12+

ISSN 2500-0047

НАУЧНО-АГРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AGRONOMY JOURNAL

4 (131) 2025

Волгоград
2025

Научно-агрономический
журнал
Научно-практический журнал

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН)
Главный редактор: **Кулик К. Н.**, д. с.-х. н., профессор, академик РАН
Зам. главного редактора: **Федотова А. В.**, д. б. н., профессор
Журнал с 25.05.2022 г. включен в «Перечень рецензируемых научных изданий ВАК», К-3
по следующим научным специальностям и отраслям науки:
1.5.15. – Экология (сельскохозяйственные науки),
4.1.1. – Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки),
4.1.2. – Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные науки),
4.1.6. – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение,
лесная пирология и таксация (сельскохозяйственные науки)

Ответственный редактор: Крылов П. А.
Верстка: Гирявенко В. Г.
Перевод на английский: Третьякова А. В.
Адрес издателя и редакции: 400062, г. Волгоград, Университетский проспект, 97
E-mail: info@vfanc.ru https://vfanc.ru

Регистрационный номер ПИ № ФС77-76293 от 12 июля 2019 г. присвоен Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
ISSN 2500-0047 DOI: 10.34736/FNC.2025.129.2.000
Печатается в копировально-множительном секторе ФНЦ агроэкологии РАН
Адрес: 400062, г. Волгоград, Университетский проспект, 97
Тираж 500 экз. Заказ 17, подписано в печать 11 декабря 2025 г. Дата выпуска 12 декабря 2025 г.
Журнал выходит 4 раза в год и распространяется по адресной рассылке, а также на выставках и ярмарках агропромышленной тематики. Цена свободная.
Подписной индекс ПР354

Scientific Agronomy Journal

Research and Practice Journal

Founder and publisher: «Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences»
(FSC of Agroecology RAS)
Editor-in-Chief: **Kulik K. N.**, Dr. Sci. (Agr.Sci.), Professor, Academician of RAS
Deputy Editor-in-Chief: **Fedotova A. V.**, Dr. Sci. (Biol.), Professor

Since May 25, 2022, the journal has been included in the "List of Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission (VAK)", K-3, for the following scientific specialties and fields:

1.5.15. – Ecology (agricultural sciences),
4.1.1. – General agriculture and crop production (agricultural sciences),
4.1.2. – Breeding, seed production and plant biotechnology (agricultural sciences),
4.1.6. – Forest science, forestry, forest cultures, agroforestry melioration, greening, forest pyrology and taxation (agricultural sciences)

Responsible Editor: P. A. Krylov
Layout Designer: V. G. Giryavenko
Translation into English: A. V. Tretyakova
Publisher's Address: 400062, Volgograd, Universitetskiy Prospekt, 97
e-mail: info@vfanc.ru https://vfanc.ru

In the registration of registers, the entry PI number FS77-76293 dated July 12, 2019.
Registration number: PI No. FS77-76293, issued on July 12, 2019, by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).
ISSN 2500-0047 DOI: 10.34736/FNC.2025.129.2.000
Published by FSC of Agroecology RAS
Address: 400062, Volgograd, Universitetsky Prospekt, 97
Print run: 500 copies. Order No. 17, signed for print on December 11, 2025. Release date: December 12, 2025.
The journal is published quarterly and is distributed by direct mailing, as well as at agricultural exhibitions and fairs
The price is free. Subscription index ПР354.

Содержание

Content

УДК 581:591.54:630 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.001.05-17

Влияние современных климатических тенденций на фенологию древесных пород: последствия для устойчивого лесовосстановления в Центральном Черноземье*

Серебряков О. В.✉, Яковенко Н. В.
Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена интенсивными климатическими изменениями, наблюдаемыми в Центрально-Черноземном регионе, где трансформация термического режима оказывает комплексное воздействие на структуру и функционирование лесных экосистем. Особую значимость приобретает изучение фенологических сдвигов у доминантных древесных пород как индикаторов климатических трансформаций и основы для разработки адаптивных мер лесовосстановления. Цель работы – оценка влияния современных климатических тенденций на сезонное развитие основных лесообразующих пород и выявление последствий для устойчивого лесовосстановления в Центральном Черноземье. Для достижения цели использован комплексный подход, включающий анализ многолетних (1961-2020 гг.) данных фенологических наблюдений за березой повислой *(Betula pendula* R.*)*, кленом остролистным *(Acer platanoides* L.*),* черемухой обыкновенной *(Prunus padus* Mill.*)* и дубом черешчатым *(Quercus robur* L.*),* а также климатических показателей метеостанции Воронежа. Применялись методы сравнительного анализа климатических норм, статистической обработки фенологических данных с вычислением дисперсии, корреляционного анализа и оценки достоверности различий. Результаты исследования выявили статистически значимое смещение сроков наступления ключевых фенологических фаз у всех изучаемых видов в среднем на 3-5 дней. Установлен феномен фенологического лага, проявляющийся в отставании скоростей смещения фенодат от темпов изменения температурных порогов на 40-60 %. Выявлены видовые различия в реакции на климатические изменения: наиболее выраженные фенологические сдвиги характерны для клена остролистного, тогда как у березы повислой отмечено значительное снижение вариабельности сроков наступления фенофаз. Основные выводы работы подчеркивают необходимость учета выявленных фенологических закономерностей при планировании лесовосстановительных мероприятий. Рекомендовано включение показателей фенологической пластичности древесных пород в критерии отбора для создания климатически устойчивых лесных насаждений. Полученные данные свидетельствуют о необходимости адаптации существующих систем лесовосстановления к меняющимся климатическим условиям региона.

Ключевые слова. Изменение климата; фенологический лаг; лесовосстановление; Центральное Черноземье; сезонное развитие растений.

Цитирование. Серебряков О. В., Яковенко Н. В. Влияние современных климатических тенденций на фенологию древесных пород: последствия для устойчивого лесовосстановления в Центральном Черноземье // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):05-17. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.001.05-17.

Поступила в редакцию: 28.10.2025 Принята к печати: 21.11.2025

*Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Воронежского государственного биосферного заповедника им. В. М. Пескова И. И. Сапельниковой за предоставленные исходные материалы и консультационную поддержку, которые стали ценным вкладом в подготовку данной научной публикации.

✉ – Для контактов/Corresponding author.

UDC 581:591.54:630 DOI: 10.34736/FNC.2025.1301.4.001.05-17

The impact of modern climatic trends on the phenology of tree species: consequences for sustainable reforestation in the Central Black Soil Region*

Serebryakov O. V.✉, Yakovenko N. V.
Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Voronezh, Russia

Abstract. The relevance of the study is determined by intensive climatic changes observed in the Central Black Soil Region, where transformation of the thermal regime exerts a complex impact on structure and functioning of forest ecosystems. Studying phenological shifts in dominant tree species as indicators of climatic changes and as a basis for developing adaptive reforestation measures is of particular importance. The purpose of the study was to assess the impact of modern climatic trends on the seasonal development of main forest-forming species and to identify the consequences for sustainable reforestation in the Central Black Soil Region. To achieve this purpose, an integrated approach was used, including the analysis of long-term (1961-2020) phenological observation data of silver birch *(Betula pendula* R.*),* Norway maple *(Acer platanoides* L.*),* bird cherry *(Prunus padus* Mill.) and pedunculate oak *(Quercus robur* L.*),* as well as meteorological parameters from the Voronezh weather station. Methods of comparative analysis of climatic norms, statistical processing of phenological data with the calculation of variance, correlation analysis, and assessment of the significance of differences were used. The research results revealed a statistically significant shift in the timing of key phenological phases among all studied species by an average 3-5 days. The phenomenon of phenological lag has been revealed manifested in slower rates of the shift of phenological dates compared to the rate of change in temperature thresholds by 40-60 %. Species-specific differences in response to climate changes have been identified: most pronounced phenological shifts are characteristic for Norway maple while silver birch showed considerable reduction in the variability of the phenophase onset dates. The main conclusions of the study emphasize the need to take into account the identified phenological patterns when planning reforestation activities. It is recommended to incorporate indicators of phenological plasticity of tree species into the selection criteria for creating climatically resilient forest plantations. The obtained data indicate the need to adapt existing reforestation systems to the changing climatic conditions of the region.

Keywords. Climate change; phenological lag; reforestation; Central Black Soil Region; seasonal plant development.

For citation. Serebryakov O. V., Yakovenko N. V. The impact of modern climatic trends on the phenology of tree species: consequences for sustainable reforestation in the Central Black Soil Region // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):05-17. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.001.05-17.

Received: 28.10.2025 Accepted: 21.11.2025

Введение. Актуальность проблемы**.** Современные изменения климата носят глобальный характер и представляют собой значительную трансформацию температурного режима и погодных условий, основной движущей силой которых является антропогенная деятельность (Jiao, 2023; Мамаражабова, Шингисов, 2024; Jin et al.,2025). Эти изменения оказывают возрастающее влияние на структуру и функционирование природных систем по всему миру. Особую актуальность приобретают исследования, направленные на изучение реакции биоты на региональном уровне, поскольку именно в региональных трендах наиболее отчетливо проявляются конкретные последствия глобального потепления (Карбасникова и др., 2020; Семенютина и др., 2020; Полякова и др., 2023; Минин и др., 2018; Минин и др., 2024).

*The authors express their gratitude to I. I. Sapelnikova, the senior researcher of the V. M. Peskov Voronezh State Biosphere Reserve, for the providing the initial materials and for the consultative support, which became a valuable contribution to the preparation of this scientific publication.

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Воронежская обл., расположенная в лесостепной зоне, характеризуется высокой чувствительностью природных комплексов к изменениям термического режима и гидрологического баланса (Акимов, 2013; Дмитриева, Сушков, 2023). Фенологические наблюдения, будучи индикатором непосредственного отклика биологических систем на колебания факторов среды, предоставляют уникальную возможность для оценки скорости и направленности этих процессов. Сезонное развитие основных лесообразующих пород, таких как дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), береза повислая (*Betula pendula* R.) и клен остролистный (*Acer platanoides* L.), тесно связано с динамикой температур, что делает их надежными биоиндикаторами трансформирующегося климата (Жмылева, 2011).

Степень изученности проблемы. Несмотря на то, что общие тенденции изменения климата хорошо документированы, реакция фенологических ритмов древесных растений в условиях лесостепной зоны, в частности, феномен рассогласования скоростей климатических и фенологических сдвигов («фенологический лаг»), изучена недостаточно. Можно предположить, что наблюдаемое опережающее потепление в конце зимы и начале весны не компенсируется синхронной перестройкой жизненных циклов древесных растений, что приводит к формированию выраженного фенологического дисбаланса.

Целью исследования является оценка влияния изменений климатических характеристик за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. на сезонное развитие основных лесообразующих пород Воронежской области.

Материалы и методы. *Методы сбора и первичного анализа данных.* Исследование выполнено на основе многолетних данных о фенологии древесных пород, предоставленных «Летописью природы» Воронежского государственного природного биосферного заповедника имени В.М. Пескова. В качестве экспериментального материала использованы данные фенонаблюдений за период с 1961 по 1990 гг. (базовый климатический период) и с 1991 по 2020 гг. (современный период). Для анализа были отобраны данные по: береза повислая *(B. pendula)*, черемуха обыкновенная *(Prunus padus* Mill.*)*, клен остролистный *(A. platanoides)* и дуб черешчатый (ранняя форма) *(Q. robur)*. Для точной фиксации фенологических фаз отбирались модельные деревья (не менее 80 здоровых особей одного возраста, 40-50 лет для каждого исследуемого вида) и фиксировались даты наступления ключевых фенологических фаз: распускания почек, начала цветения, окончания листопада. Для верификации точности фенологических наблюдений был использован метод контрольной выборки на примере популяции березы пушистой *(Betula pubescens* L.*)*, произрастающей в условиях Правобережного лесничества. Мониторинг осуществлялся в отношении постоянной выборки, состоящей из 80 модельных деревьев генеративного возраста, составляющего 50 лет.

Климатические данные, необходимые для анализа погодных условий в периоды фенологических наблюдений, были предоставлены метеорологической станцией Росгидромета № 34123, расположенной в городе Воронеже. В качестве исходной информации использовались архивы ежедневных температурных показателей, на основе которых производился расчет среднесуточных и среднемесячных значений температуры воздуха. Эти параметры позволили осуществить детальную привязку фенологических событий к конкретным погодным условиям и выявить общие климатические тенденции, характерные для сезонов проведения исследований. Полнота и репрезентативность метеорологических данных обеспечены соответствием периодов наблюдений на метеостанции срокам проведения полевых фенологических работ.

Статистическая обработка данных.

В качестве исходных данных для сравнения последовательных 30-летних климатических нормативов использованы декадно-усредненные значения среднемесячных температур воздуха (°С) за два базовых периода: эталонный (1961-1990) и современный (1991-2020).

Величина отклонения (ΔТ) рассчитывалась по формуле:

$$\Delta T = \overline{T}(1991 - 2020) - \overline{T}\,(1961 - 1990),$$

где, $\bar{T}$ – среднемноголетняя температура для соответствующего месяца и периода.

Статистическая обработка данных проводилась с целью выявления значимых сдвигов фенологических дат между двумя климатическими периодами и установления связи между температурными показателями и сроками наступления фенологических фаз. Для характеристики распределения фенологических дат вычислялись показатели центральной тенденции и вариабельности. Оценка достоверности полученных средних значений проводилась посредством расчета стандартной ошибки и построения доверительных интервалов. Исследование связей между сроками

наступления фенологических фаз и температурными показателями различных сезонов выполнялось с применением корреляционного анализа. Для квантификации силы и направления линейных зависимостей использовался коэффициент корреляции Пирсона. Сравнительный анализ изменений фенологических параметров между климатическими периодами включал оценку статистической значимости выявленных различий с использованием критерия Стьюдента. Уровень статистической значимости во всех тестах был принят равным p = 0,05.

Результаты. Как показали многочисленные исследования, реакция биоты на климатические изменения нелинейна и варьирует в зависимости от вида (Burkett et al., 2003; Vandvik, 2020; Hernández-Carrasco et al., 2025). Выявленное для Воронежской области опережающее потепление в конце зимы и начале весны создает критически важные условия для запуска вегетации. Далее изложены результаты, которые не только документируют величину и направленность фенологических сдвигов у основных лесообразующих пород, но и позволяют оценить потенциальные последствия этих изменений для устойчивости и восстановления лесных экосистем Центрального Черноземья.

Анализ многолетних фенологических наблюдений в Центрально-Черноземном регионе и сопредельных территориях выявил гетерогенный и неоднозначный характер влияния климатических тенденций на сезонное развитие древесных пород. Ключевым результатом исследования является идентификация системного фенологического лага, или «климатического разрыва», проявляющегося в статистически значимом отставании скоростей смещения фенологических дат от темпов смещения соответствующих температурных показателей. Установлено, что наблюдаемое опережающее весеннее потепление не компенсируется синхронной перестройкой жизненных циклов древесных растений, что приводит к формированию выраженного фенологического дисбаланса (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика основных лесообразующих пород Воронежской области как биоиндикаторов

Вид	Ключевые фенологические фазы и чувствительность к климату	Примечания
Acer platanoides L.	Начало вегетации при +12 °C, раннее сокодвижение. Широкоэкологическая пластичность, устойчив к засухе и загрязнению воздуха	Чувствителен к поздним заморозкам после начала вегетации. Инвазивен в некоторых регионах
Quercus robur L.	Цветение в мае-июне, уязвимость цветков к заморозкам. Нерегулярное плодоношение зависит от погодных условий	Долгожитель, медленно реагирует на изменения. Основная лесообразующая порода лесостепи
Betula pendula R.	Раннее распускание почек, индикатор наступления весны	Выполняет роль пионерной породы
Prunus padus Mill.	Обильное цветение в весенний период	Чувствительна к весенним температурам

Например, переход среднесуточной температуры через +10 °C, который знаменует начало устойчивого потепления, смещается к более ранним датам со скоростью до 3,6 дней за десятилетие. Однако реакция *B. pendula*, у которой в это время начинают развертываться листья, оказывается гораздо более медленной – ее фенофаза сдвигается всего на 1,2 дня или даже остается почти неизменной. Эта тенденция усиливается по мере прогресса сезона. Цветение *P. padus*, приуроченное к переходу через +12 °C, ускоряется на 1,0–1,8 дня за десять лет, в то время как сам температурный рубеж смещается на 2,0-2,8 дня. Наиболее ярко разрыв проявляется в начале предлетья, которое традиционно связывают с цветением *Sorbus aucuparia* L. при переходе через +14 °C. Здесь наблюдается почти пятикратное отставание: фенофаза смещается всего на день, тогда как климатический порог наступает раньше на 4,5 дня за десятилетие.

Особый интерес представляет обнаруженная географическая аномалия в полосе между 52-й и 54-й параллелями северной широты. В этой зоне общая тенденция к опережению фенологических событий ослабевает или даже меняется на противоположную, когда некоторые фазы, вопреки общему тренду, начинают наступать позже. Это убедительно доказывает, что фенологический отклик древесных пород определяется не только температурой, а целым комплексом факторов. Среди них могут быть усиление континентальности климата, особенности циркуляции атмосферы, а также взаимодействие с другими лимитирующими факторами, та-

кими как влажность почвы и воздуха в критический период вегетации (Жмылева и др., 2011; Санданов, Батоцыренов, 2020; Фомин, Фомина, 2024).

Выявленный «климатический разрыв» имеет далеко идущие последствия для устойчивости лесных экосистем. Рассогласование сроков между климатическими сезонами и биологическими циклами деревьев создает серьезные риски. Растения могут стать более уязвимыми к поздневесенним заморозкам, так как их фенофазы, хоть и с отставанием, все же сдвигаются на более ранний, рискованный период. Кроме того, нарушается синхронность в экосистеме, например, между появлением листвы и цветов и активностью насекомых-опылителей, что негативно сказывается на репродуктивном успехе и семенном возобновлении пород. Таким образом, многолетние данные указывают не просто на смещение сезонов, а на возникновение глубокого дисбаланса, который ставит под вопрос способность существующих древесных экосистем к эффективной адаптации и требует учета этих факторов при планировании лесовосстановительных мероприятий.

В климатологии для характеристики текущего состояния климатической системы и выявления трендов ее изменения принято использовать 30-летние периоды, регламентированные Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в качестве климатических норм. Сравнение таких последовательных периодов позволяет количественно оценить скорость и направленность климатических изменений, минимизируя влияние краткосрочных циклических колебаний

Климатические условия Воронежской обл. претерпели значительные изменения при сравнении двух базовых климатических периодов – 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. (рис. 1). Сравнительный анализ двух последовательных 30-летних климатических норм (1961-1990 гг. и 1991-2020 гг.) выявляет статистически значимый повсемесячный рост температуры воздуха, свидетельствующий об устойчивой тенденции к потеплению климата на рассматриваемой территории. Ключевой выявленной закономерностью является сезонная асимметрия данного процесса, характеризующаяся максимальными аномалиями в зимние месяцы и менее выраженным, но существенным потеплением в летний период.

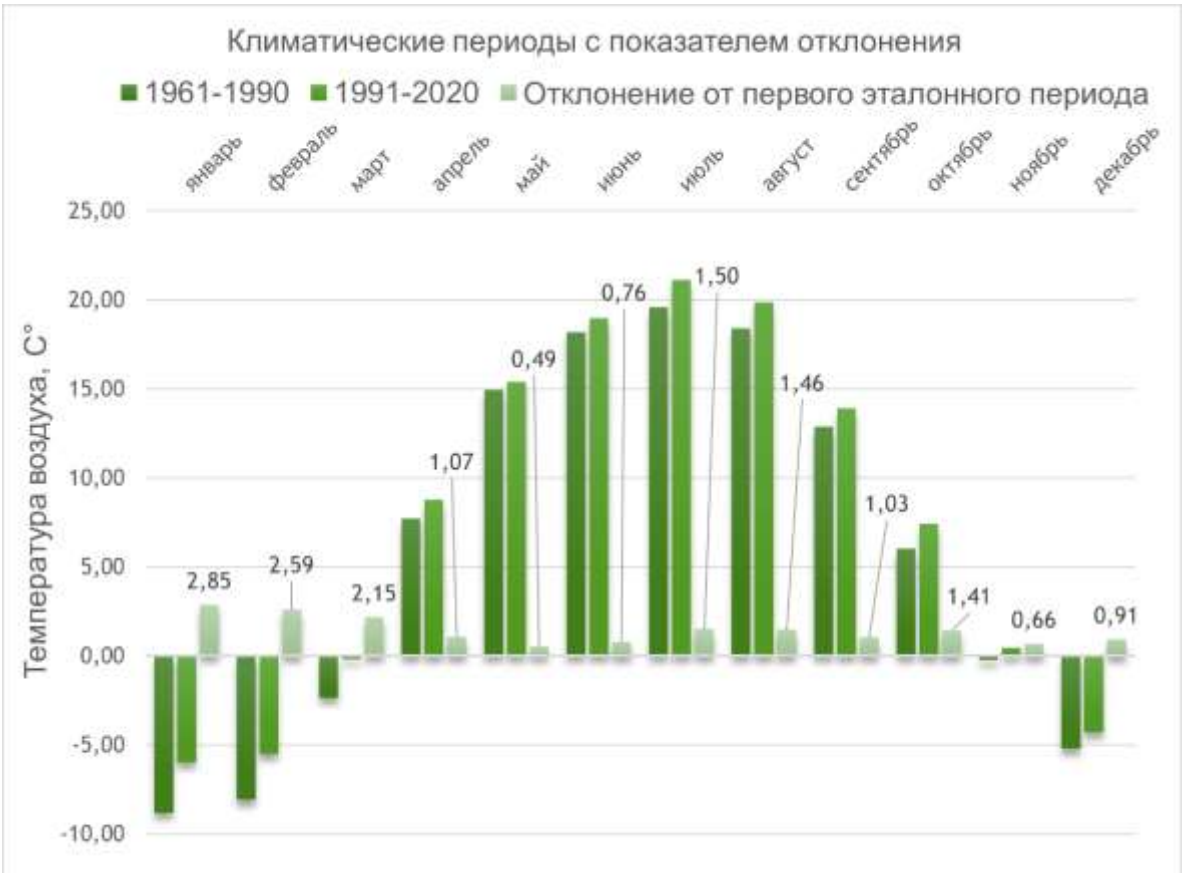


Рис. 1. Тенденции изменений среднемесячных температур за два базовых климатических периода, по данным метеостанции 34123, Воронеж

Сопоставление среднемесячных температурных значений за указанные периоды демонстрирует универсальный положительный знак аномалий для всех месяцев года, что однозначно указывает на системный сдвиг термического режима. Рассчитанное среднегодовое отклонение составляет приблизительно +1,47 °С, что существенно превышает среднемировые показатели потепления за аналогичный интервал и подчеркивает региональную специфику, характерную для континентальных районов умеренных широт. Доминирующей выявленной закономерностью является резко выраженная сезонная асимметрия потепления. Наиболее интенсивный рост температур наблюдается в холодный сезон, с максимумом аномалии в январе (+2,85 °С). Данный феномен удовлетворительно объясняется в рамках теории усиленного потепления полярных и приполярных регионов (Арктическая амплификация) (Zhou et al., 2024; Stuecker et al., 2008*).* Сокращение продолжительности залегания снежного покрова и площади морских льдов приводит к значительному снижению альбедо поверхности в осенне-зимний период. В результате увеличивается поглощение солнечной радиации и перераспределение тепла в системе «поверхность – атмосфера», что проявляется в более резком повышении температур именно в холодное время года *(*Merlis et al., 2018).

Весенне-осенние переходные сезоны также характеризуются значительными положительными аномалиями, в особенности март (+2,15 °С) и октябрь (+1,41 °С). Это указывает на смещение фенологических фаз в сторону более раннего наступления весны и более позднего прихода осени, что влечет за собой удлинение вегетационного периода. Летний период, несмотря на меньшую величину аномалий по сравнению с зимним (пиковые значения в июле +1,50 °С и августе +1,46 °С), демонстрирует статистически значимый тренд. Умеренное, но устойчивое повышение летних температур повышает вероятность возникновения и интенсивность экстремальных погодных явлений, таких как волны жары и засухи, что имеет серьезные последствия для агропромышленного комплекса, гидрологического режима и здоровья населения.

Проведенный анализ демонстрирует, что современные климатические изменения приводят к качественной трансформации сезонных ритмов, что находит непосредственное отражение в перестройке фенологических фаз растительных организмов. Наблюдаемое радикальное смягчение зимних условий влечет за собой нарушение естественного периода покоя у многолетних культур и древесных пород, снижая эффективность их перезимовки и повышая уязвимость к возвратным холодам. Смещение границ весенне-осенних сезонов проявляется в устойчивой тенденции к более раннему наступлению весенних фенофаз и позднему завершению осенних процессов, что, несмотря на объективное удлинение вегетационного периода, повышает риски повреждения генеративных органов возвратными заморозками и способствует пролонгации активности фитопатогенов и вредителей. Одновременно усиление контрастности летних условий, характеризующееся учащением экстремальных тепловых явлений и засушливых периодов, индуцирует развитие водного и термического стресса у растений, негативно сказываясь на их продуктивности и жизнеспособности. Совокупное воздействие данных факторов обусловливает глубокую перестройку функционирования фитоценозов, создавая принципиально новые вызовы для управления лесными экосистемами.

Представленные ниже данные отражают результаты компаративного анализа фенологических параметров модельных видов дендрофлоры в сопоставлении двух климатических нормативов, что позволяет выявить системные изменения в сезонных ритмах растений (табл. 2).

Анализ данных показывает значительные изменения в сезонном развитии *B. pendula.* Начало цветения сместилось на 3 дня в более ранние сроки – с 29 апреля в базовом периоде до 25 апреля в современном. Появление листьев демонстрирует аналогичную тенденцию, сдвигаясь с 25 на 23 апреля. Особенно показательным является изменение вариабельности фенодат: дисперсия даты появления листьев уменьшилась с 66 до 26 единиц, что свидетельствует о существенном повышении стабильности наступления этой фазы. Корреляционный анализ выявляет трансформацию детерминационных связей. В современный период отмечается ослабление отрицательной корреляции с температурами марта (с –0,44 до –0,33) и холодного периода, одновременно формируется устойчивая отрицательная связь с температурой теплого периода (r = –0,41), что указывает на возрастание роли термических условий предшествующего вегетационного сезона.

