi [Enzymes of the cellular antioxidant system under drought conditions]. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan*. 2016; 59(7-8): 350-355. EDN: XEGASN. (In Russ).

14. Davies M.J. Reactive species formed on proteins exposed to singlet oxygen. *Photochemical*

& *Photobiological Sciences*. 2004; 3(1): 17-25. DOI: 10.1039/b307576c. EDN: FLWBUN.

15. Eremin D.I., Lyubimova A.V., Akhtyamova A.A. Protein nitrogen as an indicator of determining the degree of stress in oats during soil drought. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 23(12): 46-54. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-46-54. EDN: EMRGQX.

16. Bobrenko I.A., Matveychik O.A., Kormin V.P. Agrokhimicheskie normativnye pokazateli mineral'nogo pitaniya kartofelya v lesostepi Zapadnoi Sibiri [Agrochemical standard indicators of mineral nutrition of potatoes in the forest-steppe of Western Siberia]. *Bulletin of Omsk State Agricultural University*. 2021; 1(41): 12-19. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_12. EDN: CBBHRB. (In Russ).

17. Zhevera S.V. Reaktsiya sortov kartofelya na vvedenie v sistemu mineral'nogo pitaniya stabilizirovannogo karbamida UTEC46 [Response of potato varieties to the introduction of stabilized urea UTEC46 into the mineral nutrition system]. *Plodorodie*. 2021; 3(120): 76-80. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.14. EDN: QWFATS. (In Russ).

18. Gao X. [et al.] Yield and Nitrogen Use of Irrigated Processing Potato in Response to Placement, Timing and Source of Nitrogen Fertilizer in Manitoba. *American Journal of Potato Research*. 2018; 95(5): 513-525. DOI: 10.1007/s12230-018-9656-y. EDN: NTOMEB.

19. Naumann M. [et al.] The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part II: Plant Nutrition and Tuber Quality. *Potato Research*. 2020; (63): 121-137. DOI: 10.1007/s11540-019-09430-3.

20. Gloser V. [et al.] Early Changes in Nitrate Uptake and Assimilation Under Drought in Relation to Transpiration. *Frontiers in Plant Science*. 2020; (11). DOI: 10.3389/fpls.2020.602065. EDN: ZHEVBI.

21. Jacques M.M. [et al.] Impacts of Water Stress Severity and Duration on Potato Photosynthetic Activity and Yields. *Frontiers in Agronomy*. 2020; (2): 590312. DOI: 10.3389/fagro.2020.590312. EDN: HHPDDS.

22. Danielescu S. [et al.] Crop Water Deficit and Supplemental Irrigation Requirements for Potato Production in a Temperate Humid Region (Prince Edward Island, Canada). *Water*. 2022; 14(17): 2748. DOI: 10.3390/w14172748. EDN: GPJTRO.

ВКЛАД АВТОРОВ

Еремин Д.И. – научное руководство; концепция и разработка методики исследований; определение белкового азота в растительных образцах; написание исходного текста.

Родина Е.С. – проведение модельного опыта; отбор и анализ растительного материала для получения данных; поиск и анализ научных публикаций по изучаемой теме.

Сахарова В.В. – агрохимический анализ почвогрунта; определение общего и нитратного азота в листьях картофеля; описание полученных результатов.

AUTHOR CONTRIBUTION

Eremin D.I. – scientific guidance; concept and development of research methodology; determination of protein nitrogen in plant samples; writing the source text.

Rodina E.S. – conducting a dummy experiment; selection and analysis of plant material to obtain data; search and analysis of scientific publications on the topic under study.

Sakharova V.V. – agrochemical analysis of the soil; determination of total and nitrate nitrogen in potato leaves; description of the results obtained.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

Д.И. Еремин – доктор биологических наук, доцент; AuthorID 318870.

Е.С. Родина – AuthorID 1087643.

В.В. Сахарова – AuthorID 1143913.

Information about the author

D.I. Eremin – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor; AuthorID 318870.

E.S. Rodina – AuthorID 1087643.

V.V. Sakharova – AuthorID 1143913.

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; одобрена после рецензирования 02.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 29.12.2025; approved after reviewing 02.02.2026; accepted for publication 20.03.2026.