A. platanoides демонстрирует более выраженные фенологические сдвиги по сравнению с *B. pendula*. Начало цветения сместилось на 4 дня (с 30 на 26 апреля), а появление листьев – на

Таблица 2

Анализ фенологических изменений у *B. pendula* и *A. platanoides* в условиях климатических изменений

Порода	Фенологические фаза и явление	Климатический период	Дата		S^2	σ^2	σ	m	Доверительный интервал (95 %)	Корреляция Пирсона в сопряжении с температурными показателями:		
			календарная	в днях от 1 марта (Зайцев, 1981)						холодного периода	теплого периода	марта
Betula pendula R.	Начало цветения	1961-1990	29.04	60	59	57	8	1,42	2,91	-0,3866	0,2174	-0,4357
	Окончание цветения		06.05	67	60	58	8	1,44	2,91	-0,3581	0,2278	-0,3983
	Появление листьев		25.04	56	66	64	8	1,48	2,91	-0,4585	0,1768	-0,5051
	Начало цветения	1991-2020	25.04	56	29	28	5,4	1,00	1,97	-0,1272	-0,4130	-0,3355
	Окончание цветения		01.05	62	27	26	5,2	1,19	1,89	-0,0285	-0,4831	-0,1695
	Появление листьев		23.04	54	26	26	5,1	0,96	1,87	-0,13099	-0,2514	-0,4328
Acer platanoides L.	Начало цветения	1961-1990	30.04	61	49	47	7,0	1,30	2,54	-0,5283	0,2767	-0,5413
	Окончание цветения		09.05	70	52	51	7,2	1,37	2,64	-0,5028	0,3263	-0,4598
	Появление листьев		03.05	64	50	48	7,1	1,33	2,57	-0,5027	0,0861	-0,4895
	Начало цветения	1991-2020	26.04	57	42	41	6,5	1,23	2,37	-0,0108	-0,4491	-0,6112
	Окончание цветения		06.05	67	25	24	5,0	1,00	1,82	0,0767	-0,3389	-0,3368
	Появление листьев		28.04	59	29	28	5,4	1,01	1,97	0,1229	-0,2637	-0,5262
Betula pendula R.	Начало цветения	$\Delta T = \bar{T}(1991\text{-}2020) - \bar{T}(1961\text{-}1990)$		-3	-30	-16	-3	0	-1			
	Окончание цветения			0	-33	-34	-3	0	-1			
	Появление листьев			3	-40	-36	-3	0	-1			
Acer platanoides L.	Начало цветения			-4	-6	-6	0	0	0			
	Окончание цветения			-2	-27	-27	-2	0	-1			
	Появление листьев			-5	-20	-20	-2	0	-1			

Примечание. Синий цвет отражает значительную зависимость наступления фазы или явления от показателя корреляции. Оранжевым выделена наиболее сильная зависимость корреляции исследуемых рядов. S^2 – Выборочная дисперсия, σ^2 – дисперсия, σ – квадратичное отклонение, m – ошибка средней арифметической.

5 дней (с 3 мая на 28 апреля). Значительное снижение дисперсии наблюдается для фазы окончания цветения – с 52 до 25 единиц, что отражает повышение синхронности наступления этой фенофазы.

Структура корреляционных связей претерпела существенные изменения. Особенно заметно усилилась отрицательная корреляция с температурой марта для начала цветения (с –0,54 до –0,61), в то время как связь с температурой теплого периода приобрела выраженный отрицательный характер (r = –0,45). Это свидетельствует о повышенной чувствительности клена к весенним температурам при одновременном возрастании влияния термических условий предыдущего вегетационного сезона.

Проведенный анализ выявляет видовую специфику фенологического отклика. *A. platanoides* демонстрирует более значительные сдвиги сроков вегетации, в то время как береза характеризуется более выраженным снижением вариабельности фенодат. Различия наблюдаются и в структуре корреляционных связей: у *A. platanoides* сохраняется сильная зависимость от температур марта, тогда как у *B. pendula* отмечается перераспределение значимости температурных факторов с возрастанием роли условий теплого периода.

Совокупность выявленных статистически значимых изменений фенологических параметров требует систематизации и наглядного представления для целей мониторинга и прогнозирования. Такой подход особенно важен для оценки реакции именно лесообразующих пород, определяющих структуру и функционирование лесных экосистем региона. В этой связи для наглядного отображения влияния климатических изменений на фенологическое явление лесообразующих пород Воронежской области был построен фенологический календарь появления листьев, интегрирующий многолетние данные по основным древесным доминантам (табл. 3).

На основании проведенного анализа данных фенологических наблюдений за древесными растениями в периоды климатических норм 1961-1990 и 1991-2020 гг. выявлена устойчивая тенденция к акселерации сезонного развития растений.

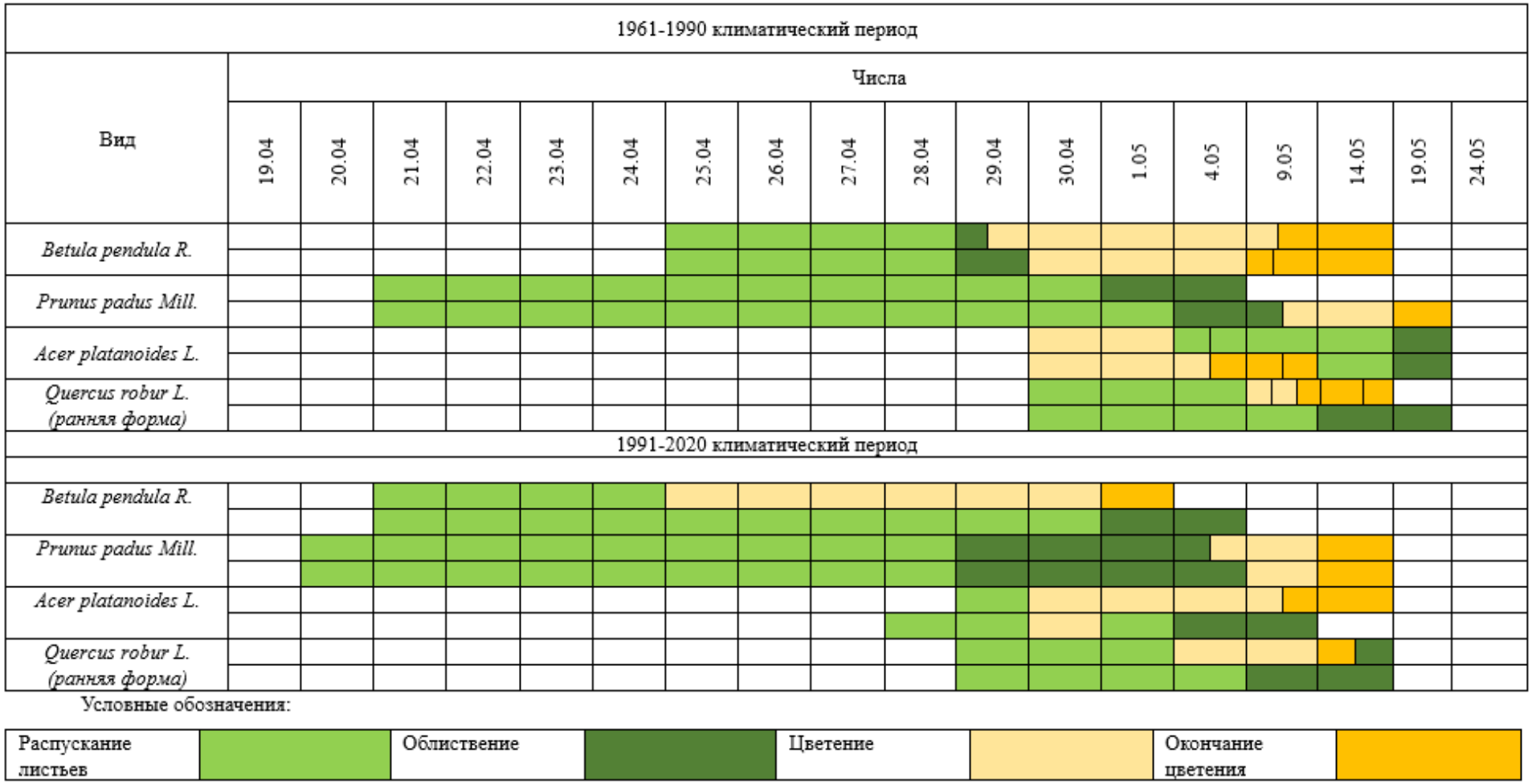
Сравнительный анализ среднемноголетних дат наступления фенофаз демонстрирует статистически значимый сдвиг в сторону более ранних сроков у всех исследуемых видов: *B. pendula*, *P. avium*, *A. platanoides* и *Q. robur* (ранняя форма). Величина выявленного фенологического сдвига составляет от 5 до 10 суток, что находится в прямой корреляционной зависимости от повышения температурного режима в весенние месяцы. Установленная закономерность соответствует глобальному тренду фенологического ответа биоты на климатические изменения. Особый научный интерес представляет поведение ранней формы дуба черешчатого, проявляющей повышенную чувствительность к температурным изменениям, что свидетельствует о внутривидовой дифференциации фенологического отклика. Сохранение традиционной последовательности прохождения фенофаз при сокращении временных интервалов между ними указывает на трансформацию внутренней структуры вегетационного периода. Полученные результаты имеют существенное значение для прогнозирования состояния лесных экосистем, поскольку фенологические сдвиги способны вызывать дисбаланс в трофических сетях. Наблюдаемое опережение сроков вегетации коррелирует с увеличением суммы эффективных температур и подтверждает гипотезу об усилении влияния климатического фактора на сезонное развитие древесных растений в современных условиях. Выявленные закономерности подчеркивают необходимость продолжения мониторинговых исследований для разработки моделей адаптации лесных сообществ к изменяющимся климатическим условиям.

Таким образом, результаты подтверждают нелинейный и видоспецифичный характер фенологического отклика на климатические изменения. Выявленные закономерности имеют важное значение для прогнозирования реакции лесных экосистем на глобальное потепление и разработки адаптационных стратегий в лесном хозяйстве. Перспективным направлением является изучение физиологических механизмов видовых различий в фенологической реакции.

Обсуждение. Проведенное исследование демонстрирует, что фенологический отклик основных лесообразующих пород Воронежской области на современное потепление климата является сложным и нелинейным процессом. Выявленный фенологический лаг – системное отставание скоростей смещения фенодат от темпов смещения климатических порогов – согласуется с общепринятыми в современной науке представлениями о взаимодействии температурных факторов в регулировании сезонного развития растений (Кищенко, 2020; Кузьмин, 2021; Лавренов и др., 2025).

Таблица 3

Фенологический календарь появления листьев и цветения лесообразующих пород Воронежской области



Ключевым механизмом, объясняющим наблюдаемое запаздывание фенофаз, является антагонистическое воздействие зимнего и весеннего потепления. С одной стороны, повышение весенних температур (форсирующие температуры) способствует более раннему накоплению суммы эффективных температур и, как следствие, должно вести к заметному сдвигу дат начала вегетации. С другой стороны, как показали исследования на европейских видах, снижение количества зимнего охлаждения (яровизации), вызванное аномально теплыми зимами, компенсирует около половины потенциального сдвига весенней фенологии, обусловленного потеплением в весенний период (Rinne et al., 2018; Asse et al., 2018). Этот эффект отчетливо прослеживается в полученных данных: несмотря на значительное смещение температурного порога +10°C к более ранним датам, реакция березы выражается в гораздо более скромном сдвиге даты появления листьев.

Анализ данных выявил выраженные межвидовые различия в реакции на изменение климатических норм. *A. platanoides* продемонстрировал более значительные сдвиги в сроках наступления фенофаз по сравнению с березой повислой. Это может быть связано с различной чувствительностью к накоплению зимнего холода и разной потребностью в форсирующих температурах для выхода из состояния покоя. У *B. pendula* наиболее заметным изменением стало значительное снижение вариабельности дат наступления фенофаз, что указывает на возрастающую стабильность и синхронность ее сезонного развития в новых климатических условиях.

Эти различия подтверждают тезис о том, что фенологический ответ является видоспецифичным, а не общим для всех видов в экосистеме. Выявленный фенологический дисбаланс имеет серьезные последствия для функционирования и устойчивости лесных экосистем лесостепной зоны. Сдвиг фенофаз, даже неполный, повышает вероятность попадания нежных молодых листьев и цветков под действие возвратных заморозков, что может наносить значительный ущерб жизнеспособности деревьев и их репродуктивному успеху

Рассогласование сроков цветения растений и активности насекомых-опылителей, а также появления листвы и начала активности фитофагов, может дестабилизировать существующие пищевые сети. Виды, способные более гибко адаптировать свои фенологические ритмы к новым условиям (например, *A. platanoides*), могут получить конкурентное преимущество перед видами с более консервативной стратегией (*B. pendula*), что в долгосрочной перспективе может привести к изменению видового состава и структуры древостоев

Таким образом, современные климатические изменения приводят не к простому сдвигу «календаря природы», а к глубокой перестройке фенологических ритмов, характеризующейся видовой специфичностью, пространственной неоднородностью и наличием компенсаторных механизмов. Это ставит под вопрос способность аутохтонных лесных экосистем к быстрой и эффективной адаптации и требует учета выявленных закономерностей при разработке стратегий адаптивного лесоуправления.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует наличие статистически значимых изменений в сезонном развитии основных лесообразующих пород Воронежской области, являющихся непосредственным откликом на современные климатические тренды. Установлено, что качественная трансформация термического режима, характеризующаяся резко выраженной сезонной асимметрией потепления с максимумом в зимние месяцы и смещением границ весенне-осенних сезонов, обусловила системную перестройку фенологических ритмов древесных растений. Ключевым результатом работы является идентификация феномена фенологического лага – статистически значимого отставания скоростей смещения фенодат от темпов смещения соответствующих температурных порогов. Это рассогласование создает комплекс рисков для устойчивости лесных экосистем, проявляющихся в повышенной уязвимости вегетативных и генеративных органов к возвратным весенним заморозкам и нарушении синхронности с жизненными циклами опылителей.

Видовоспецифичный характер выявленных фенологических сдвигов, выражающийся в различной степени опережения фаз и трансформации детерминационных связей с температурными факторами у *B. pendula* и *A. platanoides*, подчеркивает нелинейность реакции дендрофлоры на климатические изменения. Обнаруженная географическая аномалия в полосе 52-54° с.ш., где общерегиональная тенденция к опережению фенофаз ослабевает, свидетельствует о комплексной природе фенологического отклика, определяемого не только температурой, но и другими лимитирующими факторами.

Полученные данные свидетельствуют о глубокой перестройке функционирования лесных экосистем лесостепной зоны, что ставит под вопрос способность аутохтонных древостоев к эффективной адаптации в условиях быстро меняющегося климата. Выявленные закономерности необходимо учитывать при разработке стратегий адаптивного лесоуправления и планировании лесовосстановительных мероприятий в регионе.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Акимов Л. М. Пространственно-временные закономерности распределения климатических характеристик на территории Воронежской области. Вестник Воронежского государственного университета. *Серия: География. Геоэкология.* 2013;(1):192-198. [Akimov L. M. Spatial and temporal patterns of climate characteristics distribution in the Voronezh region. Vestnik *Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2013;(1):192-198].

Дмитриева В. А., Сушков А. И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2023;(2):56-63. doi https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63 [Dmitrieva V. A., Sushkov A. I. Temperature regime of the Voronezh region in changing climate. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2023;(2):56-63. doi: https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63].

Жмылева А. П., Карпухина Е. А., Жмылев П. Ю. Фенологическая реакция лесных растений на потепление климата: рано- и поздноцветущие виды. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности.* 2011;(2):5-15. [Zhmyleva A. P., Karpukhina E. A., Zhmylev P. Yu. Phenological response of forest plants to climate warming: early- and late-flowering species. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti = RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2011;(2):5-15].

Карбасникова Е. Б., Бабич Н. А., Карбасников А. А. Особенности сезонного развития лиственницы (Larix Mill.) в условиях южной подзоны тайги. *Лесной вестник. Forestry Bulletin.* 2020;24(3):53-59. doi: 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59. [Karbasnikova E. B., Babich N. A., Karbasnikov A. A. Features of seasonal development of larch (Larix Mill.) in the southern taiga subzone. *Lesnoi vestnik. Forestry Bulletin = Forestry Bulletin.* 2020;24(3):53-59. doi: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-53-59].

Кищенко И. Т. Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесообразующих видов в таежной зоне (Карелия). *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2020;(3):72-82. doi: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-72-82. [Kishchenko I. T. Influence of climatic factors on seasonal development of coniferous forest-forming species in the taiga zone (Karelia). *Izvestiya vyssikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal = Proceedings of Higher Educational Institutions. Lesnoi Zhurnal.* 2020;(3):72-82. doi: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-72-82].

Кузьмин С. Р., Рубцов А. В., Барченков А. П., Карпюк Т. В. Дифференциация климатипов лиственниц (Larix spp.) в географических культурах в лесостепи Средней Сибири. *Вестник Томского государственного университета. Биология.* 2021;(56):170-188. doi: https://doi.org/10.17223/19988591/56/8. [Kuzmin S. R., Rubtsov A. V., Barchenkov A. P., Karpyuk T. V. Differentiation of larch climatypes (Larix spp.) in geographical cultures in the forest-steppe of Middle Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology.* 2021;(56):170-188. doi: https://doi.org/10.17223/19988591/56/8].

Мамаражабова Б. А., Шингисов А. У. Анализ воздействия антропогенной деятельности на изменение климата и разработка мер по смягчению негативных последствий для безопасности людей и экосистем. *Universum: технические науки.* 2024;121(4-1):23-25. [Mamarazhabova B. A., Shingisov A. U. Analysis of the impact of anthropogenic activities on climate change and development of measures to mitigate negative consequences for human safety and ecosystems. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences.* 2024;121(4-1):23-25].

Полякова Н. В., Шигапов З. Х. Динамика фенологических показателей некоторых видов сирени в условиях изменения климата. *Сибирский экологический журнал*. 2023;30(2):186-195. doi: https://doi.org/10.15372/SEJ20230208. [Polyakova N. V., Shigapov Z. Kh. Dynamics of phenologi-

cal indicators of some lilac species under climate change. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal.* 2023;30(2):186-195. doi: https://doi.org/10.15372/SEJ20230208].

Санданов Д. В., Батоцыренов Э. А. Фенологический отклик раннецветущих растений Бурятии на изменения климата. *Растительный мир Азиатской России.* 2020;40(4):68-78. doi: https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2020-4(68-78). [Sandanov D. V., Batotsyrenov E. A. Phenological response of early flowering plants of Buryatia to climate change. *Rastitelnyi mir Aziatskoi Rossii = Plant World of Asian Russia.* 2020;40(4):68-78. DOI: https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2020-4(68-78)].

Семенютина А. В., Сапронова Д. В., Хужахметова А. Ш. Адаптация сезонных ритмов развития на примере дендроколлекций ФНЦ агроэкологии РАН. *Наука. Мысль: электронный периодический журнал.* 2020;10(2):75-87. DOI: https://doi.org/10.25726/worldjournals.pro/WEJ.2020.2.4. [Semenyutina A. V., Sapronova D. V., Khuzhakhmetova A. Sh. Adaptation of seasonal development rhythms on the example of dendrocollections of FRC for Agroecology of RAS. *Nauka. Mysl: elektronnyi periodicheskii zhurnal = Science. Thought: Electronic Periodical Journal.* 2020;10(2):75-87. DOI: https://doi.org/10.25726/worldjournals.pro/WEJ.2020.2.4].

Лавренов М. А., Котов А. А., Брынцев В. А., Рысин С.Л., Коженкова А.А. Фенологические исследования различных видов лиственниц, произрастающих на территории ГБС РАН. *Лесотехнический журнал.* 2025;15(2):64-87. doi: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/5. [Lavrenov M. A., Kotov A. A., Bryntsev V. A., Rysin S.L., Kozhenkova A.A. Phenological studies of various larch species growing on the territory of the GBS RAS. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal.* 2025;15(2):64-87. doi: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/5].

Минин А. А., Буйволов Ю. А., Самохина О. Ф., Бардин М. Ю., Демидов В. Э, Лебедев П. А., Поликарпова Н. В., Прокошева И. В., Рыжков О. В., Сапельникова И. И., Фомин Б. Н., Шуйская Е. А., Яковлева М. В., Янцер О. В. Фенологические тренды в природе России: насколько они следуют за изменениями климата? *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2024;10(3):378-398. doi: https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-3-378-398. [Minin A. A., Buivolov Yu. A., Samokhina O. F., Bardin M. Yu., Demidov V. E., Lebedev P.A., Polikarpova N. V., Prokosheva I. V., Ryzhkov O. V., Sapelnikova I. I., Fomin B. N., Shuiskaya E. A., Yakovleva M. V., Yanzer O. V. Phenological trends in nature of Russia: to what extent do they follow climate changes? *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology.* 2024;10(3):378-398. doi: https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-3-378-398].

Минин А. А., Ранькова Э. Я., Буйволов Ю. А. и др. Фенологические тренды в природе Центральной части русской равнины в условиях современного потепления. *Жизнь Земли.* 2018;40(2):162-174. [Minin A. A., Rankova E. Ya., Buivolov Yu. A. et al. Phenological trends in the nature of the Central part of the Russian Plain under current warming. *Zhizn Zemli = Life of the Earth*. 2018;40(2):162-174].

Фомин Э. С., Фомина Т. И. Фенологический отклик растений различных биоморф на изменение климата в Западной Сибири. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая.* 2024;(3):318-328. doi: https://doi.org/10.31857/S1026347024030031. [Fomin E. S., Fomina T. I. Phenological response of plants of different biomorphs to climate change in Western Siberia. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya biologicheskaya = Biology Bulletin.* 2024;(3):318-328. doi: https://doi.org/10.31857/S1026347024030031].

Vandvik V., Skarpaas O., Klanderud K., Telford R. J., Halbritter A. H., Goldberg D. E. Biotic rescaling reveals importance of species interactions for variation in biodiversity responses to climate change. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020;117(37):22858-22865. doi: https://doi.org/10.1073/pnas.2003377117.

Hernández-Carrasco D., Tylianakis J. M., Lytle D. A. Tonkin J. D. Ecological and evolutionary consequences of changing seasonality. *Science.* 2025;388:eads4880. doi: https://doi.org/10.1126/science.ads4880.

Asse D., Chuine I., Vitasse Y., Yoccoz N. G., Delpierre N., Badeau V., Delestrade A., Randin C. F. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2018; 252:220-230. doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.030.

Jiao C. Editorial: The effects of climate change and anthropogenic activities on patterns, structures and functions of terrestrial ecosystems. *Front. Ecol. Evol.* 2023; 11:1296292. doi: https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1296292.

Jin X., Wu Q., Peñuelas J., Sardan J., Peng Y., Li Z., Peng X., Heděnec P., Yang Q., Yuang C., Yuan C., Yuan J., Chen Z., Zhao Z., Wu F., Yue K. Climate and anthropogenic activities control the concentrations of copper, zinc, cadmium and chromium in global inland waters. *Commun Earth Environ.* 2025; 6:520. doi: https://doi.org/10.1038/s43247-025-02508-6.

Merlis T. M., Henry M. Simple estimates of polar amplification in moist diffusive energy balance models. *J. Clim.* 2018; 31:5811-5824. doi: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0578.1.

Rinne P. L. H., Paul L. K., van der Schoot C. Decoupling photo- and thermoperiod by projected climate change perturbs bud development, dormancy establishment and vernalization in the model tree Populus. *BMC Plant Biol.* 2018; 18:220. doi: https://doi.org/10.1186/s12870-018-1432-0.

Stuecker M. F., Bitz C. M., Armour K. C., Proistosescu C., Kang S. M., Xie S. P., Kim D., McGregor S., Zhang W., Zhao S., Cai W., Dong Y., Jin F-F. Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks. *Nat. Clim. Change.* 2018; 8:1076-1081. doi: https://doi.org/10.1038/s41558-018-0339-y.

Zhou W., Leung L. R., Xie S. P., Lu J. An analytic theory for the degree of Arctic Amplification. *Nat Commun.* 2024;1 5:5060. doi: https://doi.org/10.1038/s41467-024-48469-w.

Информация об авторах

Серебряков Олег Владимирович – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0009-0006-1171-0368, e-mail: o-ser00@mail.ru.

Яковенко Наталия Владимировна – доктор географических наук, главный научный сотрудник дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

Information about the authors

Serebryakov Oleg Vladimirovich – Postgraduate Student of the Department of Ecology, Forest Protection and Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0009-0006-1171-0368, e-mail: o-ser00@mail.ru.

Yakovenko Nataliya Vladimirovna – Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher at the Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Author of this research paper have directly participated in the planning, executionandanalysisofthisstudy. Authors of this paperhave read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 551.583:632.125 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.002.18-27

Особенности формирования засушливых явлений на субаридных территориях (на примере Волгоградской области)

Пугачёва А. М.✉, Васильченко А. А.
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Россия

Аннотация. На 5-ти объектах (районов Волгоградской обл.), расположенных в сухой степи с каштановыми почвами, за 50-летний временной ряд (с 1973 по 2022 гг.) проведены исследования по климатическим характеристикам сезонов активной вегетации (апрель – июнь), формированию числа засушливых явлений и их связи с показателями урожайности яровой пшеницы. Выявлены различия в условиях влагообеспеченности между районами. В засушливые годы (2018) количество выпавших осадков составило от 11 мм в Волгограде до 39 мм в Иловле, во влажные (2020) от 94 мм в Камышине до 163 мм в Волгограде. Выявленные особенности формирования засух по пяти районам Волгоградской обл. статистически достоверны, подтверждены регрессионным и корреляционным анализами, характеризуя самую высокую повторяемость засух летнего периода в Камышинском р-не (111 явлений), при самом низком показателе за тот же период в Волгограде (24 явления). Средние многолетние значения урожайности по изучаемым районам, относящимся к одной агроклиматической зоне, составляют от 7 до 9 ц/га. В благоприятные по влажности годы (2020) урожайность по районам исследований представлена значениями от 25 ц/га (Нижний Чир), до 4 ц/га в Камышине. В неблагоприятные (2018) снижалась до 1 ц/га в Камышине при урожайности в Иловле в 20 ц/га. Определены достоверные незначительные по силе корреляционные связи 0,23-0,42 между урожайностью и показателем засушливых явлений, рассчитанным по плювиотермическому коэффициенту Кпт, кроме объекта Нижний Чир. А также между урожайностью и влагообеспеченностью 0,35-0,41 на объектах Волгоград, Камышин и Котельниково. Возможно отсутствие связей между рядом показателей, либо их незначительность связаны с ограниченной продолжительностью периода климатических исследований. Полученные данные характеризуют особенности погодных условий и урожайности яровой пшеницы на локальных территориях уровня административных районов и указывают на необходимость их более глубокого изучения.

Ключевые слова. Засушливые явления; засухи; региональный климат; локальный климат; осадки; индекс Педя; гидротермический коэффициент Селянинова, плювиотермический коэффициент.

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-27-20086, включающего региональное софинансирование от Комитета образования и науки Волгоградской области, https://rscf.ru/project/25-27-20086".

Цитирование. Пугачёва А. М., Васильченко А. А. Особенности формирования засушливых явлений на субаридных территориях (на примере Волгоградской области) // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):18-27. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.002.18-27.

Поступила в редакцию: 16.11.2025 Принята к печати: 08.12.2025

UDC 551.583:632.125 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.002.18-27

Subarid features of the formation of drought phenomena (a case study of the Volgograd Region)

Pugacheva A. M.✉, Vasilchenko A. A.

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences”, Volgograd, Russia

Abstract. At five sites (districts of the Volgograd Region) located in the dry steppe zone with chestnut soils, a 50-year dataset (1973–2022) was used to study the climatic characteristics of the active vegetation season (April–June), the formation of drought phenomena, and their relationship with spring wheat yield. Differences in moisture availability between districts were identified. In dry years (2018), the amount of precipitation ranged from 11 mm in Volgograd to 39 mm in Ilovlya, while in wet years (2020) it ranged from 94 mm in Kamyshin to 163 mm in Volgograd. The identified features of drought formation across the five districts are statistically significant, confirmed by regression and correlation analyses. The highest frequency of summer droughts was recorded in the Kamyshinsky District (111 events), and the lowest in Volgograd (24 events). The long-term mean yield of spring wheat in the studied districts belonging to the same agroclimatic zone ranges from 7 to 9 c/ha. In humid years (2020), yields varied from 25 c/ha (Nizhny Chir) to 4 c/ha (Kamyshin). In dry years (2018), yields decreased to 1 c/ha in Kamyshin, while in Ilovlya they reached 20 c/ha. Statistically significant weak correlations (0.23–0.42) were identified between yield and the drought index calculated using the pluvio-thermal coefficient (Kpt), except for the Nizhny Chir site. Correlations between yield and moisture availability (0.35–0.41) were obtained for Volgograd, Kamyshin, and Kotelnikovo. The absence or weakness of relationships between several indicators may be associated with the limited duration of the climatic observation period. The findings reflect the specific features of weather conditions and spring wheat yields at the level of local administrative districts and indicate the need for deeper investigation.

Keywords. drought phenomena; droughts; regional climate; local climate; precipitation; Ped index; Selyaninov hydrothermal coefficient; pluvio-thermal coefficient.

Funding. The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-27-20086, which includes regional co-financing from the Committee of Education and Science of the Volgograd Region. https://rscf.ru/project/25-27-20086".

For citation. Pugacheva A. M., Vasilchenko A. A. Subarid features of the formation of drought phenomena (a case study of the Volgograd Region) // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):18-27. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.002.18-27.

Received: 16.11.2025 Accepted: 08.12.2025

Введение. Результаты проведенных ранее исследований представляют особенности климатических изменений в виде усредненных данных по субъектам (Золотокрылин и др., 2020а; Глобальный климат, 2021). Представляя общую картину изменений, данный подход нивелирует индивидуальные показатели климатических изменений локальных объектов, в нашем исследовании районов области. При этом данные по объектам мелкого территориального деления являются необходимыми для внедрения эффективных элементов в промежуточные и полные циклы сельскохозяйственного производства, принятия технологических и управленческих решений, для системного мониторинга и анализа функционирования сельскохозяйственной отрасли (Золотокрылин и др., 2020а; Zolotokrylin et al., 2020б).

По мнению А. Н. Сажина с соавторами, значительные климатические флуктуации и особенности климатообразования характеризуются закономерной особенностью, такой как неоднородность и изменчивость атмосферы, наблюдаемые не только в пространстве, но и во времени (Сажин и др., 2017).

Волгоградская обл., общая площадь которой составляет 11,28 млн га (Регионы России, 2021), располагается в южной части умеренного пояса. Большая часть ее территории представляет собой сухую степь – 2,87 млн га. Основные зональные типы почв Волгоградской области – черноземы и почвы каштанового типа с переходными формами в виде светло- и темно-каштановой. Для почвенного покрова Волгоградской области характерна смена типов и подтипов почв с северо-запада на юго-восток (Моников, Князев, 2022). Данные по основным климатическим показателям, температуре и осадкам размещены в РФ в свободном доступе, что представляет возможность анализировать происходящие изменения на объектах любых территориальных делений (www.pogodaiklimat.ru).

В настоящее время в Российской Федерации формируются как отдельные базы данных региональных уровней, так и базы данных масштабов страны. Из региональных климатических баз следует отметить базы по Московской, Волгоградской обл. (Свидетельство, 2021; Тищенко, 2016). Формируются глобальные базы для территории России по сведениям об опасных и неблагоприятных явлениях (Коршунов и др., 2019; Шамин, 2018). Эти хранилища информации предоставляют большую вариабельную возможность для анализа массивов данных конкретных территорий, охватывая периоды: сутки, декады, месяцы, годы, позволяя выявлять периодичность и повторяемость явлений, в том числе с помощью применения в расчетах разнообразных критериев и индексов. Аналогичные базы формируются и на международном пространстве, например, глобальная база данных о засухах с 1951 по 2016 гг. (Spinoni et al., 2019).

Изменение текущих климатических характеристик и связанная с этим проблема увеличения периодичности и интенсивности засух за последние десятилетия проявляется в разных географических областях. Это обстоятельство оказывает влияние на многие факторы окружающей среды, в т. ч. на процессы аридизации, деградации земель и расширения границ территорий, подвергающихся опустыниванию. Во многих крупных регионах при наблюдении и анализе долгосрочных тенденций в количестве осадков выявлена следующая особенность: с 1970-х годов на обширных территориях отмечали интенсивные и продолжительные засухи на фоне быстрого темпа прироста температуры (Глобальный климат, 2021; Катцов, 2017). Наличие, степень и продолжительность засух и засушливых явлений оказывает необратимое влияние не только на объекты окружающей среды, но и на экономическую составляющую деятельности человека в сфере сельского хозяйства (Бедрицкий, 2017; Беляев, 2025). Крупномасштабные исследования по этой тематике направлены, как правило, на изучение показателей за длительные периоды, чтобы выявить трендовые изменения и закономерности, представляя возможность прогноза для предотвращения пагубного влияния критических явлений и минимизации возможных рисков и ущербов. В оценке явлений засух и засушливостей используются разнообразные индексы, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в зависимости от характеристик изучаемых явлений и поставленных задач (Золотокрылин и др., 2020б). Среди них: индекс атмосферной засушливости Педя, индекс Селянинова, стандартизированный индекс осадков SPI, комплексный индикатор деградации почв – альбедо поверхности и другие. Проводятся исследования по сравнению между собой достоверности полученных показателей с применением тех или иных индексов по заданным климатическим показателям. Например, Д. А. Васильев с соавторами провел корреляционный анализ временных рядов по четырем индексам засушливости: Селянинова (ГТК), Педя, индекс Палмера, стандартизированного индекса осадков (SPI), с целью комплексной оценки распространения засушливости на Южном Урале (Васильев и др., 2020). Была установлена высокая тесная корреляционная связь ГТК 0,69-0,79 с другими анализируемыми индексами и сделан вывод о возможности его использования в анализе засух и прогнозах изменений климата.

Цель исследования – посредством применения расчетных индексов засушливых явлений провести агрометеорологическую оценку локальных территорий (районов области в пределах одной зоны), направленную на определение индивидуальных особенностей объектов. В задачи исследования входило: по объектам исследований определить в динамике наличие засушливых явлений и их число, проследить изменение урожайности яровой пшеницы, определить корреляционные зависимости между показателями.

Материалы и методы. Объектами исследований являлись 5 районов Волгоградской обл. с имеющимися зарегистрированными метеостанциями Росгидромета (рис. 1). Период временного охвата – 50 лет (с 1973 по 2022 гг.).

Научная гипотеза по различиям в динамике сезонных поступлений осадков в сухих степях в связи с изменениями климата была выдвинута и подтверждена ранее одним из авторов (Pugacheva, 2020), также она нашла развитие и подтверждение в дальнейших исследованиях локальных территорий (Pugacheva, 2022).

Используемые в работе данные находятся в свободном доступе (www.pogodaiklimat.ru). Используются массивы данных по среднемесячным осадкам в сезонных разрезах, а также их расчетные значения – гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК), индекс Педя, плювиотермический коэффициент (Селянинов, 1928; Бучинский, 1970; Педь, 1975).

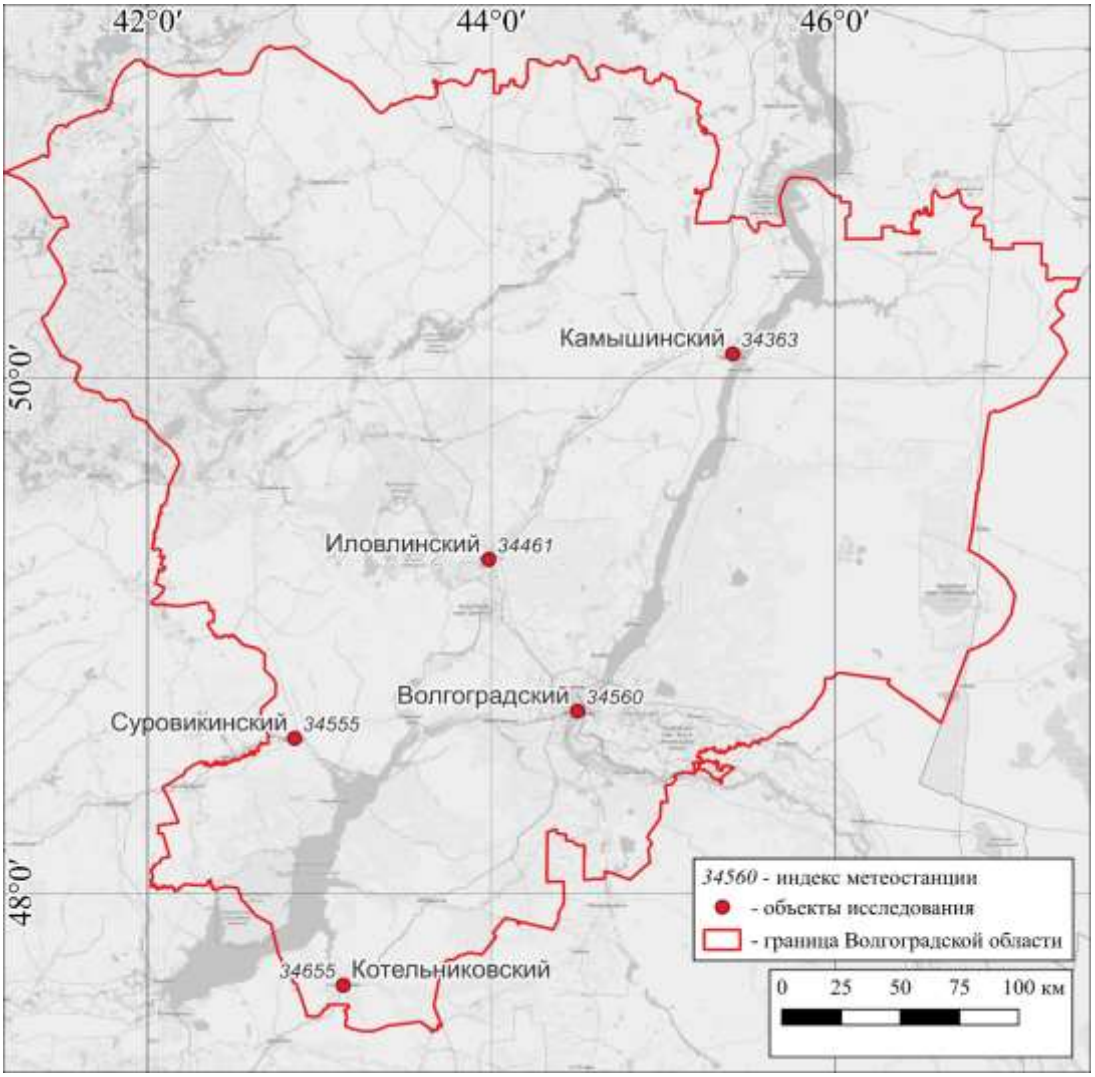


Рис. 1. Объекты исследования на территории сухой степи с каштановыми почвами (Волгоградская обл.)

Для анализа в данной работе выбраны признанные отечественные индексы засушливых явлений: Педя и Селянинова. Обоснованием их выбора явились контрастные по своим производным подходы к расчетам. Агроклиматические условия по степени засушливости рассчитывались по данным об осадках и температуре, по гидротермическому коэффициенту Г. Т. Селянинова (ГТК) (Селянинов, 1928). Его формула:

$$Kc = \Sigma R/0{,}1\Sigma t, \quad (1)$$

где R представляет собой сумму осадков в миллиметрах за период с температурами выше +10 °С, Σt - сумма температур за тот же период в градусах, °С.

Данная оценка увлажнения территорий получила широкое распространения при изучении засух. Установлены типы климатических условий в зависимости от величины Kc: менее 0,5 – мало осадков и очень засушливо; 0,5-1,0 – засушливо и недостаточно влажно; более 1,0 – избыточно влажно. По мнению климатологов, уровень показателя увлажнения согласуется с геоботаническими зонами (Смирнов, 1958).

В расчет специализированного индекса засух Педя Si включены не сами значения основных факторов, влияющих на формирование засух (температуры воздуха T и осадков R), а их аномалии по сравнению с климатической нормой. Так как включенные в расчет основные параметры факторов отличаются асимметрией, в формуле заложено нормирование их значений. В связи с вышеизложенным расчет индекса Педя по атмосферным засухам выглядит следующим образом:

$$S_i(\tau) = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R}, \quad (2)$$

где *Si* – индекс Педя, $\Delta T = T - TN$ и $\Delta R = R - RN$, σT и σR – среднеквадратические отклонения температуры и осадков. Градация засух по Педю следующая: 1,0÷2,0 – слабые засухи; 2,0÷3,0 – средние; ≥ 3,0 сильные засухи. Данный индекс может применяться как для отдельных географических пунктов, так и для больших территорий в целом в исследуемый период.

Также в анализе применен плювиотермический коэффициент *К*пт (Бучинский, 1970). Он представляет отношение количества выпавших осадков (мм) к сумме средних месячных температур за тот же период:

$$К\text{пт} = \frac{\sum R}{\sum T}, \quad (3)$$

где *К*пт – плювиотермический коэффициент, ΣR – сумма осадков, ΣT – сумма температур. Обычно его находят за вегетационный период – с апреля по июнь и с июля по август. В качестве критерия по наличию атмосферной засухи принята величина *К*пт *< 2.*

В настоящей работе он определен за период вегетации яровой пшеницы, с апреля по июнь, так как в данный период проходят основные этапы развития данной культуры.

При анализе влияния погодных условий на аграрную деятельность проведен анализ урожайности яровой пшеницы и ее зависимость от изучаемых факторов. Яровая пшеница является наиболее чувствительной культурой к погодным показателям вегетационного периода по сравнению с озимой: осадкам и температуре. Более широко используемая в производстве на объектах исследований озимая пшеница подходит под анализ данной работы в меньшей степени, так как ее урожайность зависит, в т. ч. от условий перезимовки, изучение которых не входило в задачи данного исследования. Тренды средних показателей урожайности по объектам исследований аппроксимированы полиномиальной зависимостью, что объясняется использованием в длительных временных рядах большого количества неоднородных данных. Применен полином третьей степени.

Деление территории Волгоградской обл. на почвенно-климатические зоны представлено по данным академика А. С. Овчинникова с соавторами (Овчинников и др., 2014).

Результаты и обсуждение. Проведен анализ урожайности яровой пшеницы за 50-летний период по районам области (рис. 2). Яровая пшеница, несмотря на низкие показатели урожайности, остается на полях отдельных хозяйств Волгоградской обл. в ограниченном и минимальном количестве. Площадь ее возделывания в регионе занимает чуть больше 100 тыс. га. Несмотря на использование в производстве современных сортов отечественной селекции, применения современных технологий возделывания, урожайность данной культуры на объектах исследований не превышает 25 ц/га. Ограниченный объем осадков в периоды активной вегетации, в отдельные засушливые годы, например 2018 г., от 11 в Волгограде до 39 мм в Иловле, становится лимитирующим фактором получения высоких урожаев. Во влажные годы, например 2020 г., количество осадком может колебаться от 94 в Камышине до 163 мм в Волгограде. Средние многолетние значения урожайности на локальных объектах составляют от 7 до 9 ц/га. В благоприятные по влажности годы (2020) урожайность по районам исследований представлена разными значениями от 25 ц/га (Нижний Чир), до 4 ц/га в Камышине. В неблагоприятные (2018) может снижаться до 1 ц/га в Камышине, при показателе урожайности в Иловле 20 ц/га.

По отношению количества выпавших осадков (мм) к сумме месячных температур за период апрель – июнь по плювиотермическому коэффициенту *К*пт рассчитан коэффициент атмосферной засухи. Выбор в анализе данного временного промежутка вегетационного периода связан с прохождением у яровой пшеницы в этот период основных генеративных фаз развития. На графике (рис. 3) выделены данные контрастных по своим показателям объектов – Иловля имеющий выраженные засушливые условия в течение всего периода исследований, 84,9 % лет от общего исследуемого перида и Котельниково с засушливыми условиями составляющими 32,1 %.

Рассчитанная корреляционная связь между урожайностью яровой пшеницы и метеорологическими показателями представлена в таблице. Согласно полученным данным, наблюдается достоверная связь 0,23-0,41 урожайности с засухами периода апрель-июнь, рассчитанная по плювиотермическому коэффициенту по всем объектам кроме Нижнего Чира. Также достоверная связь 0,35-0,41 выявлена между урожайностью и показателем осадков по трем объектам: Волгоград, Камышин, Котельниково. При этом выявленные корреляционные связи между показателями являются незначительными по своей силе. Это связано, скорее всего, с ограни-

ченной продолжительностью периода исследований, который является недостаточным для выявления устойчивых связей в анализе агроклиматических показателей.

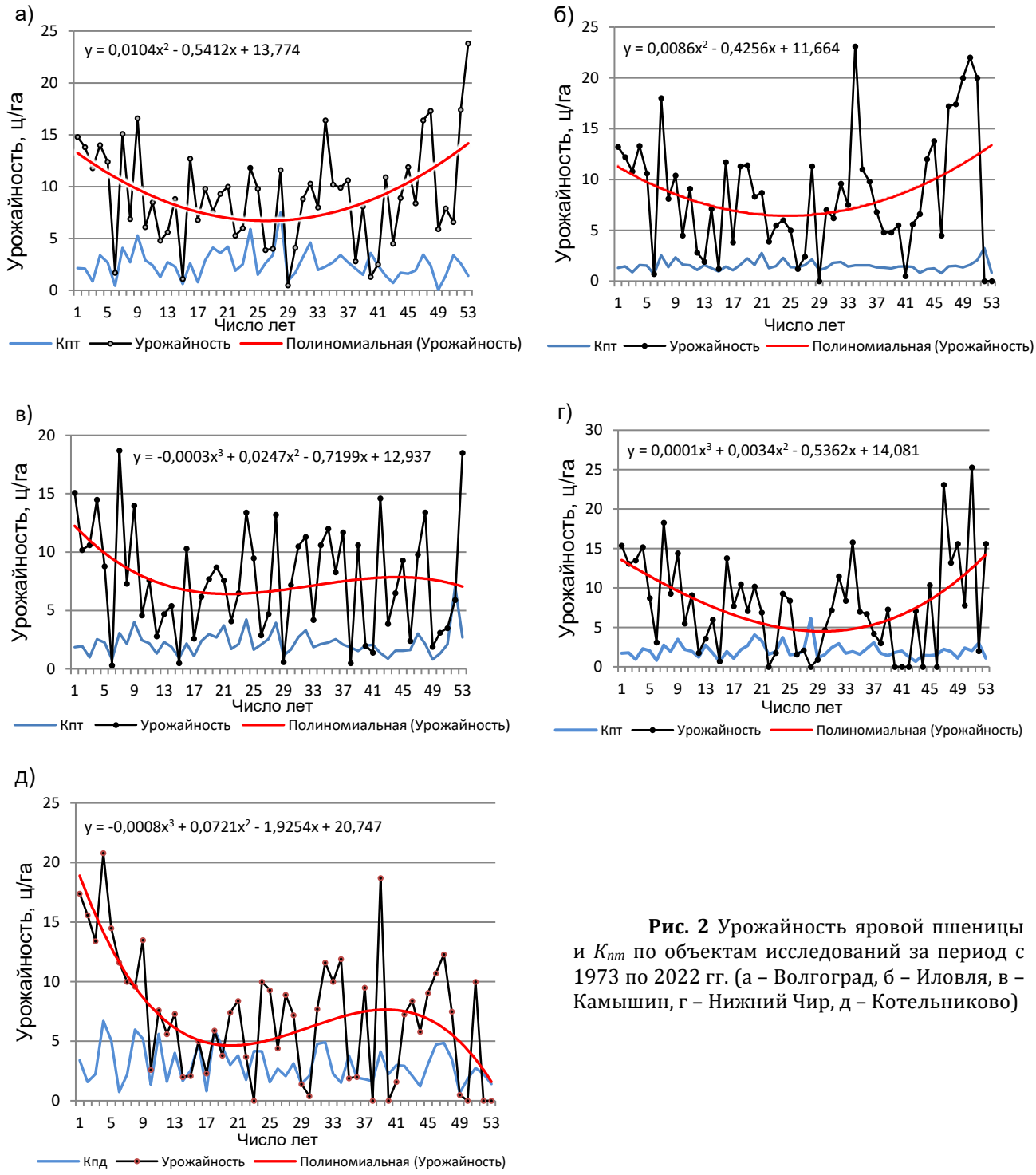


Рис. 2 Урожайность яровой пшеницы и $K_{пт}$ по объектам исследований за период с 1973 по 2022 гг. (а – Волгоград, б – Иловля, в – Камышин, г – Нижний Чир, д – Котельниково)

Диапазон числа явлений засух за исследуемый летний период, рассчитанный по индексу Педя, составил от 24 на объекте Волгоград до 98 на объекте в Камышине (рис. 4). При наличии засух в весенний период – от 1 явления в Котельниково до 16 в Камышине. По индексу Селянинова наблюдалось в летний период от 58 явлений в Котельниково до 111 в Иловле, демонстрируя индивидуальные характеристики локальных территорий. Максимальные значения *Si* и следовательно самые сильные засухи были отмечены на всех представленных объектах в 2001 году, характеризуясь особенностями. *Si* ≥ 3,0 за период исследований наблюдались в Волгограде и в Котельниково 3,1; 3,7, на остальных объектах засухи имели средние значения. Индивидуальные характеристики засушливых явлений изучаемых локальных объектов также

показывают особенности локальных территорий и свидетельствуют о необходимости их более глубокого изучения.

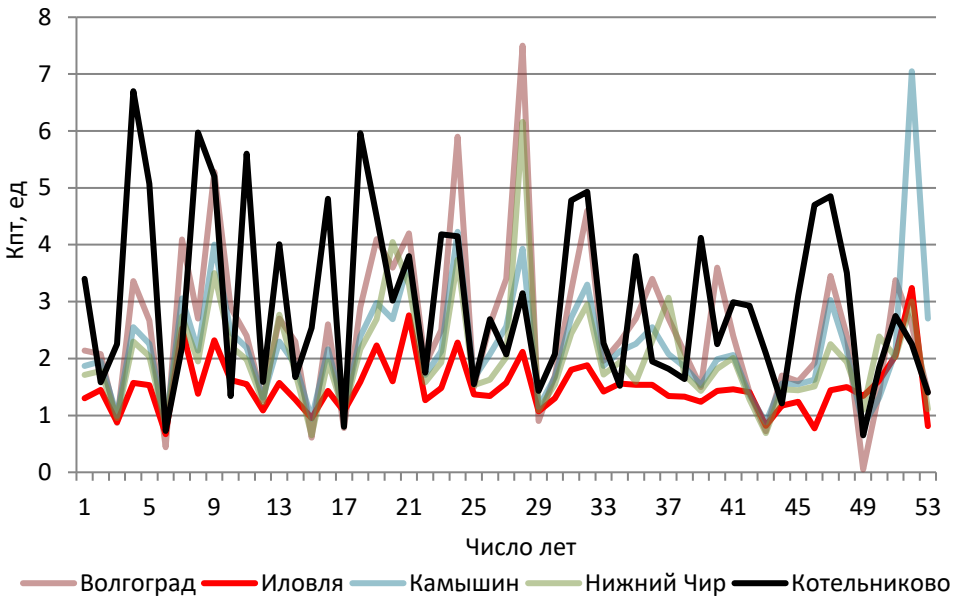


Рис. 3. Плювиотермические коэффициенты (Кпт) засух по вегетационным периодам (апрель – июнь) на объектах исследований

Таблица

Аналтиз связи между урожайностью яровой пшеницы и метеорологическими показателями

Метеостанция	Номер станции в системе ВМО	Коэффициент корреляции урожайности с:		
		осадками	температурой	*Кпт*
Волгоград	34560	**0,35** (α = 0,05)	0,12 (не значим)	**0,29** (α = 0,05)
Иловля	34461	0,13 (не значим)	–0,16 (не значим)	**0,23** (α = 0,10)
Камышин	34363	**0,41** (α = 0,01)	–0,12 (не значим)	**0,37** (α = 0,01)
Нижний Чир	34555	0,13 (не значим)	0,01 (не значим)	0,04 (не значим)
Котельниково	34655	**0,38** (α = 0,01**)**	–0,33 (не значим)	**0,42** (α = 0,01)

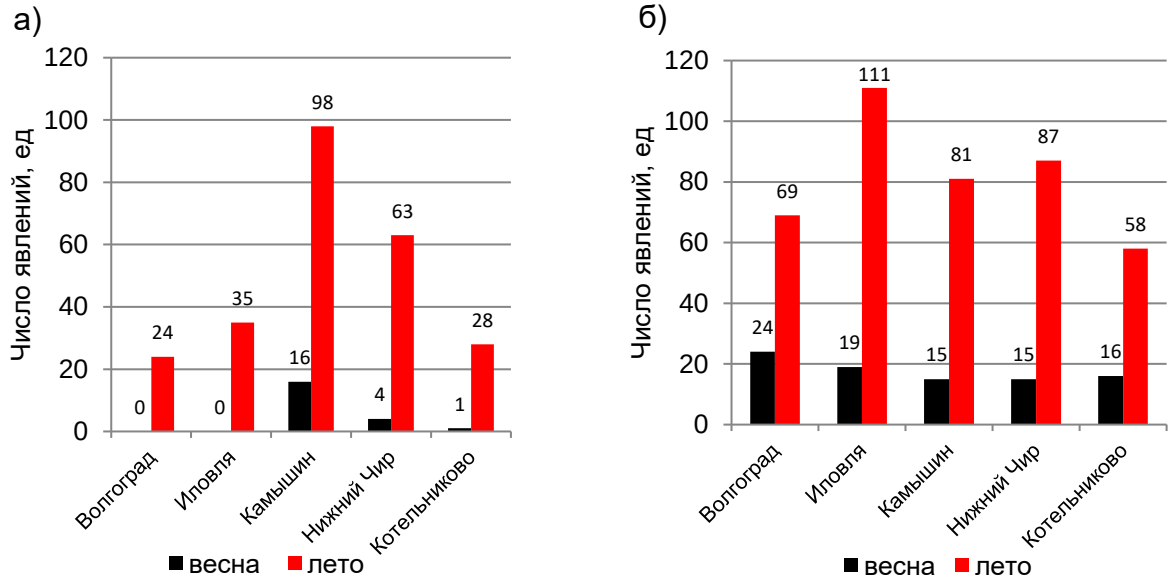


Рис. 4. Анализ количества засух по индексам Педя (а) и Селянинова (б) за весенне-летний период с 1973 по 1922 гг.

Заключение.

1. Анализ числа явлений засух применением разных коэффициентов, выявил индивидуальные значения по районам области в пределах одной агроклиматической зоны, что характеризует особенности их формирования. Диапазон явлений по Педю от 24 в Волгограде до 98 в Камышине за летний период. По Селянинову от 58 явлений в Котельниково до 111 явлений в Камышине за тот же период.

2. На основе анализа длятельного временного ряда урожайности (50 лет) яровой пшеницы определны индивидуальные показатели урожайности по объектам исследований, размещенным в сухой степи с каштановыми почвами. Максимальные показатели урожайности не превышают 25 ц/га в Волгограде и Нижнем Чире. На остальных объектах этот уровень не поднимается выше 20 ц/га.

3. Выявлены незначительные по силе корреляционные связи 0,23-0,42 между урожайностью и засушливыми явлениями по всем исследуемым районам, кроме Нижнего Чира, что возможно связано с недостаточной для климатических исследований продолжительностью периода исследований.

4. Локальные территории (в данном исследовании районы Волгоградской области) имеют индивидуальные характеристики агрометеорологических показателей, свидетельствуя о необходимости их более детального изучения для безрискового ведения сельскохозяйственной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Бедрицкий А. И., Коршунов А. А., Шаймарданов М. З. Влияние опасных гидрометеорологических явлений на устойчивое развитие экономики России. *Метеорология и гидрология*. 2017;7: 59-67. [Bedritsky A. I., Korshunov A. A., Shaimardanov M. Z. The impact of dangerous hydrometeorological phenomena on the sustainable development of the Russian economy. *Meteorology and hydrology*. 2017;7: 59-67].

Беляев А. И., Пугачёва А. М., Зыкова А. А., Корнеева Е. А. Основные тренды функционирования экономики регионов России, подверженных опустыниванию. *Экономика региона*. 2025;21(1): 17-32. doi: https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-1-2 [Belyaev A. I., Pugacheva A. M., Zykova A. A., Korneeva E. A. The main trends in the functioning of the economy of the regions of Russia affected by desertification. *The economy of the region*. 2025;21(1): 17-32. doi: https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2025-1-2].

Бучинский И. Е. Засухи, суховеи, пыльные бури на Украине и борьба с ними. Киев, изд. «Урожай», 1970. [Buchinsky I. E. Droughts, dry winds, dust storms in Ukraine and the fight against them. Kiev, ed. "Harvest", 1970].

Васильев Д. Ю., Водопьянов В. В., Семенов В. А., Чибилев А. А. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960-2019 гг. с использованием различных методов. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2020;494(1): 91-96. doi: https://doi.org/10.31857/S2686739720090212 [Vasilyeva D. Yu., Vodopyanov V. V., Semenov V. A., Chibilev A. A. Assessment of trends in aridity for the territory of the Southern Urals in the period 1960-2019 using various methods. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2020;494(1): 91–96. doi: https://doi.org/10.31857/S2686739720090212].

Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад. Т. 3. Р. С.-Х. Эдельгериев, А. Л. Иванов, И. М. Донник и др. Москва: Издательство МБА. 2021;700. doi: https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1 [Global climate and soil cover of Russia: drought manifestations, prevention, control, mitigation, and adaptation measures (agriculture and forestry). National report. Vol. 3. R. S.-H. Edelgeriev, A. L. Ivanov, I. M. donnik, and others. Moscow: IBA Publishing House. 2021;700. doi: https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1].

Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2020;2: 207–217. doi: https://doi.org/10.31857/s258755662002017x [Zolotokrylin A. N.,

Cherenkova E. A., Titkova T. B. Aridization of the arid lands of the European part of Russia and the connection with droughts. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is geographical*. 2020;2: 207-217. doi: https://doi.org/10.31857/s258755662002017x].

Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2017;586: 7-20. [Kattsov V. M., Porfiriev B. N. Adaptation of Russia to climate change: the concept of the national plan. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov*. 2017;586: 7-20].

Коршунов А. А., Шаймарданов В. М., Шаймарданов М. З. Система накопления и обработки данных об опасных гидрометеорологических явлениях в России. *Метеорология и гидрология*. 2019;3: 86-92. [Korshunov A. A., Shaimardanov V. M., Shaimardanov M. Z. The system of accumulation and processing of data on dangerous hydrometeorological phenomena in Russia. *Meteorology and hydrology*. 2019;3: 86-92].

Моников С. Н., Князев Ю. П. Биогеографические исследования Поволжья Карла Клауса и Модеста Богданова. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2022;2: 140-145. doi: https://doi.org/10.17308/geo.2022.2/9321 [Monikov S. N., Knyazev Yu. P. Biogeographic studies of the Volga region by Karl Claus and Modest Bogdanov. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2022;2: 140-145. doi: https://doi.org/10.17308/geo.2022.2/9321].

Овчинников А. С., Балашова Н. Н., Иванова Н. В. Стратегия комплексного развития сельских территорий и эффективного функционирования АПК Волгоградской области в условиях ВТО. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2014;1: 16-20. [Ovchinnikov A. S., Balashova N. N., Ivanova N. V. Strategy of integrated rural development and effective functioning of the agro-industrial complex of the Volgograd region in the context of the WTO. *Economics of agricultural and processing enterprises*. 2014;1: 16-20].

Педь Д. А. О показателе засухи и избыточного увлажнения. *Труды Гидрометцентра СССР*. 1975;156: 19-38. [Pedy D. A. On the indicator of drought and excessive moisture. *Proceedings of the USSR Hydrometeorological Center*. 1975;156: 19-38].

Регионы России. Социально-экономические показатели: статистический сборник. М.: Гос. ком. Рос. Федерации по статистике, 2021;1112 [Regions of Russia. Socio-economic indicators: a statistical collection. Moscow: Gos. com. Ros. Federation for Statistics, 2021;1112].

Сажин А. Н., Кулик К. Н., Васильев Ю. И. Погода и климат Волгоградской области. Изд. 2-е, перераб. и доп. Волгоград : ВНИАЛМИ, 2017;334. [Sazhin A. N., Kulik. K. N., Vasiliev Yu. I. Weather and climate of the Volgograd region, 2nd edition, revised. and add. Volgograd: VNIALMI, 2017;334].

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622059 Российская Федерация. Влагообеспеченность сухих степей Волгоградской области: № 2021621952: заявл. 22.09.2021: опубл. 01.10.2021 / А. М. Пугачёва, А. И. Беляев, К. Ю. Трубакова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». – EDN QOJJAX. [Certificate of State registration of the database No. 2021622059 Russian Federation. Moisture availability of the dry steppes of the Volgograd region: No. 2021621952: application 22.09.2021 : published 01.10.2021 / A. M. Pugacheva, A. I. Belyaev, K. Y. Trubakova [and others]; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences". – EDN QOJJAX].

Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата. *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1928;20: 165–178. [Selyaninov G. T. On agricultural climate assessment. *Proceedings on agricultural meteorology*. 1928;20: 165-178].

Смирнов В. А. К вопросу о выявлении степени засушливости территории. – В кн.: Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л., Гидрометеоиздат, 1958;135-144 [Smirnov V. A. On the issue of identifying the degree of aridity of the territory. – In: Droughts in the USSR, their origin, recurrence and impact on the harvest. L., Hydrometeoizdat, 1958; 135-144].

Тищенко В. А., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н. Н. Повторяемость засушливых периодов в Москве в теплое полугодие. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2016;359: 161-177. [Tishchenko V. A., Kozeltseva V. F., Kuznetsova N. N.

The recurrence of dry periods in Moscow in the warm half of the year. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2016;359: 161-177].

Шамин С. И. Структура и содержание базы сведений об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, нанесших материальный и социальный ущерб. *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. 2018;182: 144-158. [Shamin S. I. The structure and content of the database of information on dangerous and unfavorable hydrometeorological phenomena that caused material and social damage. *Proceedings of VNIIGMI-MCD*. 2018;182: 144-158].

Pugacheva A. M. Climatic fluctuations in dry steppes and their role in the demutation process. *Arid ecosystems*. 2020;10: 181-187 doi: https://doi.org/10.1134/S2079096120030063

Pugacheva A. M., Belyaev A. I., Trubakova K. Yu., Romadina O. D. Regional climate changes in dry steppes and their relationship to droughts. *Arid ecosystems*. 2022;12: 353-360. doi: https://doi.org/10.1134/S2079096122040187.

Spinoni J., Barbosa P., De Jager A., McCormick N., Naumann G., Vogt J. V., Magni D., Masante D., Mazzeschi M. A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of hydrology. Regional studies*, 2019;22: 100593. doi: https:// doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100593.

Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Cherenkova E. A. Characteristics of Spring-Summer Drought in Dry and Wet Periods in the South of European Russia. *Arid ecosystems*. 2020;10: 322-328. doi: https://doi.org/10.1134/S2079096120040216.

Информация об авторах

Пугачёва Анна Михайловна, кандидат сельскохозяйственных наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН) 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д.97, e-mail: puga-chevaa@vfanc.ru, ORCID 0000-0003-0852-8056.

Васильченко Александр Анатольевич, младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразве-дения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН) 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д.97, e-mail: vasilchenko-a@vfanc.ru, ORCID 0000-0001-9591-6895.

Information about the authors

Pugacheva Anna Mikhailovna, Candidate of Agricultural Sciences, Scientific Secretary, Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, Universitetsky Ave., 97, e-mail: pugachevaa@vfanc.ru, ORCID 0000-0003-0852-8056

Vasilchenko Alexander Anatolyevich, Junior Researcher, Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, Universitetsky Ave., 97, e-mail: vasilchenko-a@vfanc.ru ORCID 0000-0001-9591-6895.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author’s contribution. Author of this research paper have directly participated in the planning, executionandanalysisofthisstudy. Authors of this paperhave read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 631.582: 631.452 (470.44/.47) DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.003.28-39

Результаты изучения полевых севооборотов в сухостепной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья

Беленков А. И.[1,✉], Тибирьков А. П.[2], Холод А. А.[2]
[1]ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса», г. Лобня, Россия
[2]ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», г. Волгоград, Россия

Аннотация. Статья посвящена достаточно актуальной и неоднозначной теме – анализу результатов полевых опытов, проведенных в конце прошлого – начале текущего столетия в различных почвенно-климатических зонах Нижнего Поволжья, т. е. Волгоградской и Астраханской обл. Цель работы – предложить результаты комплексных исследований по структуре посевных площадей и построению полевых севооборотов, что позволит рекомендовать производству наиболее продуктивные варианты для крупных сельскохозяйственных предприятий и крестьянско-фермерских хозяйств. Сравнение проводилось с учетом влияния основных метеопоказателей на продуктивность культур опытных севооборотов. Лучшими севооборотами в сухостепной и полупустынной зонах Волгоградской и Астраханской обл. являются трех-, четырехпольные зернопаровые и зернопаропропашные севообороты с набором традиционных зерновых культур и возможным размещением в них сидератов с целью стабилизации плодородия почвы. Преимущество таких севооборотов над вариантами с меньшей и большей ротацией в агротехничесеком плане составляло в среднем порядка 5-10 т на 100 га пашни. Рентабельность таких севооборотов в 1,5-2 раза больше. Коэффициент энергетической эффективности близко или превышал 1. Основной акцент при построении опытных севооборотов и определении структуры посевных площадей уделялся таким важным и экономически доходным сельскохозяйственным культурам как озимая и яровая пшеница, озимая рожь, ячмень, просо, нут, горчица, подсолнечник. Авторы предлагают собственный вариант возможного размещения подсолнечника в короткоротационных севооборотах в засушливых условиях.

Ключевые слова. Полевой опыт; севооборот; структура посевных площадей; метеоусловия; выход зерна; экономическая эффективность; энергетическая оценка.

Цитирование. Беленков А. И., Тибирьков А. П., Холод А. А. Результаты изучения полевых севооборотов в сухостепной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):28-39. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.003.28-39.

Поступила в редакцию: 29.09.2025 Принята к печати: 14.11.2025

UDC UDC 631.582: 631.452 (470.44/.47) DOI: 10.34736/FNC.2025.130.3.003.28-39

Results of the study of field crop rotations in the dry-steppe and semi-desert zones of the Lower Volga region

Belenkov A. I.[1,✉], Tibirkov A. P.[2], Kholod A. A.[2]
[1]Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center of Forage Production and Agroecology named after V. R. Williams", Lobnya, Russia
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Agrarian University", Volgograd, Russia

Abstract. The article addresses a highly relevant and rather complex issue – the analysis of field experiments conducted at the end of the last and the beginning of the current century in various soil and climatic zones of the Lower Volga region, namely in the Volgograd and Astrakhan regions. The aim of the study is to present comprehensive results on the structure of sown areas and the develop-

✉ – Для контактов/Corresponding author.

ment of field crop rotations, which will make it possible to recommend the most productive options for large agricultural enterprises and peasant farms. The comparison was carried out taking into account the influence of key meteorological indicators on the productivity of crops in the experimental crop rotations. The most effective crop rotations in the dry-steppe and semi-desert zones of the Volgograd and Astrakhan regions are three- and four-field grain–fallow and grain–fallow–row-crop rotations that include traditional cereal crops and, if possible, green manure crops to stabilize soil fertility. The agronomic advantage of such rotations over variants with shorter or longer rotations averaged about 5-10 tons per 100 hectares of arable land. Their profitability was 1.5-2 times higher, and the energy efficiency coefficient was close to or exceeded 1. When designing the experimental crop rotations and determining the structure of sown areas, special attention was paid to economically valuable crops such as winter and spring wheat, winter rye, barley, millet, chickpea, mustard, and sunflower. The authors also propose their own scheme for including sunflower in short-rotation systems under arid conditions.

Keywords. Field experience; crop rotation; structure of sown areas; weather conditions; grain yield; economic efficiency; energy assessment.

For citation. Belenkov A. I., Tibirikov A. P., Kholod A. A. Results of the study of field crop rotations in the dry-steppe and semi-desert zones of the Lower Volga region // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):28-39. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.003.28-39.

Received: 29.09.2025 Accepted: 14.11.2025

Введение. Понятию, роли и значению правильного научно обоснованного севооборота ученые и практики сельскохозяйственного производства всегда уделяли пристальное внимание. Начиная с античных времен и до настоящих дней, мы не находим четкого ответа – какие севообороты можно отнести к единственно верным и полностью обоснованным по всем предъявляемым требованиям? Если проследить историческое развитие данного вопроса, то, начиная с античных времен (Теофраст, Марк Катон Старший, Марк Варрон, Публий Вергилий, Луций Колумелла), мы находим доказательства положительного влияния севооборота на урожайность культур и плодородие почвы. Что-то подобное, но на более высоком уровне писали о севообороте в средние века в Западной Европе (Бернар де Палисси, Иоганн Христиан Шубарт, Артур Юнг) и России (В. Н. Татищев, А. Т. Болотов, И. М. Комов). Влиянию и значению севооборота посвящены труды ученых XVII-XIX столетий за рубежом (Альбрехт Даниель Тэер, Герман Гельригель, Жан Батист Буссенго) и у нас в России (М. Г. Павлов, А. В. Советов, И. А. Стебут, А. Н. Энгельгардт, А. С. Ермолов). Более весомые результаты были достигнуты в XX в. К. А. Тимирязевым, В. Р. Вильямсом, Д. Н. Прянишниковым, А. Г. Дояренко, Б. А. Доспеховым, А. М. Лыковым, С. А. Воробьевым, В. Г. Лошаковым и др. Свой результативный и важный вклад в учении о севообороте внесли волгоградские ученые – агрономы К. Г. Шульмейстер, А. М. Гаврилов, А. Н. Сухов, А. И. Беленков, А. В. Зеленев (Беленков и др., 2016).

Многолетними исследованиями, проведенными учеными Волгоградского ГАУ (ВГСХА, ВСХИ), установлены оптимальные структура посевных площадей и схемы полевых севооборотов в различных подзонах Нижнего Поволжья, включая сухостепную и полупустынную. В числе лучших в Волгоградской и Астраханской областях приняты короткоротационные зернопаровые и зернопаропропашные севообороты с набором наиболее доходных и урожайных культур таких, как озимая пшеница и рожь, ячмень, подсолнечник, кукуруза, нут, горчица. Такие севообороты обеспечивают высокую продуктивность, максимальный сбор продукции, поддержание и повышение почвенного плодородия за счет их биологизации (Шульмейстер, 1995; Гаврилов, 1997; Сухов и др., 2011; Беленков, 2014, Зеленев, Семинченко, 2019; Каипов, Султангазин, 2022).

Наши исследования по изучению структуры посевных площадей и схем полевых севооборотов в сухостепной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья, начало которых датируется 1982 г., проводились в учхозе «Горная Поляна» Волгоградского СХИ (ныне ВолгГАУ), продолжились с 1993 г. в Прикаспийском НИИ аридного земледелия и были завершены в 2006-2009 гг. в том же учхозе «Горная Поляна» и Нижне-Волжском НИИСХ.

Цель исследований – на основании многолетних данных полевых опытов, проведенных в сухостепной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья определить наиболее приемлемые вари-

анты полевых севооборотов, обеспечивающих стабильную и устойчивую урожайность сельскохозяйственных культур и оказывающих положительное влияние на плодородие почв.

Материалы и методы. Схемы полевых опытов, включающих по нескольку вариантов в названных объектах исследований, приведены в табл. 1-3. В табл. 1 представлена схема полевого конца прошлого столетия по изучению структуры посевных площадей и схем севооборотов, характерных для сухостепной зоны Нижнего Поволжья того времени. В опыте в период 1982-1983 гг. и с продолжением в 1986-1990 гг. изучались от двух до семипольных севооборотов.

Таблица 1

Схемы полевых опытов по изучению полевых севооборотов

Номер севооборота	Номер поля севооборота						
	1	2	3	4	5	6	7
Учхоз «Горная Поляна», 1982-83, 1986-1990 гг.							
1	Пар чистый	Озимая пшеница	-	-	-	-	-
2			Ячмень	-	-	-	-
3			Яр. пшеница	Ячмень	-	-	-
4			Просо	Яр. пшеница	Ячмень	-	-
5			Яр. пшеница	Просо	Яр. пшеница	Ячмень	-
6			Нут	Оз. пшеница	Яр. пшеница	Ячмень	-
7			Оз. пшеница	Яр. пшеница	Нут	Оз. пшеница	Ячмень
Прикаспийский НИИАЗ, 1993-1999 гг.							
Номер севооборота	Номер поля севооборота						
	1	2	3	4	5	6	
1	Пар чистый	Озимая рожь	Сорго на зерно	Ячмень	-	-	
2			Сорго на зерно	Ячмень + донник	Донник на сидерат	-	
3			Сорго на зерно	Ячмень + донник	Донник на корм	-	
4			Ячмень + донник	Донник на сидерат	Сорго на зерно	-	
5			Ячмень	Горчица на сидерат	Сорго на зерно	-	
6			Ячмень	Горох + овес на сидерат	Сорго на зерно	-	
7			Ячмень + мн. травы	Мн. травы 1 г. п.	Мн. травы 2 г. п.	Просо	

Таблица 2

Схемы севооборотов (Нижне-Волжский НИИСХ, 2006-2009 гг.)

1. Зернопаровой (контроль)	2. Зернопаротравяной биологизированный	3. Сидеральный биологизированный	4. Зернопаропропашной биологизированный
1. Чистый пар 2. Оз. пшеница 3. Яр. пшеница 4. Ячмень	1. Сидеральный ч пар 2. Озимая пшеница 3. Эспарцет на сидерат	1. Сидеральный ч. пар 2. Озимая пшеница 3. Эспарцет (сидерат) 4. Эспарцет (сидерат)	1. Чистый пар 2. Оз. пшеница 3. Нут 4. Яр. пшеница

В полупустынной зоне Астраханской обл. проводились сравнительные исследования по изучению схем полевых севооборотов с использованием в них сидератов и многолетних трав в качестве приема стабилизации и поддержания почвенного плодородия.

Проблему регулирования почвенного плодородия в сухостепной зоне Нижне-Волжского НИИСХ решалась в исследованиях более позднего времени, а именно, в 2006-2009 гг. (см. табл. 2).

Современные реалии государственного и частного сектора экономики сельскохозяйственного производства начала, текущего столетии наложили отпечаток на изменение структуры посевных площадей и перестройку схем севооборотов в плане сокращения длины ротации и ориентирование на наиболее ценные и доходные культуры в рыночных условия (табл. 3).

Таблица 3

Схемы полевого опыта (учхоз «Горная Поляна» ВГСХА, 2006-2009 гг.)

Номер поля	Вариант полевых севооборотов						
	1	2	3	4	5	6	7
1	Пар чист.	Пар чист.	Пар чист.	Пар чист.	Пар чист.	Пар чист.	Пар чист.
2	Оз. пшен.	Яр. пшен.	Оз. пшен.	Оз. пшен.	Оз. пшен.	Оз. пшен.	Оз. пшен.
3			Яр. пшен.	Подсолнечник	Нут	Яр. пшен.	Нут
4						Ячмень	Ячмень

Так, ротация севооборотов в сухостепной зоне сократилась до возможного минимума, имея в структуре 3-4 поля наиболее ценных и урожайных культур, которые приносят наибольший доход при умеренных затратах. В зоне сухих степей началось активное выращивание подсолнечника, стоимость семян которого на момент проведения исследований превышала стоимость зерна пшеницы в 1,5-2 раза. Отсюда появилась проблема введения в коротко-ротационные севообороты подсолнечника. Тем самым пришлось идти на нарушения основного правила размещения этой культуры в севообороте – это его возвращение на прежнее место не ранее, чем через 6-8 лет по причинам накопления в почве возбудителей болезней и вредителей, возможности появления и распространения опасного карантинного сорняка повилики. Несмотря на это, массовое производство важнейшей масличной культуры делало попытки возделывания подсолнечника в трех-, четырехпольных севооборотах. Однако, вопрос может решен таким образом (табл. 4).

Таблица 4

Ротационная таблица с половиной поля подсолнечника 3-4-польного севооборота

№	2025 г.	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.	2031 г.	2032 г.
1	Пар чист.	Оз. пшен.	Яр. пшен.	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	Яр. пшен.	½ подсол. ½ ячмень
2	Оз. пшен.	Яр. пшен.	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	Яр. пшен.	½ подсол. ½ ячмень	Пар чист.
3	Яр. пшен.	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	Яр. пшен.	½ подсол. ½ ячмень	Пар чист.	Оз. пшен.
4	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	Яр. пшен.	½ подсол. ½ ячмень	Пар чист.	Оз. пшен.	Яр. пшен.
№	2025 г.	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.	2030 г.	2031 г.	2032 г.
1	Пар чист.	Оз. пшен.	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	½ подсол. ½ ячмень	Пар чист.	Оз. пшен.
2	Оз. пшен.	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	½ подсол. ½ ячмень	Пар чист.	Оз. пшен.	½ ячмень ½ подсол.
3	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.	Оз. пшен.	½ подсол. ½ ячмень	Пар чист.	Оз. пшен.	½ ячмень ½ подсол.	Пар чист.

Последнее поле четырехпольного или трехпольного севооборота разбивается на две равные части, т. е. на каждую культуру (ячмень и подсолнечник) будет приходиться по полполя. После прохождения двух ротаций по примеру первого поля ротационной таблицы (см. табл. 4) эти две половинки меняются местами, на месте, которое занимал ячмень в 2028 г., становиться подсолнечник в 2032 г. Подсолнечник вернется на прежнюю часть поля только в 2036 г., т. е через 8 лет. Таким образом, выполняется значимое правило севооборота – размещать подсолнечник на прежнем месте не ранее, чем через 7-8 лет. Похожая ситуация в трехпольном севообороте. Первое поле в 2027 г. разбивается на две половины с ячменем и подсолнечником, в 2030 г. они меняются местами и на прежнее место подсолнечник возвратится через 6 лет.

Результаты. За годы проведения исследований складывались неодинаковые метеорологические показатели количества осадков и температуры воздуха в период активной вегетации сельскохозяйственных культур, т. е. с апреля по август каждого года (табл. 5).

Таблица 5

Основные метеопоказатели периода вегетации сельскохозяйственных культур за период с апреля по август (IV-VIII)

Показатель	Учхоз «Горная Поляна» Волгоградского ГАУ										
	1982 г.	1983 г.	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.	1990 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.
Сумма осадков, мм	285,0	182,0	157,0	200,0	305,0	395,0	227,0	179,0	134,0	13,05	127,0
Средняя температура воздуха, °С	17,8	19,3	19,6	17,1	18,8	18,7	17,8	18,2	21,4	19,4	20,5
ГТК	1,1	0,6	0,6	0,8	1,1	1,4	0,9	0,7	0,4	0,5	0,4
Оценка метео	БУ	УМ	НУ	УМ	БУ	БУ	УМ	УМ	НУ	НУ	НУ
Показатель	Прикаспийский НИИ аридного земледелия							Нижне-Волжский НИИСХ			
	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.
Сумма осадков, мм	278,0	149,8	142,0	103,0	162,0	161,0	115,4	185,0	139,0	147,0	138,7
Средняя температура воздуха, °С	18,0	22,4	19,7	21,1	19,3	20,6	20,6	18,4	19,8	18,8	20,3
ГТК	1,0	0,5	0,5	0,3	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5
Оценка метео	БУ	НУ	НУ	НУ	УМ	УМ	НУ	УМ	НУ	УМ	НУ

Примечание. Метеоусловия: БУ – благоприятные, УМ – умеренные, НУ – неблагоприятные.

По комплексу метеопоказателей в начальный период исследований с 1982 по 1990 гг., исключая 1984 и 1985 гг., к числу благоприятных лет можно отнести 3 года, средних – 3 года и благоприятных – 1 год. Следуя хронологии, анализ данных таблицы продолжаем с 1993 по 1999 гг. Здесь к числу благоприятных относим 1 год, средних – 2 и неблагоприятных – 4 года. За 2006-2009 гг. в учхозе «Горная Поляна» отмечались один средний год и 3 неблагоприятных, В Нижне-Волжском НИИСХ, соответственно, 2 и 2. В зависимости от складывающихся метеоусловий, формировалась бóльшая или мéньшая урожайность культур в севооборотах и общая продуктивность последних по отдельным годам.

В учхозе «Горная Поляна» в начальный период исследований, включающий девятилетний промежуток с двухлетним перерывом, отмечалась наибольшая продуктивность четырехпольного севооборота с набором традиционных для зоны культур (табл. 6).

Далее, в порядке уменьшения выхода зерна с единицы площади следовала трехполка, в состав которой входили озимая пшеница и, относительно устойчивый к неблагоприятным метеоусловиям, ячмень. Это говорит о том, что в данных короткоротационных севооборотах зерновые культуры давали стабильный и полноценный урожай за все годы. Варианты с большим количеством полей от пяти до семи формировали урожайность на уровне двухполки – от 100 до 110 т/100 га пашни. Только четвертый вариант из-за наличия малопродуктивных культур дал выход зерна меньше 100 т/100 га пашни. Резюмируя результаты исследований в полевом опыте учхоза «Горная Поляна» Волгоградского ГАУ 80-х годов прошлого столетия, констатируем, что наиболее продуктивными являлись трех- и четырехпольные варианты с набором урожайных озимых и яровых зерновых культур. Далее идут шести-, семипольные варианты со значительным представительством озимой и яровой пшеницы. Замыкает перечень пятиполка, в которой доминировали просо и яровая пшеница, размещенные по нежелательному предшественнику.

По результатам исследований, проведенных на опытном поле Прикаспийского НИИ аридного земледелия в 1993-1999 гг., установлено, что максимальный выход зерна отмечался в трехпольном севообороте с набором традиционных для зоны культур и наличием чистого пара. Четырехпольный вариант уступал ему на 4,0 т/100 га пашни. В севооборотах, где в структуре посевных площадей наличествовали сидераты, обнаружено снижение продуктивности, причем наименьшее тогда, когда после сидерального донника следовал чистый пар. В

случае размещения по сидеральнным предшественникам сорго на зерно перечень сидератов был таков: донник – горчица – горохово-овсяная смесь. Седьмой вариант, в котором выращивались многолетние травы (житняк с эспарцетом), занимал промежуточное положение среди представленных схем с сидератами, уступая севообороту с донником под сорго, но превосходя горчицу и горох с овсом. Таким образом, по выходу зерна лидировали варианты с посевами зерновых культур без сидерации и многолетних трав. В случае использования сидератов в полевых севооборотах полупустынной зоны сбор продукции уменьшался, но почвенное плодородие относительно стабилизировалось.

Талица 6

Агротехническая оценка эффективности полевых севооборотов

Номер севооборота	Номер поля севооборота							Выход зерна со 100 га, т
	1	2	3	4	5	6	7	
	чередование культур и пара							
Учхоз «Горная Поляна» Волгоградского ГАУ, 1982-1983, 1986-1990 гг.								
1	Пар чистый	Озимая пшеница	-	-	-	-	-	104,5
2			Ячмень	-	-	-	-	113,2
3			Яровая пшеница	Ячмень	-	-	-	125,5
4			Просо	Яровая пшеница	Ячмень	-	-	98,4
5			Яровая пшеница	Просо	Яровая пшеница	Ячмень	-	103,4
6			Нут	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Ячмень	-	100,9
7			Озимая пшеница	Яровая пшеница	Нут	Озимая пшеница	Ячмень	108,7
Прикаспийский НИИАЗ, 1993-1999 гг.							НСР, т	11,4
1	Пар чистый	Озимая рожь	Ячмень	-	-	-	-	92,7
2			Сорго на зерно	Ячмень	-	-	-	88,6
3			Сорго на зерно	Ячмень + донник	Донник на сидерат	-	-	80,5
4			Ячмень + донник	Донник на сидерат	Сорго на зерно	-	-	75,2
5			Ячмень	Горчица (сидерат)	Сорго на зерно	-	-	73,8
6			Ячмень	Гороховес (сидерат)	Сорго на зерно	-	-	72,4
7			Ячмень + мн. травы	Мн. травы 1 г.п.	Мн. травы 2 г.п.	Просо	-	74,1
							НСР, т	8,6

Обновленные схемы полевых севооборотов, изучаемые в учхозе «Горная Поляна» в начале текущего столетия, представлены в табл. 7.

Установлено, что наиболее продуктивным за 4 года исследований оказался двухпольный вариант: пар чистый – озимая пшеница. Более чем на 20 т/100 га пашни уступал ему второй вариант с яровой пшеницей после пара. Близкие показатели оказались у трех- и четырехполок, среди которых можно выделить третью и четвертую схему полевых севооборотов. Трехполка с нутом и четырехпольные два варианта давали близкие результаты с незначительной разницей.

На опытном поле Нижне-Волжского НИИСХ изучались в течение 4 лет полевые севообороты с элементами биологизации в виде посевов одногодичного и двухгодичного сидерального эспарцета. Сравнение названных севооборотов проводилось с первым зернопаровым с четвертым зернопаропропашным вариантами. Наиболее продуктивным оказались первый и четвертый севооборот с трехпольным насыщением зерновыми культурами. Два биологизиро-

ванных севооборота имели меньший сбор продукции, особенно вариант с двумя полями сидерального эспарцета. Тем ни менее, отметим более высокую продуктивность севооборотов НВ НИИСХ в сравнении с севооборотами в учхозе.

Таблица 7

Агротехническая оценка эффективности полевых севооборотов

Номер сево-оборота	Номер поля севооборота				Выход зерна со 100 га пашни, т
	1	2	3	4	
	чередование культур и пара				
Учхоз «Горная Поляна» Волгоградского ГАУ 2006-2009 гг.					
1	Пар чистый	Озимая пшеница	-	-	73,4
2	Пар чистый	Яровая пшеница	-	-	52,7
3	Пар чистый	Озимая пшеница	Яровая пшеница	-	48,3
4	Пар чистый	Озимая пшеница	Подсолнечник	-	47,6
5	Пар чистый	Озимая пшеница	Нут	-	46,5
6	Пар чистый	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Ячмень	46,8
7	Пар чистый	Озимая пшеница	Нут	Ячмень	45,0
					НСР, т = 5,9
Нижне-Волжский НИИСХ, 2006-2009 гг.					
1	Пар чистый	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Ячмень	67,0
2	Пар сидерат	Озимая пшеница	Эспарцет на сидерат	-	60,8
3	Пар сидерат	Озимая пшеница	Эспарцет на сидерат	Эспарцет на сидерат	54,9
4	Пар чистый	Озимая пшеница	Нут	Ячмень	64,2
					НСР, т = 4,4

Доказательством результативности и необходимости введения и освоения рациональных севооборотов служит оценка их экономической эффективности (табл. 8).

Таблица 8

Экономическая оценка полевых севооборотов

Показатель	Номер севооборота						
	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8
Учхоз «Горная Поляна», 1982-1991 гг.							
Валовой сбор зерна со 100 га пашни, т	104,5	13,2	125,5	98,4	103,7	100,9	109,4
Затраты на производство зерна, руб./га	2500,0	250,0	2115,0	2234,0	2500,0	2025,0	2980,0
Стоимость продукции с 1 га, руб.	3135,0	3113,0	3325,0	2338,0	3111,0	2522,0	3844,0
Себестоимость 1 т продукции, руб.	2392,0	1987,0	1685,0	2571,0	2410,0	2006,0	1816,0
Расчетная прибыль на 1 т, руб.	607,0	762,0	981,0	367,0	522,0	443,0	703,0
Уровень рентабельности, %	25,4	38,4	58,2	17,6	22,0	20,1	33,7
Прикаспийский НИИАЗ, 1993-1999 гг.							
Валовой сбор зерна со 100 га пашни, т	92,7	88,6	80,5	75,2	73,8	72,4	74,1
Затраты на производство зерна, руб./га	2100,0	2100,0	2050,0	2200,0	2160,0	2120,0	2170,0
Стоимость продукции с 1 га, руб.	3451,0	1905,0	1944,0	3220,0	3160,0	3100,0	3170,0
Себестоимость 1 т продукции, руб.	2270,0	2370,0	2373,0	2472,0	2426,0	2380,0	2436,0
Расчетная прибыль на 1 т, руб.	380,0	–237,0	–246,0	–468,0	–486,0	–490,0	–478,0
Уровень рентабельности, %	+16,7	–10,0	–11,5	–19,3	–22,5	–23,1	–22,0

Продолжение табл. 8

1	2	3	4	5	6	7	8
Учхоз «Горная Поляна», 2006-2009 гг.							
Валовой сбор зерна со 100 га пашни, т	73,4	52,7	48,3	47,6	46,5	46,8	45,0
Затраты на производство зерна, руб./га	3615,0	3150,0	3150,0	3945,0	3762,0	4381,0	4035,0
Себестоимость 1 т продукции, руб.	6952,0	4500,0	4500,0	4700,0	4893,0	5050,0	4977,0
Расчетная прибыль на 1 т, руб.	1585,0	1350,0	1350,0	1055,0	1011,0	1107,0	1000,0
Уровень рентабельности, %	26,4	22,8	19,3	13,6	10,0	8,8	8,1

По результатам расчета основных экономических показателей, проведенного при оценке севооборотов в учхозе «Горная Поляна» за 1982-1991 гг, установлено, что наиболее результативным оказался четырехпольный вариант с набором традиционных зерновых культур. Здесь отмечались наименьшие затраты, достаточно высокая стоимость производства зерна, минимальная себестоимость, более высокие показатели прибыли и уровня рентабельности. Далее в порядке снижения двух последних показателей следовала такая тройка вариантов: второй трехпольный – седьмой семипольный – первый двухпольный.

В Прикаспийском НИИ аридного земледелия также была проведена экономическая оценка полевых севооборотов, включая варианты с использованием сидератов и многолетних трав. Было установлено, что из семи вариантов севооборотов только один оказался прибыльным и рентабельным. Это трехпольный первый вариант пар чистый – озимая рожь – ячмень. Все другие варианты оказались экономически убыточными с отрицательным уровнем рентабельности. Причем, севообороты с донником, однолетними сидератами и многолетними травами были наиболее экономически невыгодными, уровень рентабельности составил от -19 до -23 %. В промежутке расположились четырехпольные варианты с донником под пар и под зерновое сорго. Они также оказались убыточными.

Четырехлетние исследования по севооборотам, проведенные в 2006-09 гг., подтвердили положение о наибольшей экономической эффективности короткоротационных вариантов с набором урожайных зерновых культур, По мере увеличения количества полей в севооборотах происходило увеличение расчетной прибыли и уровня рентабельности. Последние три варианта севооборотов имели рентабельность в пределах 8-10 %.

Экономическая оценка обычных и биологизированных севооборотов, проведенная по результатам исследований в Нижне-Волжском НИИСХ, еще раз доказала, что увеличение количества полей, на которых произрастают культуры, дающие ежегодно готовую продукцию, обеспечивали помимо наибольшей продуктивности и более высокие показатели прибыли и рентабельности (табл. 9).

Таблица 9

Экономическая оценка полевых севооборотов (Нижне-Волжский НИИСХ, 2006-2009 гг.)

Показатель	Номер севооборота			
	1	2	3	4
Валовой сбор зерна со 100 га пашни, т	67,0	60,8	54,9	64,2
Затраты на производство зерна, руб./га	2431,0	2200,0	2230,0	2600,0
Стоимость продукции с 1 га, руб.	3200,0	2350,0	2550,0	3300,0
Себестоимость 1 т продукции, руб.	5000,0	5333,0	6220,0	5238,0
Расчетная прибыль на 1 т, руб.	769,0	550,0	320,0	699,0
Уровень рентабельности, %	37,8	20,5	14,3	26,9

Так, зернопаровой и зернопаропропашной севообороты (вариант 1 и 4) имели расчетную прибыль от 700 до 770 руб. за 1 т продукцию и уровень рентабельности 27 и 38 %.

Поскольку наши исследования проводились достаточно давно, все расчеты по оценке экономической эффективности проводились в ценах тех лет исследований. В настоящий момент изменились экономические показатели соответственно с новыми ценами на продукцию,

общими производственными затратами и прочее. Однако существующие закономерности в оценке изученных вариантов севооборотов, их адаптация к сегодняшнему моменту сохранилась, что позволяет интерполировать приводимые положения и выводы.

Наряду с экономической важное значение имеет энергетическая оценка различных звеньев системы земледелия, в т. ч. и построения правильных севооборотов (табл. 10).

Таблица 10

Энергетическая оценка полевых севооборотов

Показатель	Номер севооборота						
	1	2	3	4	5	6	7
Учхоз «Горная Поляна», 1982-1991 гг.							
Продуктивность севооборота, т/100 га пашни	104,5	113,2	125,5	98,4	103,7	100,9	109,4
Энергия в урожае, МДж/100 га пашни	1719213	2008093	2284729	1618317	1705482	1414470	1814004
Затраты совокупной энергии, мДж/100 га пашни	1550060	1718577	1887094	2466297	2599136	2321230	2357692
Энергоемкость 1 т зерна, мДж	14833	14957	15037	28783	25064	27079	21591
Приращение валовой энергии, мДж/100 га пашни	169153	289516	397635	–847980	–893654	–966760	–543688
КЭЭ (коэффициент энергетической эффективности)	1,11	1,17	1,21	0,60	0,66	0,51	0,77
Прикаспийский НИИАЗ, 1993-1999 гг.							
Продуктивность севооборота, т на 100 га пашни	92,7	88,6	80,5	75,2	73,8	72,4	74,1
Энергия в урожае, МДж/100 га пашни	1536111	1486940	1446708	1444708	1404364	1372759	1426742
Затраты совокупной энергии, мДж/100 га пашни	1554195	1625329	1854465	1821230	1770371	1725050	1805243
Энергоемкость 1 т зерна, мДж	16802	16802	17861	29831	21079	26179	20785
Приращение валовой энергии, мДж/100 га пашни	–18084	–138380	–407758	-406760	–366007	–47709	–379501
КЭЭ (коэффициент энергетической эффективности)	0,99	0,91	0,78	0,77	0,73	0,70	0,75
Учхоз «Горная Поляна», 2006-2009 гг.							
Продуктивность севооборота, т на 100 га пашни	73,4	52,7	48,3	47,6	46,5	46,8	45,0
Энергия в урожае, МДж/100 га пашни	1212282	962798	881361	833000	784502	790059	731439
Затраты совокупной энергии, мДж/100 га пашни	1025050	1054195	826593	1482210	1521230	1564280	1535890
Энергоемкость 1 т зерна, мДж	14042	19522	15896	30715	31660	31552	32679
Приращение валовой энергии, мДж/100 га пашни	187232	–91397	54986	–549410	–679778	–625171	–704451
КЭЭ (коэффициент энергетической эффективности)	1,18	0,91	1,05	0,60	0,54	0,56	0,50

Нижне-Волжский НИИСХ, 2006-2009 гг.				
Показатель	Номер севооборота			
	1	2	3	4
Продуктивность севооборота, т/га	1,79	1,54	1,41	1,65
Энергия в урожае, МДж/га	12,07	12,05	11,45	11,56
Затраты совокупной энергии, мДж/га	9,50	10,30	11,50	10,80
Энергоемкость 1 кг зерна, мДж	15,80	15,30	28,60	17,10
Приращение валовой энергии, мДж/га	2,57	1,75	0	0,76
КЭЭ (коэф. энергет. эффективности)	1,27	1,17	1,00	1,07

Приводимые данные по схемам севооборотов считаются энергетически эффективными, если коэффициент энергетической эффективности (КЭЭ) имеет значение больше 1. Первые три варианта, приводимые в таблице по учхозу «Горная Поляна» за 1982-1991 гг. имели величину, превышающую 1. Это двух-, четырехпольные севообороты. Здесь преобладал третий вариант с чистым паром и тремя зерновыми культурами, КЭЭ равнялся 1,21. Далее в порядке уменьшения располагались трех- и двухполки, имея величину 1,17 и 1,11 соответственно. Затем шли семипольный севооборот (0,77), замыкали перечень два шестипольных (0,66 и 0,51) и один пятипольный (0,66) с коэффициентом менее 1.

Все севообороты, изученные в Прикаспийском НИИ аридного земледелия, оказались энергетически неэффективными. Только первый и второй варианты имели КЭЭ близкий к 1, остальные значительно отставали, находясь в пределах 0,7-0,8.

Первый и третий севообороты на опытном поле учхоза «Горная Поляна» в период 2006-2009 гг. были энергетически результативны (1,18 и 1,05), второй отставал незначительно (0,91), остальные уступали существенно (от 0,5 до 0,6).

Энергетическая оценка полевых, в т. ч. биологизированных севооборотов, обусловила положительную тенденцию изменения величины КЭЭ. Причем наибольшее значение отмечалась по зернопаровому севообороту (1,27), наименьшее с двумя полями эспарцета на сидерат (1,0). Очередной раз приемы биологизации не принесли ожидаемого результата.

Обсуждение. Структура посевных площадей, построение схем севооборотов, их специализация, освоение и внедрение зависит от ряда факторов, которые ученые и практики сельскохозяйственного производства должны и обязаны учитывать. Среди прочих, должно учитываться влияние агроклиматических показателей отдельных лет, оказывающих непосредственное влияние на продуктивность севооборотов (Беляков, Назарова, 2020; Гулянов, 2022). Севооборот является важным звеном современных адаптивно-ландшафтных систем земледелия, при этом данное понятие не строго определенная и застывшая догма, а постоянно совершенствующейся, развивающейся механизм воздействия на агробиоценоз (Кирюшин, 2021).

Следует сказать, что в последние годы ставку в севооборотах делают на схемы с небольшим количеством и малой площадью полей, поскольку они снижают затраты, унифицируют возможные агромероприятия, стимулируют расширение посевов с наиболее важными и урожайными и дорогостоящими культурами (Милащенко и др., 2018).

Повышенное внимание в современных севооборотах уделяется внедрению и освоению новых, перспективных технологий, эффективным мерам по поддержанию и повышению почвенного плодородия, в первую очередь, за счет биологизации и экологизации севооборотов, ограничения использования или рационального применения минеральных удобрений и пестицидов (Лошаков, 2012; Васильева, 2018; Воронов, Зеленев, 2024).

Современные севообороты должны строиться и адаптироваться с учетом почвенно-климатических условий, специализации сельхозпредприятий, их экономическими особенностями и возможностями, оптимизацией энергетической и экологической оценки (Ерошенко и др., 2018; Бутько и др., 2020).

Заключение. В статье даны рекомендации и предложения по выбору, введению и освоению наиболее эффективных полевых севооборотов в сухостепной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья, отвечающих современным требованиям отечественного сельскохозяйственного производства в рамках крупных, средних и мелких хозяйств. Здесь приведены результаты многолетних исследований авторов, опираясь на которые, можно констатировать очевидные преимущества тех или иных схем севооборотов с набором наиболее ценных и экономически выгодных культур, что позволит увеличить производство сельскохозяйственной продукции при наименьших затратах труда и средств.

Лучшими севооборотами в сухостепной и полупустынной зонах Волгоградской и Астраханской обл. являются трех-, четырехпольные зернопаровые и зернопаропропашные севообороты с набором традиционных зерновых культур и возможным размещением в них сидератов с целью стабилизации плодородия почвы. Преимущество таких севооборотов над вариантами с меньшей и большей ротацией составляло в среднем порядка 5-10 т на 100 га пашни. Рентабельность таких севооборотов в 1,5-2 раза больше. Коэффициент энергетической эффективности близко или превышал 1. Основной акцент при построении опытных севооборотов и определении

структуры посевных площадей уделялся таким важным и экономически доходным сельскохозяйственным культурам как озимая и яровая пшеница, озимая рожь, ячмень, просо, нут, горчица, подсолнечник. Авторы предлагают собственный вариант возможного размещения подсолнечника в короткоротационных севооборотах в засушливых условиях.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Беленков А. И. Севообороты и обработка почвы Юго-Востока европейской части России: монография. LAPLAMBERT Academic Publishing. 2014. 258 [Belenkov A. I. Crop rotations and soil cultivation in the South-East of the European part of Russia: monograph. LAPLAMBERT Academic Publishing. 2014. 258].

2. Беленков А. И., Зеленев А. В., Мазиров М. А. История агрономии (земледелия). М., 2016. 238 [Belenkov A. I., Zelenev A. V., Mazirov M. A. History of agronomy (farming). Moscow, 2016. 238].

3. Беляков А. М., Назарова М. В. Анализ погоды в Волгоградской области за длительный период времени и урожай зерновых культур. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2020;59(3):71-79 [Belyakov A. M., Nazarova M. V. Weather analysis in the Volgograd region over a long period of time and the yield of grain crops. *News of the Lower Volga Agrarian University Complex*. 2020;59(3):71-79].

4. Бутько А. А., Пашинский В. А., Родькин О. И. Оценка биоэнергетической эффективности возделывания сортов озимой пшеницы в условиях среднего Поволжья. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2020;163(10):83-87 [Butko A. A., Pashinsky V. A., Rodkin O. I. Evaluation of bioenergetic efficiency of winter wheat cultivating varieties in the Middle Volga region. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2020;163(10):83-87].

5. Васильева М. С. Приемы повышения продуктивности полевого севооборота на черноземе типичном. *Плодородие*. 2018; 103 (4): 46-48 [Vasilyeva M. S. Methods for increasing the productivity of field crop rotation on typical chernozem. *Fertility*. 2018;103 (4):46-48].

6. Воронов С. И., Зеленев А. В. Современные технологии адаптивно-ландшафтного земледелия в реализации генетического потенциала зерновых и зернобобовых культур. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024;73(1):22-31 [Voronov S. I., Zelenev A. V. Modern technologies of adaptive landscape farming in realizing the genetic potential of grain and leguminous crops. *News of the Lower Volga Agrarian University Complex*. 2024;73(1):22-31].

7. Гаврилов А. М. Научные основы сохранения и воспроизводства плодородия почвы в агроландшафтах Нижнего Поволжья: монография. ВГСХА. Волгоград. 1997. 183 [Gavrilov A. M. Scientific foundations of conservation and reproduction of soil fertility in agricultural landscapes of the Lower Volga region: monograph. VSHA. Volgograd. 1997. 183].

8. Гулянов Ю. А. Адаптация агротехнологий к изменяющемуся климату в зоне черноземов южных Волгоградского Прихоперья. *Вопросы степеведения*. 2022; 2: 47-59 [Gulyanov Yu. A. Adaptation of agricultural technologies to a changing climate in the southern chernozem zone of the Volgograd Khoperye region. *Issues of Steppe Science.* 2022;2:47-59].

9. Ерошенко Ф. В., Шестакова Е. О., Оганян Л. Р., Сторчак И. Г. Экономическая эффективность возделывания новых сортов озимой пшеницы селекции Северо-Кавказского ФНАЦ. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;9:114-117 [Eroshenko F. V., Shestakova E. O., Oganyan L. R., Storchak I. G. Economic efficiency of cultivating new varieties of winter wheat bred by the North Caucasus Federal Scientific Center. *Achievements of science and technology in the agro-industrial complex.* 2018;9:114-117].

10. Зеленев А. В., Семинченко Е. В. Биологизированные севообороты – основа органического земледелия Волгоградской области: рекомендации. Волгоград: ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2019. 52 [Zelenev A. V., Seminchenko E. V. Biologized crop rotations – the basis of organic farming in the Volgograd region: recommendations. Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences. 2019. 52].

11. Каипов Я. З., Султангазин З. Р. Влияние биологизированных севооборотов на агрохимические свойства почвы и зерновую продуктивность пашни в засушливой степи // *Агро-*

химический вестник. 2022;5:35-39 [Kaipov Ya. Z., Sultangazin Z. R. The influence of biologized crop rotations on the agrochemical properties of soil and grain productivity of arable land in arid steppe // *Agrochemical Bulletin*. 2022;5:35-39.

12. Кирюшин В. И. Состояние и проблемы развития адаптивно – ландшафтного земледелия. *Земледелие*. 2021;2:3-7 [Kiryushin V. I. Status and problems of development of adaptive landscape agriculture. *Agriculture.* 2021;2:3-7].

13. Лошаков В.Г. Севооборот и плодородие почвы. М.: Изд-во ВНИИА, 2012. 245 [Loshakov V. G. Crop rotation and soil fertility. M.: VNIIA Publishing House, 2012. 245].

14. Милащенко Н. З., Самойлов Л. Н., Трушкин С. В. Проблемы интенсификации производства зерна пшеницы и их решение. Плодородие. 2018;101(2):21-25 [Milashchenko N. Z., Samoilov L. N., Trushkin S. V. Problems of intensification of wheat grain production and their solution. *Fertility*. 2018;101(2):21-25].

15. Сухов А.Н., Имангалиев К.А., Имангалиева А.К. Агроэкономические основы полевых севооборотов и обработки почвы в адаптивно-ландшафтном земледелии сухостепной и полупустынной зон Нижнего Поволжья: монография. Волгоград: ФГОУ ВПО Волгоградская ГСХА. 2011. 192 [Sukhov A. N., Imangaliev K. A., Imangalieva A. K. Agroeconomic foundations of field crop rotations and soil cultivation in adaptive-landscape agriculture of the dry-steppe and semi-desert zones of the Lower Volga region: monograph. Volgograd: Volgograd State Agricultural Academy. 2011. 192].

16. Шульмейстер К. Г. Избр. Труды. Волгоград: Комитет по печати. 1995. В 2-х т.: т. 1. – 456; т. 2. – 480 [Shulmeister K. G. Selected Works. Volgograd: Printing Committee. 1995. In 2 volumes: v. 1. – 456; v. 2. – 480]

Информация об авторах

Беленков Алексей Иванович, доктор с.-х. наук, профессор, консультант селекционного центра по кормовым культурам, ФГБНУ «Федеральный научный центр по кормопроизводству и агроэкологии имени В.Р. Вильямса», 141055 Московская обл., г. Лобня-5, ул. Научный городок, корпус 1, e-mail: belenokaleksis@mail.ru, ORCID 0000-0003-0422-4936.

Тибирьков Александр Павлович, доктор с.-х. наук, профессор кафедры почвоведения и общей биологии, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», 400002 г. Волгоград, Университетский проспект, дом 26, e-mail: a.tibirkov@mail.ru, ORCID 0009-0002-5551-4917.

Холод Анатолий Александрович, кандидат с.-х. наук, доцент кафедры земледелия и агрохимии, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», 400002 г. Волгоград, Университетский проспект, дом 26, e-mail: olodok2009@rambler.ru, ORCID 0000-0002-7463-3383.

Information about the authors

Belenkov Aleksey Ivanovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Consultant of the Forage Crops Breeding Center, Federal State Budgetary Scientific Institution "V.R. Williams Federal Scientific Center for Forage Production and Agroecology", 141055, Moscow Region, Lobnya-5, Nauchny Gorodok St., Building 1, e-mail: belenokaleksis@mail.ru, ORCID 0000-0003-0422-4936.

Tibirikov Aleksandr Pavlovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Department of Soil Science and General Biology, 400002, Volgograd, Volgograd, State Agrarian University, Universitetsky Avenue 26, e-mail: a.tibirkov@mail.ru, ORCID 0009-0002-5551-4917.

Kholod Anatoly Aleksandrovich, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Agriculture and Agrochemistry, Volgograd State Agrarian University, Universitetsky Avenue 26, Volgograd, 400002, e-mail: olodok2009@rambler.ru, ORCID 0000-0002-7463-3383.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Author of this research paper have directly participated in the planning, executionandanalysisofthisstudy. Authors of this paperhave read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 631.671 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.004.40-47

Анализ перспектив и рисков развития мелиоративного комплекса Северного Кавказа с учетом агроклиматического потенциала региона

Ольгаренко Г. В.✉
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельскохозяйственного водоснабжения «Радуга», г.о. Коломна, Московская область, Россия

Аннотация. Актуальность исследований определяется нарастающим дефицитом водных ресурсов и необходимостью рационального использования водно-земельного потенциала региона на основе инновационного развития мелиоративного комплекса, так как основные площади сельскохозяйственных угодий располагаются в засушливых природно-климатических зонах, в которых только развитие гидромелиорации может обеспечить получение высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур за счет экологически сбалансированных агромелиоративных технологий и информационных технологий нормирования орошения и водопользования. Обоснование и разработка методических подходов к инновационной стратегии развития мелиорации на основе комплексной реконструкции инженерно-технических объектов, рационализации процессов эксплуатации и водопользования на мелиоративно-водохозяйственных объектах с одновременной реализацией комплекса агромелиоративных, агро-, лесо- и фитомелиоративных мероприятий на фоне интенсивных агротехнологий. Целью исследование стало повышение эколого-экономической эффективности использования водных и земельных ресурсов на основе комплексной модернизации гидромелиоративной инфраструктуры, интегрированной системы агролесомелиоративных мероприятий в орошаемых агроландшафтах. Разработана Стратегия устойчивого развития мелиоративного комплекса Северного Кавказа, включающая инновационную модернизацию мелиоративной инженерной инфраструктуры, направленную на повышение уровня водообеспеченности сельскохозяйственных угодий на площади не менее 980 тыс. га, повышение до 0,8-0,9 коэффициента полезного действия гидромелиоративных систем, а также комплекс агролесомелиоративных мероприятий, направленный на сохранение и расширенное воспроизводство плодородия почв на площади не менее 980 тыс. га, обеспечивающий повышение урожайности агробиоценозов с 60 до 80 % от климатически обеспеченной урожайности и эколого-экономической эффективности использования водных и земельных ресурсов региона с учетом возможных природно-технических рисков.

Ключевые слова. Гидрометеорологические факторы; технологии полива; информационные технологии; продуктивность агробиоценозов; агроэкологическое состояние; водные и земельные ресурсы; мелиоративный комплекс; орошение; гидромелиоративные системы; планирование и управление водопользованием.

Цитирование. Ольгаренко Г. В. Анализ перспектив и рисков развития мелиоративного комплекса Северного Кавказа, с учетом агроклиматического потенциала региона // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):40-47. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.004.40-47.

Поступила в редакцию: 11.11.2025 Принята к печати: 05.12.2025

UDC 631.671 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.004.40-47

Analysis of the prospects and risks for the development of the reclamation sector of the North Caucasus, taking into account the agro-climatic potential of the region

Olgarenko G. V.✉

✉ – Corresponding author / Для контактов.

Federal state budgetary scientific institution "All-Russian Scientific Research Institute for Irrigation and Farming Water Supply Systems "Raduga", Kolomna, Russia

Abstract. The relevance of the study is determined by the growing deficit of water resources and the need for the rational use of the region's water and land potential through the innovative development of the land reclamation sector. Most agricultural lands in the region are located in arid natural and climatic zones, where only the advancement of hydromelioration can ensure high and stable crop yields through ecologically balanced agro-reclamation technologies and modern information systems for irrigation scheduling and water-use management. The study substantiates and develops methodological approaches to an innovative strategy for melioration, based on the comprehensive modernization of engineering facilities, optimization of operational processes and water use at reclamation sites, and the simultaneous implementation of a system of agro-, forest- and phytomeliorative measures against the background of intensive agricultural technologies. The aim of the research was to increase the environmental and economic efficiency of water and land resource use through the integrated modernization of hydromelioration infrastructure and the implementation of an integrated agroforestry reclamation system in irrigated agrolandscapes. A Strategy for the Sustainable Development of the Land Reclamation Sector of the North Caucasus has been developed. It includes: innovative modernization of reclamation engineering infrastructure aimed at increasing water availability for agricultural lands over an area of at least 980 thousand hectares and improving the efficiency coefficient of hydromelioration systems to 0.8-0.9; a system of agroforestry reclamation measures aimed at preserving and enhancing soil fertility on at least 980 thousand hectares, ensuring an increase in crop productivity of agrobiocenoses from 60 to 80 % of the climatologically attainable yield, as well as improving the environmental and economic efficiency of water and land resource use in the region, taking into account potential natural and technical risks.

Keywords. Hydrometeorological factors; irrigation technologies; information technologies; agrobiocenosis productivity; agroecological state; water and land resources; reclamation sector; irrigation; hydromelioration systems; water-use planning and management.

For citation. Olgarenko G. V. Analysis of the prospects and risks for the development of the reclamation sector of the North Caucasus, taking into account the agro-climatic potential of the region // Agronomy Journal. 2025;4(131):40-47. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.004.40-47.

Received: 11.11.2025 Accepted: 05.12.2025

Введение. В Стратегической рамочной программе ФАО рассматриваются проблемы рационального использования водных и земельных ресурсов и представлена концепция устойчивого управления мировыми наземными и водными экосистемами, обеспечивающая улучшение производства, качества питания, состояния окружающей среды и качества жизни населения (ФАО, 2021; Technical…, 2015).

Российская Федерация обладает высококачественным фондом сельскохозяйственных угодий, так как более 40 % мировых черноземных почв приходятся на Россию, но расположены они в природно-климатической зоне недостаточного увлажнения. Природно-климатические условия и агропроизводственный потенциал Северного Кавказа определяют исторически сложившийся высокий уровень развития сельского хозяйства и орошаемого земледелия, так как основные площади сельскохозяйственных угодий располагаются в сильно и слабо засушливых природно-климатических зонах, в которых только развитие гидромелиорации может обеспечить получение высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

Эколого-технологические риски орошаеммого земледелия связаны с недостаточным техническим уровнем гидромелиоративных систем, деградацией и снижением плодородия почв части сельскохозяйственных угодий мелиоративного фонда, аридизацией климата и развивающимся дефицитом водных ресурсов (Дубенок, Ольгаренко, 2021; Постановление Правительства…, 2021; Указ Президента…, 2020).

В связи с вышесказанными, **целью исследования стало** обоснование и разработка Стратегии устойчивого развития мелиоративного комплекса, обеспечивающую эколого-

экономически сбалансированное использования водных и земельных ресурсов на основе комплексной модернизации гидромелиоративной инфраструктуры, интегрированной системы агролесомелиоративных мероприятий и управления водопользованием в орошаемых агроландшафтах Северного Кавказа.

Материалы и методы. Анализ и оценка эффективности использования интегральных ресурсов в мелиоративном комплексе Северо-Кавказского федерального округа проводилась с учетом технического состояния и технико-эксплуатационных параметров оросительной инженерной инфраструктуры и качества экологических состояния почв агробиоценозов (Дубенок и др., 2023; Краснощеков и др., 2016).

При проведении научных исследований использовались стандартные методические подходы, изучались научно-методические и нормативно-технические документы, применялись методы анализа технического уровня и технико-эксплуатационных параметров мелиоративных объектов и экологического состояния мелиорированных земель.

Для анализа результатов производственной деятельности и развития мелиоративного комплекса Северного Кавказа использовались унифицированные методы статистической обработки многолетних данных и методики интегральной оценки технико-экономических показателей гидромелиоративных систем и экологического состояния орошаемых земель Северного Кавказа, размещенных в базах данных на информационном портале ФГБНУ ВНИИ «Радуга (Информационный портал…, 2020; Свидетельство о государственной регистрации …, 2023).

Результаты и их обсуждение. Агропромышленный комплекс является важнейшим сектором экономики Северо-Кавказского федерального округа и вносит весомый вклад в продовольственную безопасность всей страны. На сельское, лесное хозяйство, охоту, рыболовство приходится до 14,1 % валового регионального продукта и занято более 25,0% трудоспособного населения Северного Кавказа (Агропромышленный…, 2021; Ольгаренко и др., 2020; Распоряжение Правительства…, 2022).

В 2023 г. сельское хозяйство региона произвело 8,7 % всей сельскохозяйственной продукции и 2,7 %а объема пищевых продуктов России, в т. ч. более 8,9 % валового сбора зерновых и зернобобовых культур и 16,4 % овощных культур, при площади сельскохозяйственных угодий 11,3 млн гга (или 5,8 %) и площади мелиоративного фонда около 1,0 млн га, что составляет около 10,0 % от всей площади мелиорированных земель России.

Производственно-технические условия и экологическое состояние мелиоративного комплекса, и уровень развития орошаемого земледелия Северного Кавказа практически полностью соотвествуют процессам и тенденциям, характерным для мелиоративно-водохозяйственного сектора Российской Федерации. В сельскохозяйственном обороте задействовано около 143,0 тыс. га числящихся оршаемыми сельскохозяйственных угодий, что составляет до 15,0 % от общего орошаемого фонда, а фактически не использовались как поливные около 537,5 тыс. га или 52,5 % от фонда орошаемых земель. Основная причина нереализации потенциала орошаемых земель – это плохое техническое состояние и ненадежность гидромелиоративных сетей с подкомандной площадью, составляющей 215,5 тыс. га (37,6 %) (Мелиоративный..., 2020; Распоряжение Правительства…, 2022).

Результаты аналитических и статистических исследований имеющихся исходных данных, позволяют классифицировать техническое состояние гидромелиоративной инфраструктуры по степени физического износа как не удовлетворительное, значительная часть гидротехнических сооружений и линейных объектов гидромелиоративных систем морально и физически изношены.

Так, из всех межхозяйственных оросительных систем, находящихся в федеральной собственности в количестве 111 мелиоративно-водохозяйственных объектов, в плохом техническом состоянии находятся более 60 % оросительного фонда (67 оросительных систем), которые имеют степень физического износа более 80 % и находятся в неработоспособном состоянии (рис. 1).

В соответствии с нормативными методами агроэкологической оценки мелиорированных земель в хорошем экологическом состоянии находятся 39,4 % орошаемых земель, 27,9 % имеют нормальное состояние и 32,7 % неудовлетворительное, (рис. 2) (Дубенок и др, 2023; Свидетельство о государственной регистрации …, 2023).

В ходе проведения исследований установлен ряд рисков технологического характера, снижающий эффективнность использования агроколиматических и производственных ресурсов. В структуре орошаемых площадей по технологиям и технике полива основную часть составляют технологии поверхностного орошения по бороздам, на долю которых приходится более 75,0 % от

всей площади фактически поливаемых орошаемых земель. На площади земель, поливаемых дождевальными системами, приходится не более 12,0 % (58,0 тыс. га), которые в основном локализированы в Ставропольском крае.

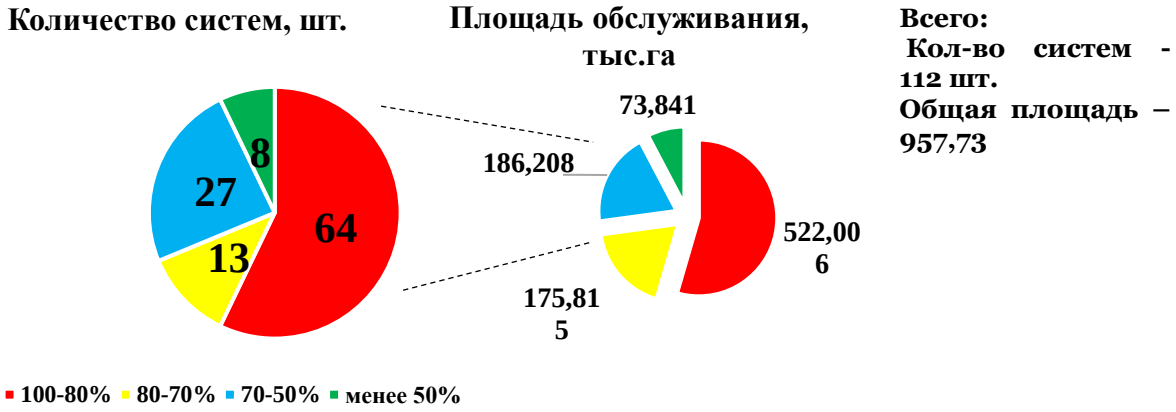


Рис. 1. Техническое состояние инженерно-технической мелиоративной инфраструктуры

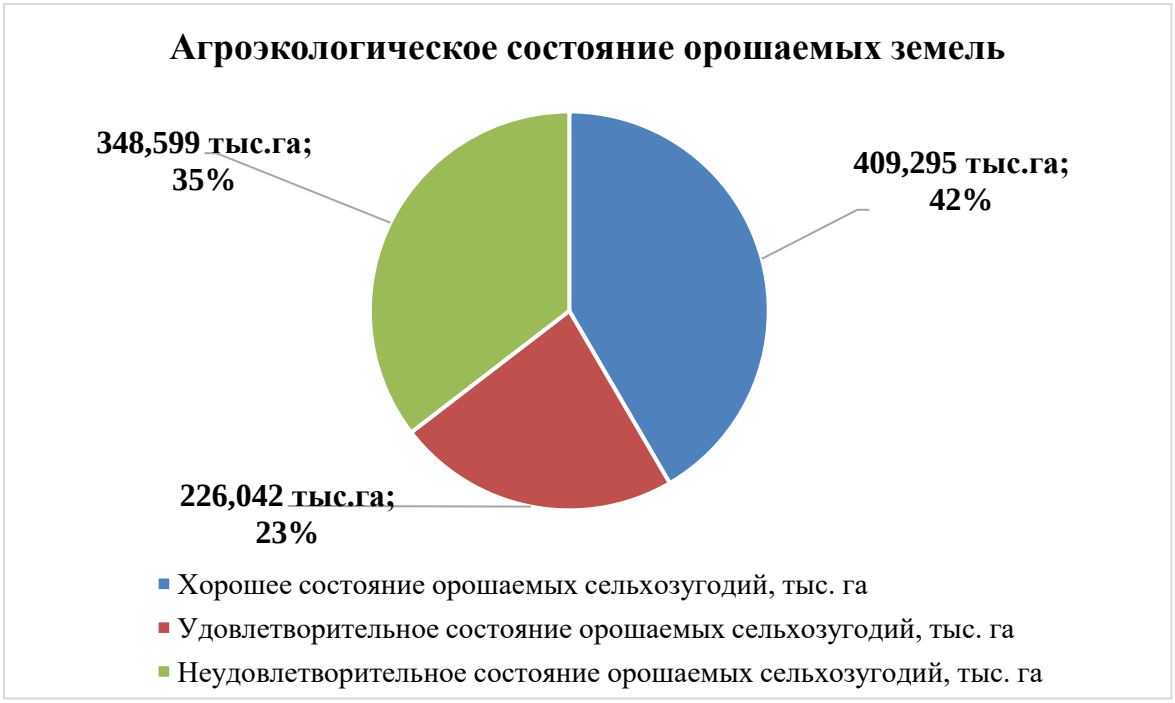


Рис. 2. Агроэкологическое состояние орошаемых земель СКФО

На экологически безопасные и ресурсосберегающие технологии дождевания и системы микроорошения приходится менее 15 %, в т. ч.: дождевальные системы – 56 тыс. га, системы капельного орошения – 5 тыс. га.

Устойчивое развитие мелиоративного комплекса может быть обеспечено только на основе Государственного регулирования и рациональных механизмов государственно-частного партнерства, что подтверждается результатами реализации мер государственной поддержки мелиоративного комплекса, начиная с 2000 г. и по настоящее время. Здесь необходимо отметить выский положительный эффект мероприятий Федеральной целевой программы развития мелиорации в период 2014-2020 гг., и Государственной программы развития мелиоративного комплекса Российской Федерации, действующей с 2022 г., в рамках которых осуществлялись модернизация государственной мелиоративной инфраструктуры, государственная поддержка сельскохозяйственных предприятий, использующих мелиорированные земли за счет предоставления субсидий на гидромелиорацию, агролесомелиорацию, агротехнические и агрохимические мелиорации (Дубенок, Ольгаренко, 2021; Мелиоративный..., 2020).

Рис. 3. Агроэкологическое состояние орошаемых земель: основные причины и негативные факторы (тыс. га)

Действительно, если в период 1990-2013 гг. происходило уменьшение площади мелиорированных земель, ухудшение технико-эксплуатационных и экологических характеристик мелиоративного фонда как в России, так и на Северном Кавказе, то в период 2014-2024 гг. площади мелиорированных земель стабилизировались, увеличилась доля мелиорированных земель, задействованных в сельскохозяйственном производстве, замедлилось старение мелиоративного фонда, снизился износ насосно-силового оборудования и машинно-технологического парка на 20 %.

Однако действующие программы государственной поддержки обеспечивают не более 25 % от требуемого уровня модернизации мелиоративного фонда, а самое главное отсутствует комплексный подход к развитию мелиорации и концентрация ресурсов на наиболее перспективных направлениях реализации мелиоративных мероприятий, обеспечивающих эколого-экономически сбалансированное воздействие на агроландшафты.

На вводимых в оборот сельскохозяйственных угодьях не проводится в едином цикле взаимоувязанная система гидромелиоративных и комплексных мелиораций, а используются отельные виды мелиоративных мероприятий.

В целях устойчивого развития региона разработана Стратегия социально-экономического развития Северного Кавказа, включающая блок приоритетных направлений развития системы мелиорации, которыми являются инвентаризация и оценка технического и правового состояния мелиоративного фонда на территории СКФО, разработка территориальной схемы развития и модернизации межрегиональной, межхозяйственной и внутрихозяйственной инфраструктуры мелиоративного комплекса, межрегиональное интегрированное управление водопользованием в условиях дефицита водных ресурсов. формирование реестра защитных лесных насаждений (Распоряжение Правительства…, 2022).

Актуальной научной задачей является технико-экономическое и экологическое обоснование инновационного развития мелиоративной инфраструктуры Северного Кавказа, базирующееся на методическом подходе, который предполагает задействование в сельскохозяйственном производстве не менее 90 % орошаемых земель от имеющихся в наличии, на основе модернизации гидромелиоративных систем при существующем водно-ресурсном обеспечении, изменении структуры техники орошения в направлении водосбережения за счет увеличения доли технологий орошения дождеванием и капельного орошения, при снижении площадей поверхностного полива.

Высокий синергетический социально-экономический и экологический эффект мелиорации достигается только за счет комплексного подхода, когда одновременно с гидромелиорацией обеспечивается концентрированное проведение мелиоративных мероприятий, включающих агротехнические, агрохимические, культуртехнические и агролесотехнологические мелиорации, направленные на восстановление и повышение плодородия почв до оптимальных значений в каждой природной зоне региона.

Реализации стратегии инновационного развития орошаемого земледелия обеспечивает коренное улучшение ситуации в мелиоративном комплексе региона за счет использования в сельскохозяйственном производстве не менее 90 % орошаемых земель от имеющихся в наличии на основе модернизации и реконструкции гидромелиоративных систем, развития комплексных мелиораций, увеличения доли технологий орошения дождеванием и капельным орошением при снижении площадей поверхностного полива (Дубенок и др., 2023; Мелиоративный..., 2020).

Для обеспечения инновационного и эколого-экономически сбалансированного развития мелиоративного комплекса требуется осуществить ряд взаимосвязанных капитальных инженерно-технических и строительно-монтажных мелиоративных мероприятий, в том числе:

- повышение уровня функциональной надежности оросительных систем и водообеспеченности сельскохозяйственных угодий на площади не менее 980 тыс. га на основе инновационной модернизации капитальных объектов мелиоративного фонда, в т. ч. капитального ремонта защитных противопаводковых сооружений обеспечивающих защиту сельскохозяйственных земель на площади до 150 тыс. га, и увеличения пропускной способности магистральной и межхозяйственной транспортирующей сети;

- сохранение и расширенное воспроизводство плодородия почв на площади не менее 980 тыс. га, соответственно на площади 820 и 160 тыс. га;

- развитие системы сельскохозяйственного водосноабжения в части обводнения пастбищ и сенокосов на площади не менне 1000 тыс. га;

- развитие материально-технической и кадровой базы мелиоативно-водохозяйственных строительных и эксплуататционных организаций, создание проектно-изыскательских организаций в области агроландшафтных систем мелиоативного земледелия.

При развитии мелиорации в СКФО по инновационному варианту получается, что площади орошаемых агробиоценозов составят около 870 тыс. га при повышении до 0,8-0,9 коэффициента полезного действия межхозяйственной и внутрихозяйственной оросительной сети и снижению оросительных норм на 10-20 % в зависимости от вида сельскохозяйственной культуры обеспечится рост урожайности сельскохозяйственных культур с 60 до 80 % от климатически обеспеченной урожайности.

Затраты на интегрированную систему инженерно-технических, строительно-монтажных и агроэкологических мероприятий могут составить около 83 млрд. рублей, в т. ч. на:

- капитальные объекты с мелиоративного комплекса, обеспечивающего регулирование водного режима сельскохозяйственных угодий на площади около 870 тыс. га, в сумме около 51 млрд. рублей;

- комплексные мелиоративные мероприятия, обеспечивающие сохранение и расширенное воспроизводство почвенного плодородия сельскохозяйственных угодий на площади не менее 530 тыс. га, соотвтетственно в суммах не менее 15 и 17 млрд. рублей.

Результаты расчета социально-экологической и экономической эффективности инвестиций в стратегию устойчивого развития мелиоративного комплекса мероприятий по Северо-Кавказскому федеральному округу свидетельствуют о высоким уровне общественного эффекта результатов реализации механизма государственно-частного партнерства, в т. ч. для отдельных участников мелиоративно-производственных мероприятий:

- для производителей сельскохозяйственной продукции коммерческая эффективность составит до 450 млрд. рублей, при окупаемости капитальных затрат в течение 3 лет;

- прирост чистого дисконтированного дохода при оценке бюдженой эффективности составляет до 170 млрд. рублей, при окупаемости капитальных затрат федерального бюджета в сроки до 5 лет;

- интегральный социально-экономический эффект реализации Стратегии устойчивого развития мелиорации, выраженный через прирост чистого дисконтированного дохода, составит более 700 млрд. рублей, а срок окупаемости инвестиций – 4 года.

Заключение. Анализ полученных результатов научно-методичеких, информационно-аналитических и статистических исследований по эколого-экономическому обоснованию Страте-

гии устойчивого развития мелиоративного комплекса Северного Кавказа позволяют сделать заключение о потребности значительных инвестиций и материально-технических ресурсов на реализацию комплекса мелиоративных мероприятий, но качественное выполнение всех целевых индикаторов обеспечивает развитие мелиоративной инфраструктуры, создание новых рабочих мест повышение уровня социально-экономических условий жизни сельского населения региона, существенное повышение продовольственного обеспечения Северо-Кавказского региона и валового регионального продукта, что соответствует основным направлениям Стратегии социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Агропромышленный комплекс Российской Федерации в 2021 году/Министерство сельского хозяйства Российской Федерации-Москва: 2022. 551 с. [Agro-Industrial Complex of the Russian Federation in 2021 / Ministry of Agriculture of the Russian Federation-Moscow: 2022-551 p.].

Дубенок, Н. Н. Разработка технико-экономического обоснования развития мелиоративного комплекса Северо-Кавказского федерального округа / Н. Н. Дубенок, Г .В. Ольгаренко, Д. М. Бенин [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 6. С. 23-28. DOI 10.32962/0235-2524-2023-6-23-28. [Dubenok, N. N. Development of a feasibility study for the development of the reclamation complex of the North Caucasus Federal District / N. N. Dubenok, G. V. Olgarenko, D. M. Benin [et al.] // Reclamation and water management. 2023. № 6. p. 23-28. DOI 10.32962/0235-2524-2023-6-23-28].

Дубенок Н. Н., Ольгаренко Г. В. Перспективы восстановления мелиоративного комплекса Российской Федерации. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2021;2: 56-59. [Dubenok N. N. Olgarenko G. V. Prospects for the restoration of the reclamation complex of the Russian Federation. *Bulletin of Russian Agricultural Science*. 2021;2: 56-59.].

Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга»-«РадугаИнформ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://inform-raduga.ru/about. (Дата обращения 25.10.2025 г.) [Information portal FGBNU VNII "Rainbow"-"RainbowInform" [Electronic resourceAccess mode: https://inform-raduga.ru/about. (Accessed 25.10.2025)].

Краснощеков В. Н. Ольгаренко Г. В., Ольгаренко Д. Г. Методические рекомендации по оценке эколого-экономической эффективности инвестиционных проектов мелиорации земель сельскохозяйственного назначения – Коломна: ИП Воробьев О.М., 2016. 100 с. [Krasnoshchekov V. N., Olgarenko G. V., Olgarenko D. G. Methodological recommendations for assessing the ecological and economic efficiency of investment projects for land reclamation for agricultural purposes – Kolomna: IP Vorobyov O.M., 2016. 100 p.].

Ольгаренко Г. В., Турапин С. С., Булгаков В. И. [и др.]. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: информационное издание – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2020. – 304 с. [Olgarenko G. V., Turapin S. S., Bulgakov V. I. [and others]. Reclamation complex of the Russian Federation: information publication – Moscow: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex, 2020. 304 p.]

Постановление Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации» (с изменениями на 16 мая 2025 года) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/603604725. [Decree of the Government of the Russian Federation of May 14, 2021 No. 731 "On the State Program for the Effective Involvement in the Circulation of Agricultural Land and the Development of the Reclamation Complex of the Russian Federation" (as amended on May 16, 2025) [Electronic Resource] –- Access Mode: https://docs.cntd.ru/document/603604725.].

Распоряжение Правительства РФ от 30.04.2022 № 1089-р «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа на период до 2030 года» (с изменениями на 21 октября 2024 года). [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/350317169 [Order of the Government of the Russian Federation of 30.04.2022 No. 1089-r "On approval of the Strategy for the socio-economic development of the North

Caucasus Federal District for the period up to 2030" (as amended on October 21, 2024). [Electronic resource] – Access mode: https://docs.cntd.ru/document/350317169].

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623726 Российская Федерация. Геоинформационная система мелиоративного комплекса субъектов Северо-Кавказского федерального округа: № 2023623499: заявл. 23.10.2023: опубл. 02.11.2023 / Г. В Ольгаренко, М. С. Зверьков, С. В. Брыль; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения "Радуга" [Certificate of state registration of database No. 2023623726 Russian Federation. Geo-information system of the reclamation complex of the subjects of the North Caucasus Federal District: No. 2023623499: application. 23.10.2023: publ. 02.11.2023 /G. V. Olgarenko, M. S. Zverkov, S. V. Bryl; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems "Rainbow"].

Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» (с изменениями на 10 марта 2025 года) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/564161398 [Decree of the President of the Russian Federation of January 21, 2020 No. 20 "On approval of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation" (as amended on March 10, 2025) [Electronic resource] – Access mode: https://docs.cntd.ru/document/564161398].

ФАО. 2021. Состояние мировых земельных и водных ресурсов для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства: системы на пределе. Сводный доклад 2021. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций Рим, Италия [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://doi.org/10.4060/cb7654ru [FAO. 2021. State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at breaking point. Consolidated Report 2021. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy [Electronic Resource] - Access Mode: https://doi.org/10.4060/cb7654ru].

Technical report by the Bureau of the United Nations Statistical Commission (UNSC) on the process of the development of an indicator framework for the goals and targets of the post-2015 development agenda (Working draft). 2015. 44p.

Информация об авторах

Ольгаренко Геннадий Владимирович, доктор с-х. наук, профессор, чл.кор. РАН, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельскохозяйственного водоснабжения «Радуга», г.о. Коломна, Московскская область, Россия, olgarenko@mail.ru, ORCID 0000-0003-1225-3147.

Information about the author

Olgarenko Gennady Vladimirovich, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute for Irrigation and Farming Water Supply Systems "Raduga", Kolomna, Russia, olgarenko@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1225-3147.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declares no conflict of interest.

УДК 635.658:631.527 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.005.48-57

Оценка исходного материала тарелочной чечевицы для селекции в условиях Правобережья Саратовской области

Носко О. С., Гусева С. А.✉, Старчак В. И., Кибальник О. П.
ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты изучения модельной популяции тарелочной чечевицы в условиях Правобережья Саратовской обл. с целью отбора для создания новых селекционных форм. Опыты закладывали в 2021-2023 гг. в селекционном севообороте ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в условиях северной части Нижнего Поволжья, зоне засушливых степей. Климат континентальный, почвы – чернозем южный, отличающиеся высоким содержанием калия и низким – фосфора. Содержание гумуса – от 3,0 до 3,5 %. Агротехника – зональная. Условия возделывания – богарные. Материал высевали в трех повторностях, рендомизированно, делянки - однорядковые (площадь делянки 3,5 м^2, ширина междурядий 70 см). Выявлены генотипы с урожайностью более 1 т/га: к-2843, к-3033, к-2914, к-2850, к-2920, к-3036, а также содержанием в семенах протеина > 30 % – к-2806, к-2910, к-3059, к-3083. Расчет коэффициентов корреляции показал наиболее сильную отрицательную сопряженность между содержанием в семенах протеина и БЭВ (r = –0,95). Выявлена значимая положительная взаимосвязь между количеством семян с одного растения и массой семян с одного растения (r = 0,73), содержанием в семенах золы и клетчатки (r = 0,74). Методом главных компонент установлено что наибольший вклад в первый гипотетический фактор внесли признаки с наибольшей взаимной изменчивостью – «содержание протеина» (|0,76|) и «содержание БЭВ» (|0,86|), т. е. эти два признака играют значимую роль в развитии растений чечевицы, и при разработке модели сорта рекомендуется, в первую очередь, учитывать их взаимную изменчивость. Не выявлено значимой, прямой статистической взаимосвязи между урожайностью и составляющими ее признаками, а также биохимическим составом семян. Причиной могли являться растрескиваемость бобов и связанная с ней осыпаемость семян. При оценке сопряженности между урожайностью и растрескиваемостью бобов провели расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена, в результате которого выявили сильную положительную взаимосвязь (ρ = 0,81).

Ключевые слова. Тарелочная чечевица, содержание протеина, урожайность, коэффициент корреляции, факторный анализ, метод главных компонент

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию Минсельхоза РФ в рамках темы № НИОКТР 123020800156-2 и № НИОКТР 124020300047-7.

Цитирование. Носко О. С., Гусева С. А., Старчак В. И., Кибальник О. П. Оценка исходного материала тарелочной чечевицы для селекции в условиях Правобережья Саратовской области // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):48-57. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.005.48-57.

Поступила в редакцию: 20.11.2025 Принята к печати: 05.12.2025

UDC 635.658:631.527 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.005.48-57

Evaluation of Plate Lentil Source Material for Breeding in the Right-Bank Region of the Saratov Region

Nosko O. S., Guseva S. A.✉, Starchak V. I.[1], Kibalnik O. P.
Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”, Saratov, Russia

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Abstract. The article presents the results of studying a model population of plate lentils in the Right-Bank area of the Saratov Region with the aim of selecting material for the development of new breeding forms. Experiments were carried out in 2021–2023 within the breeding crop rotation system of the Federal Research Center "Rossorgo" (Russian Research Institute of Sorghum and Maize) in the northern part of the Lower Volga region, an area belonging to the arid steppe zone. The climate is continental; soils are southern chernozem, characterized by high potassium content and low phosphorus content. Humus content ranges from 3.0 to 3.5%. Zonal agricultural practices were applied. Cultivation conditions were rainfed. The material was sown in three replications, randomly, in single-row plots (plot area 3.5 m^2, row spacing 70 cm). Genotypes with yields exceeding 1 t/ha were identified: k-2843, k-3033, k-2914, k-2850, k-2920, and k-3036. Genotypes with seed protein content above 30% included k-2806, k-2910, k-3059, and k-3083. Evaluation of pairwise correlation coefficients showed that the strongest, but negative, relationship was observed between seed protein content and NFE (r = –0.95). Significant positive correlations were found between the following traits: number of seeds per plant and seed weight per plant (r = 0.73), and between ash content and fiber content in seeds (r = 0.74). Factor analysis revealed significant variable loadings on the components. In the first hypothetical factor, traits with high mutual variability made the greatest contribution to total variance. In our study, this factor accounted for 25.20% of the total variance, with the largest contribution coming from traits with the strongest, but negative, correlations—protein content (|0.76|) and NFE content (|0.86|). These two traits play an important role in lentil plant development, and when designing a variety model, their mutual variability should be taken into account first.

Keywords. plate lentils, protein content, yield, correlation coefficient, factor analysis, principal component analysis

Funding. This work was carried out under the state assignment of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation as part of projects No. NIOKTR 123020800156-2 and No. NIOKTR 124020300047-7.

For citation. Nosko O. S., Guseva S. A., Starchak V. I., Kibalnik O. P. Evaluation of Plate Lentil Source Material for Breeding in the Right-Bank Region of the Saratov Region // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):48-57. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.005.48-57.

Received: 20.11.2025 Accepted: 05.12.2025

Введение. Чечевицу выращивают более чем в 50 странах мира и она становится одной из самых распространенных и популярных культур среди возделываемых зернобобовых. Мировым лидером по количеству посевных площадей и валовых сборов является Канада. Также основными производителями чечевичного зерна считаются Индия, США и Турция (Вошедский и др., 2021). В РФ в последние годы выращивание этой культуры становится важной частью посевного комплекса. Основным производителем этой культуры в нашем государстве являются Алтайский край и Саратовская обл., на которые в 2024 г. совокупно пришлось 46,1 % всех сборов чечевицы – это два крупнейших региона выращивания данной культуры. К регионам-лидерам относятся также Омская, Оренбургская и Рязанская обл. (www.ab-centre.ru. дата обращения 12.03.2025 г.*)*. Тем не менее, отмечается существенное варьирование урожайности по годам – за последние пять лет были отмечены ее колебания от 0,91 до 1,95 т/га. Интерес сельхозпроизводителей к чечевице сдерживается ее биологическими особенностями: полегание, низкорослость, неравномерность созревания, слабая конкурентоспособность относительно сорной растительности. В последнее десятилетие отечественные селекционеры уделяют большое внимание изучению чечевицы, а основными векторами селекции выбирают высокую и стабильную продуктивность, засухоустойчивость и технологичность (Вошедский и др., 2021; Сорокина 2022; Kazydub et al., 2017; Polukhin et al., 2022).

Основой улучшения имеющихся сортов является генотип сорта. В современной науке достигнут значительный прогресс в изучении хозяйственно-ценных признаков чечевицы на уровне генотипа. Однако реализация генетического потенциала сельскохозяйственных культур в значительной степени зависит от взаимодействия генов и от факторов внешней среды (Liber 2021).

Для создания новой селекционной формы с комплексом ценных признаков необходим генетически разнообразный исходный материал, основу которого определяет вариабельность признаков и, чем она шире, тем больше возможностей управления. Кроме того, признаки не

существуют сами по себе, а являются частью единого организма, в котором в той или иной степени все взаимосвязано. Тем не менее, необходимо помнить, что связи могут быть линейными и криволинейными, прямыми и обратными, сильными и слабыми, постоянными и изменчивыми (Кузенко 2022; Дёмина 2023). Ряд ученых установили согласованность между коррелирующими признаками и их изменчивостью, поэтому для проведения эффективного комплексного отбора при создании нового сорта и определения признаков, детерминирующих наибольший вклад в его создание, селекционеру необходимо понимать степень изменчивости хозяйственно-важных признаков и выявления взаимосвязей между ними (Пушкарёв и др., 2018; Зенкина 2020; Крылова и др., 2020).

Целью работы являлось выявление сопряженности между признаками крупноплодной чечевицы, определяющих нагрузку гипотетических факторов в модельной популяции для создания новых высокопродуктивных и высокотехнологичных сортов в условиях Саратовской обл.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись 32 генотипа тарелочной чечевицы, 28 из которых являются коллекционными сортообразцами ФИЦ ВИГРР им. Н. И. Вавилова, а 4 – зарегистрированы в реестре селекционных достижений РФ (Октава, Даная, Дельта, Надежда - селекция ФГБНУ РосНИИСК «Россорго») (табл. 1). В качестве стандарта использовали сорт крупноплодной чечевицы, допущенный к возделыванию в восьмом регионе, Дельта.

Таблица 1

Список коллекционных образцов чечевицы

Номер коллекции ВИР	Наименование сортообразца	Происхождение	Номер коллекции ВИР	Наименование сортообразца	Происхождение
St	Надежда	Россия	к-2914	Светлая	Россия
St	Даная	Россия	к-2920	Л2127	Россия
St	Октава	Россия	к-2940	Анфия	Россия
St	Дельта	Россия	к-2945	CDC Grandora	Канада
к-1043	местная	Италия	к-2981	Л 2126	Россия
к-2511	ПСЕ-2	Россия	к-2985	Л 2815	Россия
к-2677	Pelasgia	Греция	к-3030	Белая небуреющая Л 53	Россия
к-2712	Е 149	Эквадор	к-3033	Glamis	Канада
к-2776	б/н	Эквадор	к-3034	Sovereign	Канада
к-2806	ILL-642	Сирия	к-3035	Vantage	Канада
к-2843	89 LPR-8	Канада	к-3052	Аида	Россия
к-2844	PR 86-15	Канада	к-3054	Восточная	Россия
к-2850	Веховская 1	Россия	к-3059	Свитанок	Украина
к-2867	Рауза	Россия	к-3061	Местная	Украина
к-2886	б/н	Украина	к-3083	Любава	Украина
к-2910	Красноградская 23	Украина	к-3086	Местная	Украина

Опыты закладывали в 2021-2023 гг. в селекционном севообороте ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» по «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур» (Федин 1983) в условиях северной части Нижнего Поволжья, в зоне засушливых степей. Климат континентальный, почвы – чернозем южный, отличающиеся высоким содержанием калия и низким фосфора. Содержание гумуса – от 3,0 до 3,5 %. Агротехника – зональная. Условия возделывания – богарные. Коллекционный материал высевали в трех повторностях, рендомизированно, на однорядковых делянках (площадь делянки 3,5 м^2, ширина междурядий 70 см), кассетной сеялкой СКС-6-10.

Для статистической обработки использовали методические указания Доспехова Б. А., Берга Р. Л., а также компьютерные программы Excel и Agros 2/09 (Доспехов, Берг, 1964). Считается, что использование коэффициентов корреляции целесообразно, если зависимость между признаками близка к прямолинейной, а показатель коэффициента корреляции составляет не менее 70 процентов ($r \geq |0,7|$). Для характеристики нормальности распределения вариационного ряда применяли показатель критерия согласия Пирсона χ^2(хи-квадрат). И в случае, если распределение средних значений признака отличалось от нормального, коэффициент корреляции не рассчитывался.

Значимость F-критерия, критерия Пирсона и коэффициента корреляции автоматически устанавливается компьютерной программой: на 5 %-ном уровне значимость признака отмеча-

ется одной звездочкой (*) и на 1 %-ном – двумя (**), отсутствие символа указывает на незначимость коэффициента или критерия.

Каждая главная компонента (фактор) объясняет определенную долю общей дисперсии в данных, а компоненты, объясняющие больший процент дисперсии, считаются наиболее важными, поэтому для дальнейшего анализа оставляют те факторы, накопленная дисперсия которых составляет 60 % и более, а собственные значения больше единицы (критерий Кайзера). Согласно вышеуказанным принципам, факторы 5-13 были устранены из дальнейшей работы (рис. 1.).

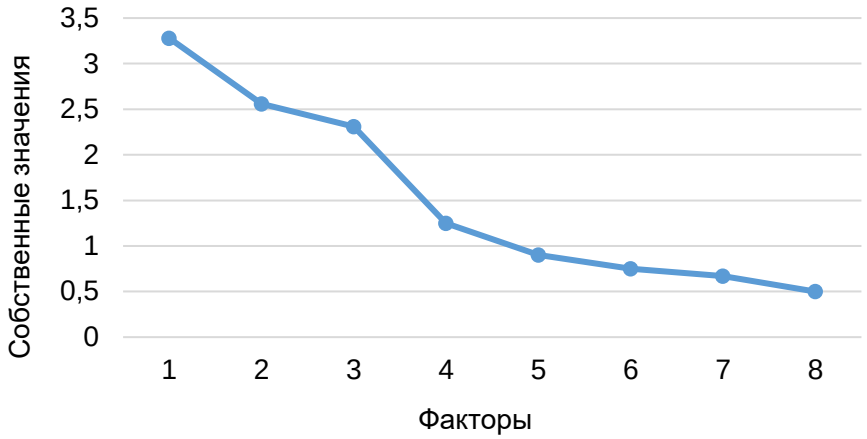


Рис. 1. График собственных значений (также и критерий каменистой осыпи Р. Кеттела)

На рис. 1 видно, что начало наиболее замедленного убывания собственных значений на уровне 4-5 факторов. Также можно отметить, что собственные значения пятого фактора меньше единицы.

Результаты. Оценка коэффициентов вариации позволила выявить признаки крупноплодной чечевицы, подверженные наименьшей изменчивости (CV < 10 %): длина стебля, содержание в семенах протеина, золы, клетчатки и БЭВ (табл. 2). То есть в исследуемой нами модельной популяции в условиях 2021-2023 гг. эти признаки варьировали в наименьшей степени. Высокая вариабельность была характерна для урожайности семян, количества семян с растения и массы семян с растения (CV > 20 %). У остальных признаков была отмечена средняя изменчивость.

По признаку «всходы – полное цветение» образцы варьировали от 34 (к-2981) до 45 (к-2985) дней, а по продолжительности от всходов до полного созревания – от 73,7 до 86,0 дней. 15 образцов (46,9 %) отнесли к среднеранним (период от всходов до созревания 71-80 дней), а остальные к среднеспелым. К наиболее раннеспелым можно отнести следующие генотипы: к-3035, Vantage, к-3052, Аида. По длине стебля средние показатели признака изменялись от 37,73 до 45,87 см. К наиболее высокорослым генотипам можно отнести к-2920 и к-2945 – длина их стебля выше 45 см. Лимиты средних значений высоты прикрепления нижнего боба составили: min = 15,07 см и max = 24,53 см (табл. 2).

В целом у всех образцов изучаемой модельной популяции, согласно классификатору СЭВ, расположение нижнего боба является оптимальным (> 15 см) (Волузнева 1985) – классификатор. Тем не менее ни у одного из них показатели данного признака не превысили значения стандарта. На рис. 2 представлены показатели разности средних значений изучаемых сортообразцов и стандарта по морфометрическим признакам, определяющих технологичность растений. Семь образцов немного превысили стандарт Дельта по высоте растений, а по высоте расположения нижнего боба у стандарта отмечено максимальное среднее значение признака.

По количеству семян с одного растения полученные значения варьировали от 28,83 шт. (Даная) до 57,27 шт. (к-3035). К генотипам с высоким числом семян с растения (> 50 шт.) отнесли также к-2511, к-2843, к-2844. Изменчивость массы семян с одного растения составила 1,92 (к-2712)…3,25 г (Октава). Образцы с показателями этого признака ≥ 3 г – Надежда и к-2511. Экстремумы средних значений массы 1000 семян составила 46,55 г (к-1043)…72,38 г (к-2940). Наименьшая урожайность семян была выявлена у генотипа к-2677 (Греция) – 0,71 т/га, а наибольшая у российского образца к-3054 – 1,36 т/га. К высокоурожайным селекционным формам отнесли также образцы с урожайностью более 1 т: к-2843, к-3033, к-2914, к-2850, к-2920, к-3036.

Таблица 2

Общая характеристика хозяйственно ценных признаков модельной популяции тарелочной чечевицы, 2021-2023 гг.

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Средняя	Ошибка	Коэффициент вариации	$F_{0,05}$	$НСР_{0,05}$
Урожайность семян, т/га	0,71	1,36	0,90	0,03	20,61	3,25*	0,12
Полное цветение, дни	34,00	45,00	40,63	2,54	10,35	2,69*	5,24
Полное созревание, дни	73,70	86,00	80,57	2,46	13,17	2,46*	4,63
Длина стебля, см	37,73	45,87	41,64	1,40	7,39	2,43*	4,06
Высота прикрепления нижнего боба, см	15,07	24,53	20,34	0,37	14,27	2,61*	3,68
Число семян с 1 растения, шт.	28,83	57,27	42,18	1,26	21,62	9,88*	2,14
Масса семян с 1 растения, г	1,92	3,25	2,49	0,87	24,62	6,61*	0,32
Масса 1000 семян, г	46,55	72,38	59,32	1,04	14,34	6,92*	6,32
Протеин, %	26,73	31,37	29,57	0,17	4,59	5,13*	1,19
Жир, %	0,73	1,20	0,97	0,02	19,76	7,40*	0,18
Зола, %	2,07	2,98	2,56	0,01	7,31	3,32*	0,08
Клетчатка, %	4,18	5,78	5,28	0,04	7,45	2,56*	0,09
БЭВ, %	59,67	64,69	61,49	0,18	3,21	3,32*	1,57

*Примечание: *Значимо на 5 %-ном уровне, **Значимо на 1 %-ном уровне, (отсутствие символа * указывает на незначимость коэффициента).*

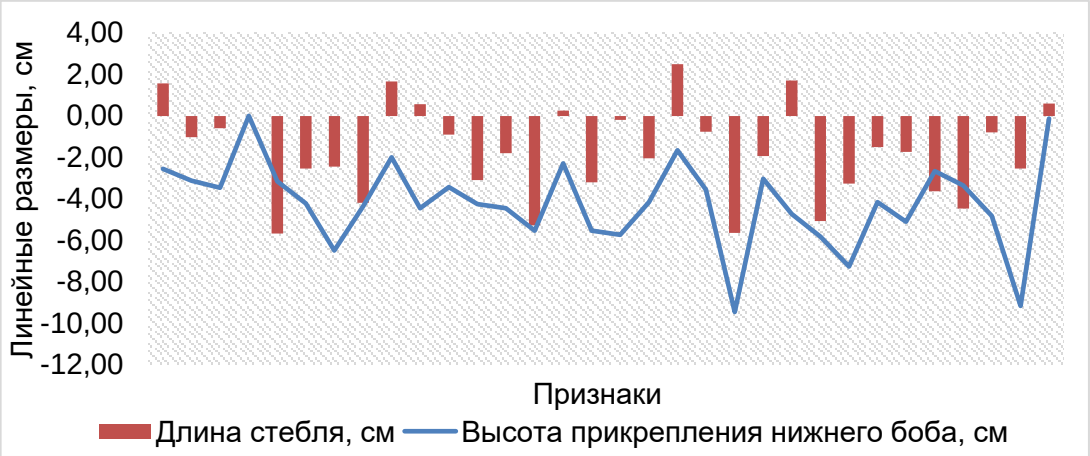


Рис. 2. Разность средних значений изучаемых генотипов по отношению к стандарту по длине стебля и высоте прикрепления боба, 2021-2023 гг.

Одной из причин популярности зернобобовых культур является способность накапливать в своих семенах высокое количество протеина. Его содержание в семенах варьировало от 26,73 % до 31,37 %. Выявлены генотипы с содержанием в семенах протеина > 30 % – к-2806, к-2910, к-3059, к-3083.

Также на рис. 3 можно увидеть разницу между средними показателями изучаемых генотипов и стандарта по урожайности семян и содержанию протеина в семенах – большинство коллекционных генотипов превзошло стандарт по этим признакам.

В результате оценки распределения Гаусса выявили, что только у одного признака – «количество бобов на 1 растении» - распределение вариационного ряда значимо отличалось от нормального (χ^2 = 8,86*) *As* = –0,08 ± 0,41, *Ex 0,93** ± 0,81, поэтому данный признак был исключен из расчета коэффициентов корреляции Пирсона.

Рис. 3. Разность между средними показателями изучаемых генотипов по отношению к стандарту по урожайности семян и содержанию протеина в семенах, 2021-2023 гг.

В результате оценки сопряженности между признаками тарелочной чечевицы наиболее сильную, но отрицательную корреляцию выявили между содержанием в семенах протеина и БЭВ (r = –0,95**) (рис. 4).

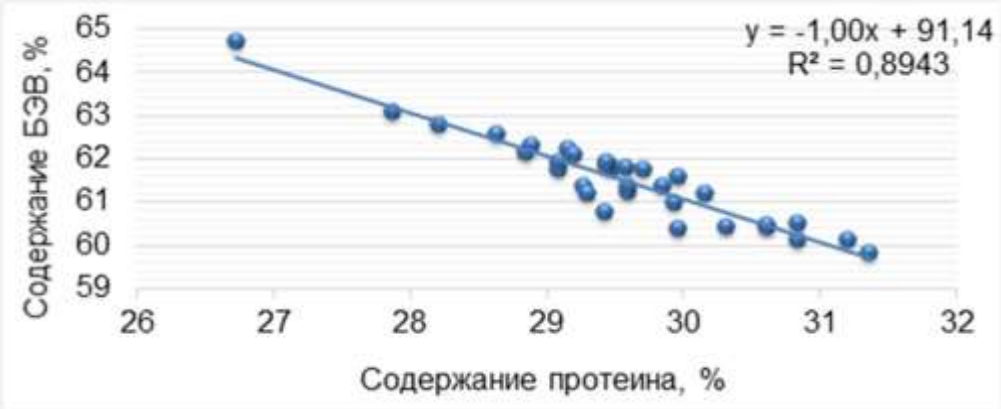


Рис. 4. Взаимосвязь длины содержания в семенах чечевицы протеина и БЭВ, 2021-2023 гг.

Также выявлена значимая положительная взаимосвязь установлена между количеством семян с одного растения и массой семян с одного растения (r = 0,73**), содержанием в семенах золы и клетчатки (r = 0,74**) (табл. 3). Среднюю существенную сопряженность отметили между признаками: всходы-полное созревание – высота прикрепления нижнего боба, длина стебля – высота прикрепления нижнего боба (r= 0,52**), количество семян с одного растения – масса 1000 семян (r = 0,49**), количество семян с одного растения – содержание в семенах протеина (r= 0,48**), содержание в семенах клетчатки – содержание БЭВ (r = 0,56**)

Взаимосвязь содержания в семенах протеина носила с большинством признаков слабый и отрицательный характер за исключением средней отрицательной сопряженности с количеством семян на одном растении (r= –0,48**) и сильной отрицательной корреляционной связи с содержанием в семенах БЭВ.

Для более подробной и содержательной оценки исходных форм по изучаемым признакам был выполнен факторный анализ методом главных компонент, который помогает выделить самое важное из массива данных, находя скрытые закономерности, а первая главная компонента содержит наибольшую долю информации о различиях в данных.

Считается, что переменные того или фактора объединяются на основе общих свойств, находящихся в их корреляционной структуре, то есть их взаимной изменчивости, что следует учитывать в первую очередь при гибридизации и отборе. Также принято считать, что переменные в разных факторах – ортогональны, а в первом гипотетическом факторе признаки с высокой взаимной изменчивостью вносят максимальный вклад в общую дисперсию. В наших исследованиях она составила 25,20 %, а наибольший вклад внесли признаки с наибольшей, но отрицательной взаимосвязью – «содержание протеина» (|0,76|) и «содержание БЭВ» (|0,86|) и можно предположить, что эти два признака играют значимую роль в развитии растений чечевицы (табл.4). Накапливаемую дисперсию второго фактора (19,68 %) формировали: длина стебля, высота прикрепления нижнего боба, период от всходов до полного созревания, количество семян с одного растения и масса 1000 семян. Два взаимосвязанных признака «содержание золы» и «содержание клетчатки» в семенах составили наибольшую долю изменчивости третьего фактора (17,76 %), а урожайность – четвертого (9,59 %). Исходя из результатов оценки модельной популяции тарелочной чечевицы в условиях Саратовской области, урожайность не имеет прямой корреляционной значимой сопряженности с большинством признаков.

Таблица 4

Факторные нагрузки переменных на главные компоненты модельной популяции тарелочной чечевицы, 2021-2023 гг.

Показатель	F1	F2	F3	F4	F5
Урожайность семян, т/га	0,42	0,04	0,09	0,74	0,47
Полное цветение, дней	0,49	-0,47	-0,34	0,15	0,05
Полное созревание, дней	0,19	-0,64	-0,46	-0,17	0,06
Длина стебля, см	0,33	-0,65	-0,23	0,03	0,21
Высота прикрепления нижнего боба, см	0,45	-0,66	-0,08	-0,13	-0,02
Число семян с 1 растения, шт.	0,53	0,66	-0,15	-0,22	0,41
Масса семян с 1 растения, г	0,56	0,24	0,27	-0,40	0,61
Масса 1000 семян, г	0,11	-0,66	0,50	-0,18	0,14
Протеин, %	-0,76	-0,26	0,42	-0,02	0,27
Жир, %	-0,04	0,17	-0,76	-0,18	-0,12
Зола, %	-0,45	0,05	-0,74	0,11	0,22
Клетчатка, %	-0,63	-0,01	-0,51	-0,04	0,42
БЭВ, %	0,86	0,22	-0,13	0,05	-0,34
Дисперсия	**3,28**	**2,56**	**2,31**	**1,25**	**0,90**
Дисперсия, %.	**25,20**	**19,68**	**17,76**	**9,59**	**6,95**
Накопленная дисперсия	**25,20**	**44,89**	**62,65**	**72,24**	**79,18**

Обсуждение. По данным казахских ученых корреляционная зависимость урожайности в наибольшей степени зависела от количества семян с растения и бобов с растения (r = 0,646 и 0,639 соответственно) (Тен 2025). Сибирские селекционеры также установили положительную взаимосвязь урожайности с массой семян и количеством бобов на 1 растении (r = 0,80 в обоих случаях) и средняя с массой 1000 семян (r = 0,50), количеством семян в бобе (r = 0,60) (Маракаева 2019). Саратовские ученые Вавиловского университета отметили значимую отрицательную сопряженность урожайности с массой 1000 семян (r = –0,83) и положительную с количеством бобов на растении (r = 0,89), количеством семян с 1 растения (r = 0,91), массой семян с 1 растения (r = 0,90), содержанием протеина (r = 0,59) (Субботин 2025). При изучении взаимосвязей между хозяйственно-ценными признаками тарелочной чечевицы в наших исследованиях не было выявлено значимой, прямой статистической взаимосвязи между урожайностью и составляющими ее признаками, а также биохимическим составом семян, что подтверждалось не только расчетом коэффициентов корреляции, но и факторным анализом. Причиной мог оказаться неучтенный признак – растрескиваемость бобов с последующим осыпанием семян (характерная черта дикорастущей формы), приводящий даже при ручной уборке к потере семян, следовательно и частичной потере урожая. В результате оценки сортообразцов изучаемой модельной популяции по этому признаку, был выявлен лишь один образец с низкой осыпаемостью семян – к-2867 (7 баллов), четыре – с высокой: к-

3033, к-3034, к-2850, к-2806 (3 балла) и остальные генотипы – со средней (5 баллов) (Волузнева. 1985). Для оценки сопряженности между урожайностью семян и растрескиваемостью бобов провели расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена, в результате которого выявили сильную положительную взаимосвязь (ρ = 0,81**).

Растрескиваемость бобов контролируется доминантным геном (Pi), а нерастрескиваемость – рецессивным (pi). Дальнейшие селекционные работы по созданию новых сортов чечевицы необходимо проводить не только на увеличение урожайности культуры, но и ее сохранность при уборке.

В результате оценки факторного анализа методом главных компонент было установлено, что наибольший вклад в дисперсию первого гипотетического фактора внесли содержание в семенах протеина и БЭВ, а второго – элементы технологичности культуры (длина стебля, высота прикрепления нижнего боба) в совокупности с элементами продуктивности (количество семян с одного растения, масса 1000 семян). Исходя из принципов анализа, что переменные определенного фактора объединяются на основе общих свойств, находящихся в их корреляционной структуре, при разработке модели сорта рекомендуется, в первую очередь, учитывать взаимную изменчивость вышеперечисленных признаков.

Заключение. Выявлены генотипы с более 1 т/га: к-2843, к-3033, к-2914, к-2850, к-2920, к-3036, а также содержанием в семенах протеина > 30 % – к-2806, к-2910, к-3059, к-3083. Оценка парных коэффициентов корреляции показала, что наиболее сильную сопряженность выявили между содержанием в семенах протеина и БЭВ (r = -0,95). Выявлена значимая положительная взаимосвязь между количеством семян с одного растения и массой семян с одного растения (r = 0,73), содержанием в семенах золы и клетчатки (r = 0,74). Методом факторного анализа установлены значимые веса переменных на компоненты. В первом гипотетическом факторе признаки с высокой взаимной изменчивостью вносят максимальный вклад в общую дисперсию (в наших исследованиях - 25,20 %), а наибольший вклад внесли признаки с наибольшей, но отрицательной взаимосвязью – «содержание протеина» (|0,76|) и «содержание БЭВ» (|0,86|), т. е. эти два признака играют значимую роль в развитии растений чечевицы, и при разработке модели сорта рекомендуется, в первую очередь, учитывать их взаимную изменчивость.

Не выявлено значимой, прямой статистической взаимосвязи между урожайностью и составляющими ее признаками, а также биохимическим составом семян. Причиной могли являться растрескиваемость бобов и связанная с ним осыпаемость семян. При оценке сопряженности между урожайностью и растрескиваемостью бобов провели расчет коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, в результате которого выявили сильную положительную взаимосвязь (ρ = 0,81**).

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Р. Л. Корреляционные плеяды и стабилизирующий отбор. Применение математических методов в биологии. Л.: 1964:23-62. [Berg R. L. Correlation Pleiades and Stabilizing Selection. Application of Mathematical Methods in Biology. Leningrad: 1964:23-62].

Вошедский Н. Н., Ильинская И. Н., Кулыгин В. А., Пасько С. В., Федюшкин А. В., Гаевая Э. А. Технология возделывания чечевицы в агроландшафтах Ростовской области. пос. Рассвет: Азов-Принт, 2021;120. [Voshedskiy N. N., Ilyinskaya I. N., Kulygin V. A., Pas'ko S. V., Fedyushkin A. V., Gaevaya E. A. Technology of lentil cultivation in agrolandscapes of the Rostov region. Ras-svet settlement: AzovPrint, 2021; 120.]

Гусева С. А., Маслова Г. А., Носко О. С. Оценка исходного материала сахарной кукурузы для селекции в засушливых условиях Саратовской области. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2024;4(56): 54-65. [Guseva, S. A., Maslova G. A., Nosko O. S. Evaluation of source material of sweet corn for breeding in arid conditions of the Saratov region. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2024; 4 (56): 54-65.

Дёмина И.Ф. Изменчивость и селекционно-ценных признаков сортов и линий яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Поволжья. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(5): 739-748. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748. [Demina I.F. Variability and relationship of breeding valuable traits of spring soft wheat varieties and lines in the Middle Volga region. *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2023; 24(5): 739-748. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748].

Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. М.: 2023, 154-285. [Dospekhov, B. A. Field Experiment Methodology: With Fundamentals of Statistical Processing of Research Results. Moscow: 2023, 154-285].

Зенкина К. В., Асеева Т. А. Модель адаптированного сорта ярового тритикале для условий Дальнего Востока. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020;3: 3-5. doi: https://doi.org/10.31857/S2500262720030011. [Zenkina K. V., Aseeva T. A. Model of an adapted spring triticale variety for the conditions of the Far East. *Russian Agricultural Science*. 2020; 3: 3-5. doi: https://doi.org/10.31857/S2500262720030011].

Кузенко М.В. Анализ элементов структуры урожая сорта АГУ 75 соответствия параметрам модели идеотипа зимующего овса. *Новые технологии*. 2022;18(4): 172-179. doi: https://doi.org /10.47370/2072-0920-2022-18-4-172-179. [Kuzenko M.V. Analysis of the elements of the yield structure of the AGU 75 variety in accordance with the parameters of the wintering oat ideotype model. *New technologies*. 2022;18(4): 172–179. doi: https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-4-172-179].

Крылова Е. А., Хлесткина Е. К., Бурляева М. О., Вишнякова М. А. Детерминантный характер роста зернобобовых культур: роль в доместикации и селекции, генетический контроль. *Экологическая генетика*. 2020;18(1): 43–58. doi: https://doi.org/10.17816/ecogen16141. [Krylova E. A., Khlestkina E. K., Burlyaeva M. O., Vishnyakova M. A. Determinant growth pattern of leguminous crops: role in domestication and breeding, genetic control. *Ecological Genetics*. 2020; 18(1): 43-58. doi: https://doi.org/10.17816/ecogen16141].

Маракаева Т. В. Взаимосвязь урожайности и элементов продуктивности чечевицы. *Вестник НГАУ*. 2019;3(52):40-47. doi: https://doi.org/10.31677/2072-6724-2019-52-3-40-47. [Marakaeva T. V. Relationship between yield and productivity elements of lentils. *Bulletin of NSAU*. 2019; 3 (52): 40-47. doi: https://doi.org/10.31677/2072-6724-2019-52-3-40-47].

Международный классификатор СЭВ рода Lens Mill. Л.: ВИР., 1985. [International Classification of the CMEA Genus Lens Mill. L.: VIR., 1985].

Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М., 1983. [Methodology of State Variety Testing of Agricultural Crops. Moscow, 1983.].

Пушкарев Д. В., Чурсин А. С., Кузьмин О. Г. Корреляция урожайности с элементами продуктивности сортов яровой мягкой пшеницы в условиях степной зоны Омской области. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2018;3(31):26-35. [Pushkarev D. V., Chursin A. S., Kuzmin O. G. Correlation of crop yield with productivity elements of spring soft wheat varieties in the steppe zone of Omsk Oblast. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2018;3(31):26-35].

Сорокина И. Ю. Изучение коллекционных образцов чечевицы для создания новых сортов в условиях Юга России. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022;1-1 (115):140-143. doi: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.115.1.028. [Sorokina I. Yu. Study of collection lentil accessions for creating new varieties in the conditions of the South of Russia. *International Research Journal*. 2022; 1-1 (115): 140–143. doi: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.115.1.028].

Стасюк А. И., Леонова И. Н., Пономарева М. Л., Василова Н. З., Шаманин В. П., Салина Е. А. Фенотипическая изменчивость селекционных линий мягкой пшеницы (Triticum aestivum L.) по элементам структуры урожая в экологических условиях Западной Сибири и Татарстана. *Сельскохозяйственная биология*. 2021;56(1):78-91. doi: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.78. [Stasyuk A. I., Leonova I. N., Ponomareva M. L., Vasilova N. Z., Shamanin V. P., Salina E. A. Phenotypic variability of soft wheat (Triticum aestivum L.) breeding lines for yield structure elements under environmental conditions of Western Siberia and Tatarstan. *Agricultural Biology*. 2021; 56(1): 78-91. doi: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.78].

Тен Е. А., Ошергина И. П. Результаты изучения коллекционных образцов чечевицы в засушливых условиях сухостепной зоны Акмолинской области. *Аграрный научный журнал*. 2025;2:66–76. doi: https://doi.org/10.28983/asj.y2025i2pp66-76. [Ten E. A., Oshergina I. P. Results of the study of collection accessions of lentils in arid conditions of the dry steppe zone of Akmola region. *Agrarian scientific journal*. 2025; 2: 66-76. doi: https://doi.org/10.28983/asj.y2025i2pp66-76].

Чечевица. Посевные площади, валовые сборы и урожайность по регионам РФ в 2011-2024 гг. *Экспертно-аналитический центр агробизнеса "АБ-Центр"*. www.ab-centre.ru. Рынок зерна, Зернобобовые культуры. 12.03.2025 г. [Lentils. Cultivated area, gross harvest, and yield by Russian regions in 2011-2024. AB-Center, an analytical center for agribusiness. www.ab-centre.ru. Grain market, legumes. March 12, 2025.]

Kazydub N., Marakayeva T., Kuzmina S. et al. Chemical composition of seeds and green beans of common bean varieties, breeded in Omsk State Agrarian University under conditions of southern forest-steppe zone of Western Siberia. *Agronomy Research*. 2017;15(5):1918-1927. doi: https://doi.org /10.15159/AR.17.065.

Liber M., Oliveira H.R., Maia A.T., Duarte I. The History of Lentil (Lens culinaris subsp. culinaris) Domestication and Spread as Revealed by Genotyping-by-Sequencing of Wild and Landrace Accessions. *Frontiers in Plant Science*. 2021;l(12):628439. doi: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.628439.

Polukhin A. A., Zotikov V. I., Zelenov A. A., Panarina V. I., Khmyzova N. G. Potential for Growth of Legume Production in the Orel Region:Towards an Increased Security. *Green Innovations, Intellectual Property Protection and Information Security*. 2022; 449-457. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93155-1_49.

Информация об авторах

Носко Оксана Сергеевна, младший научный сотрудник отдела селекции и первичного семеноводства, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы»; 410050, РФ, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, 4; e-mail: oksananosco@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3120-1764.

Гусева Светлана Александровна, старший научный сотрудник отдела селекции и первичного семеноводства, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы»; 410050, РФ, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, 4; e-mail: s.guseva76@mail.ru.* ORCID: 0000-0001-7006-0429.

Старчак Виктория Игоревна, старший научный сотрудник отдела селекции и первичного семеноводства, кандидат сельскохозяйственных культур, ФГБНУ Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы «Россорго», г. Саратов, Россия, тлф: +79085539717, viktoria_starchak@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-7312-4547

Кибальник Оксана Павловна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела селекции и первичного семеноводства, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы»; 410050, РФ, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, 4; e-mail: kibalnik79@yandex.ru. ORCID ID: 0000-0002-1808-8974.

Information about the authors

Nosko Oksana Sergeevna, Junior Researcher, Department of Selection and Primary Seed Production, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”; 410050, Russian Federation, Saratov, 1st Institutskiy proezd, 4; e-mail: oksananosco@mail.ru . ORCID: 0000-0003-3120-1764

Guseva Svetlana Aleksandrovna, Senior Researcher, Department of Selection and Primary Seed Production, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”; 410050, Russian Federation, Saratov, 1st Institutskiy proezd, 4; e-mail: s.guseva76@mail.ru. 0000-0001-7006-0429

Starchak Victoria Igorevna, Senior Researcher, Department of Selection and Primary Seed Production, Candidate of Agricultural Sciences, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”, 410050, Russian Federation, Saratov, 1st Institutskiy proezd, 4, tel.: +79085539717, viktoria_starchak@rambler.ru; ORCID: 0000-0001-7312-4547

Kibalnik Oksana Pavlovna, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”; 410050, Russian Federation, Saratov, 1st Institutskiy proezd, 4; e-mail: kibalnik79@yandex.ru. ORCID ID: 0000-0002-1808-8974.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author’s contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 631.52 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.006.58-64

Транскрипционная активность генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов и флавонолов у *Quercus robur* L. в условиях засухи

Зыбинская П. А.✉
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», Волгоград, Россия

Аннотация. Антоцианы и флавонолы играют важную роль в защите растений от абиотических стрессов, выполняя фотозащитные и антиоксидантные функции. Однако молекулярные механизмы регуляции их биосинтеза у дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) при водном дефиците остаются малоизученными. В связи с этим целью исследования являлась оценка транскрипционной активности генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов и флавонолов у *Q. robur* в условиях дефицита влаги.

Методом секвенирования транскриптомов на платформе Oxford Nanopore было выявлено значительное повышение экспрессии ключевого гена биосинтеза антоцианов *ANS* (в 7 раз), а также генов общего флавоноидного пути *CHS*, *F3H*, *F3'H* и *F3'5'H*. Параллельно с помощью неинвазивного измерения в листьях *Q. robur* было установлено достоверное снижение содержания антоцианов в листьях при одновременном увеличении содержания флавонолов. В то же время, экспрессия генов, кодирующих ферменты модификации (*AGT*) и транспорта (*GST*) антоцианов, существенно не отличалась в контрольной и экспериментальной группах.

Результаты исследования могут свидетельствовать об активации биосинтеза антоцианов в ответ на засуху у *Q. robur*, однако, сопоставление с данными исследования спектральных характеристик листовых пластинок *Q. robur* позволяет предположить, что максимальная транскрипционная активность генов антоцианового пути может приходиться на более ранние стадии воздействия стресса. Кроме того, увеличение содержания флавонолов в листьях *Q. robur* в ответ на засуху может говорить о компенсации недостатка антоцианов. Полученные данные важны для понимания молекулярно-генетических механизмов засухоустойчивости *Q. robur* и выявления генов-мишеней для селекции и применения геномных технологий.

Ключевые слова. Антоцианы; флавонолы; транскрипционная активность генов; *Quercus robur* L.; засуха.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FNFE-2025-0013 «Управление экспрессией генов, вовлеченных в процесс адаптации к неблагоприятным факторам внешней среды, для улучшения хозяйственно-ценных признаков древесно-кустарниковых и культурных растений, используемых в агролесомелиорации».

Цитирование. Зыбинская П. А. Транскрипционная активность генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов и флавонолов у *Quercus robur* L. в условиях засухи // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):58-64. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.006.58-64.

Поступила в редакцию: 26.10.2025 Принята к печати: 01.12.2025

UDC 631.52 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.006.58-64

Transcriptional activity of genes involved in the biosynthesis of anthocianins and flavonols in *Quercus robur* L. under drought conditions

Zybinskaya P. A.✉
Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences”, Volgograd, Russia

✉ – Corresponding author /Для контактов.

Abstract. Anthocyanins and flavonols play an important role in protecting plants from abiotic stresses by performing photoprotective and antioxidant functions. However, the molecular mechanisms regulating their biosynthesis in pedunculate oak (*Quercus robur* L.) under water deficit remain poorly studied. In this regard, the aim of the study was to assess the transcriptional activity of genes involved in anthocyanin and flavonol biosynthesis in *Q. robur* under water deficit.

Transcriptome sequencing on the Oxford Nanopore platform revealed a significant increase in the expression of the key anthocyanin biosynthesis gene *ANS* (by 7 times), as well as genes of the general flavonoid pathway *CHS*, *F3H*, *F3'H*, and *F3'5'H*. Simultaneously, non-invasive measurement in *Q. robur* leaves established a significant decrease in anthocyanin content alongside a simultaneous increase in flavonol content. At the same time, the expression of genes encoding anthocyanin modification (*AGT*) and transport (*GST*) enzymes did not differ significantly between the control and experimental groups.

The research results may indicate the activation of anthocyanin biosynthesis in response to drought in *Q. robur*. However, comparison with data from a study on the spectral characteristics of *Q. robur* leaf blades suggests that the maximum transcriptional activity of the anthocyanin pathway genes might occur at earlier stages of stress exposure. Furthermore, the increased flavonol content in *Q. robur* leaves in response to drought may indicate a compensation for the lack of anthocyanins. The obtained data are important for understanding the molecular genetic mechanisms of drought tolerance in *Q. robur* and for identifying target genes for breeding and the application of genomic technologies.

Keywords. Anthocianins; flavonols; transcriptional activity of genes; *Quercus robur* L.; drought.

Funding. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FNFE-2025-0013 "Regulation of gene expression involved in the adaptation to adverse environmental factors to improve economically valuable traits of woody and cultivated plants used in agroforestry".

For citation. Zybinskaya P.A. Transcriptional activity of genes involved in the biosynthesis of anthocianins and flavonols in *Quercus robur* L. under drought conditions Scientific // Agronomy Journal. 2025;4(131):58-64. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.0036.58-64.

Received: 26.10.2025 Accepted: 01.12.2025

Введение. Флавоноиды представляют собой обширное семейство полифенольных соединений, выполняющих множество важных функций в растениях. Они подразделяются на несколько классов, включающих в себя флавоны, флавонолы, флаваноны, флаванонолы, флаванолы (катехины), антоцианы и халконы (Panche et al., 2016). Среди них антоцианы и флавонолы играют особенно важную роль в защите растений от абиотических стрессов.

Антоцианы – это водорастворимые пигменты, придающие фиолетовую, синюю, розовую, коричневую и красную окраску листьям и другим органам растений, а также выполняющие различные защитные функции. Ключевой из них является фотозащита: антоцианы, локализуясь в верхних слоях мезофилла и эпидермисе, экранируют фотосинтетический аппарат от избыточного светового потока, предотвращая фотоокислительное повреждение. Кроме того, они проявляют антиоксидантные свойства, нейтрализуя активные формы кислорода (Gould, 2004; Golovko, 2023). Флавонолы, будучи бесцветными или светло-желтыми пигментами, также выступают как мощные антиоксиданты и УФ-протекторы, поглощающие вредное ультрафиолетовое излучение и нейтрализуя активные формы кислорода (Laoué et al., 2022).

Биосинтез флавоноидов является сложным многостадийным процессом, контролируемым рядом ферментов. Первым ключевым ферментом, запускающим биосинтез всех флавоноидов, является халконсинтаза (CHS). Затем халкон-изомераза (CHI) превращает халкон во флаванон, который является предшественником для многих флавоноидов. Далее флаванон-3-гидроксилаза (F3H) гидроксилирует флаваноны, образуя дигидрофлавонолы – ключевую точку ветвления пути флавоноидов. Для синтеза флавонолов флавонолсинтаза (FLS) непосредственно преобразует дигидрофлавонолы (такие как дигидрокемпферол) в соответствующие флавонолы (кемпферол, кверцетин). В то же время, разнообразие как флавонолов, так и анто-

цианов обеспечивается ферментами гидроксилирования, такими как флавоноид-3′-гидроксилаза (F3′H) и флавоноид-3′,5′-гидроксилаза (F3′5′H) (Falcone Ferreyra et al., 2012; Petrussa et al., 2013).

Для синтеза антоцианов дигидрофлавонол-4-редуктаза (DFR) восстанавливает дигидрофлавонолы до лейкоантоцианидинов. После этого антоцианидинсинтаза (ANS), также известная как лейкоантоцианидиндиоксигеназа (LDOX), катализирует окисление лейкоантоцианидинов до антоцианидинов. Для придания стабильности антоцианидины могут подвергаться вторичным модификациям, таким как гликозилирование (опосредованное, например, антоцианидинглюкозилтрансферазой, AGT), ацилирование (антоцианидинацетилтрансферазой, AAT) и другие модификации (Golovko, 2023). Точно так же модификациям могут подвергаться флавонолы (Laoué et al., 2022). Наконец, антоцианы транспортируются из эндоплазматического ретикулума в вакуоли при участии глутатион-S-трансферазы (GST), где и накапливаются (Mannino et al., 2021; Golovko, 2023).

Экспрессия генов, кодирующих ферменты биосинтеза антоцианов и других флавоноидов, регулируется специфическим белковым комплексом MBW, который образуется в результате взаимодействия транскрипционных факторов из семейств MYB, bHLH и WDR (Xu et al., 2015). Таким образом, согласованная работа структурных генов и транскрипционных факторов обеспечивает тонкий контроль над синтезом различных классов флавоноидов.

Исследования на различных растениях показывают, что засуха индуцирует накопление антоцианов и активацию генов их биосинтеза (Naing, Kim, 2021). Однако для дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), являющегося основной лесообразующей породой и активно использующегося в агролесомелиорации на юге России (Крючков и др., 2015; Морозова и др., 2016), молекулярные механизмы регуляции антоцианового пути при водном дефиците остаются малоизученными. В связи с этим целью работы стала оценка транскрипционной активности генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов и флавонолов у *Q. robur* в условиях моделируемой засухи. Полученные данные могут иметь важное значение для селекции *Q. robur*, а также позволят выявить гены-мишени для применения геномных технологий с целью повышения засухоустойчивости данной породы.

Материалы и методы. Оценка транскрипционной активности генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов у *Q. robur* проводилась с помощью метода секвенирования транскриптомов. Вначале сеянцы *Q. robur* без признаков фитопатологии были поделены на две группы по 10 растений в каждой. В контрольной группе поддерживалась оптимальная влажность почвы (75-80 % от НВ), а опытная была подвергнута засухе (5-10 % от НВ). Уровень влажности почвы ежедневно контролировался с помощью влагомера MC-7828 SOIL (Landtek, Тайвань) и корректировался в случае необходимости.

Через две недели после начала эксперимента в обеих группах растений было проведено неинвазивное измерение содержания флавонолов и антоцианов в листьях с помощью анализатора растений Dualex Scientific+™ («Force-A», Франция), который позволяет определять содержание данных соединений в виде индексов с диапазоном значений от 0 до 3. Одновременно были отобраны листовые пластинки, из которых была выделена тотальная РНК с использованием набора R-Plants (Biolabmix, Россия). Навески листьев по 75 мг гомогенизировались с помощью Precellys® 24 (Bertin Technologies, Франция), кроме того, для удаления примеси ДНК образец тотальной РНК был обработан DNase I (Magen, Китай).

Перед подготовкой библиотеки для секвенирования оценивалось качество и количество полученной РНК: измерение концентрации проводилось на флуориметре Qubit® 4 (Thermo Fisher Scientific, США), а чистота образцов контролировалась спектрофотометрически по показателям соотношений A260/A280 и A260/A230 с использованием SPECTROstar Nano (BMG Labtech, Германия). Далее по протоколу Ligation Sequencing V14 protocol – Direct cDNA Sequencing (SQK-LSK114, версия DCS_9187_v114_revI_31Jul2024), размещенному на сайте Nanopore Community, было подготовлено две библиотеки тотальной РНК, каждая из которых состояла из 10 объединенных образцов РНК контрольной и экспериментальной групп *Q. robur*. Секвенирование транскриптомов и получение сырого сигнала проводилось на секвенаторе 3-го поколения MinION (Oxford Nanopore Technologies, Великобртания) с программным обеспечением MinKnow 23.04.3. Расшифровка сырого сигнала (бейзколлинг) осуществлялась с помощью Dorado (Oxford Nanopore, Великобритания) одновремменно с картированием прочтений (ри-

дов) на референсный геном *Q. robur* (версия 3.1, GCF_932294415.1). Для количественной оценки транскрипционной активности целевых генов был проведен подсчет числа ридов на ген с помощью samtools bedcov с последующей нормализацией данных методом RPG10K (Reads Per Gene per 10,000 reads) (Byrne et al., 2017):

$$RPG10K = \frac{\text{кол} - \text{во ридов на экзон}}{\text{кол} - \text{во ридов в образце}} \cdot 10000.$$

Статистический анализ данных проводился с помощью программы Statistica 12.0 (StatSoft Inc., 2020) с расчетом показателей, принятых для характеристики непараметрических выборок, поскольку данные о содержании флавонолов и антоцианов в листьях имели ненормальное распределение: медиана, 1-й квартиль, 3-й квартиль (Me [Q1÷Q3]). Для оценки значимости различий между контрольной и экспериментальной группами был использован тест Манна-Уитни для двух независимых выборок ($p < 0,05$).

Результаты. В результате проведения эксперимента по моделированию засухи у *Q. robur* были получены два транскриптома: в оптимальных условиях влажности и в условиях засухи (SRA: SRR31824598 (контрольная группа), SRR31824597 (засуха), BioProject: PRJNA1202660). Для количественной оценки транскрипционной активности генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов, данные секвенирования были нормализованы методом RPG10K и на основе них была построена тепловая карта, отображающая относительную транскрипционную активность целевых генов по шкале от 0 до 1 (рис. 1).

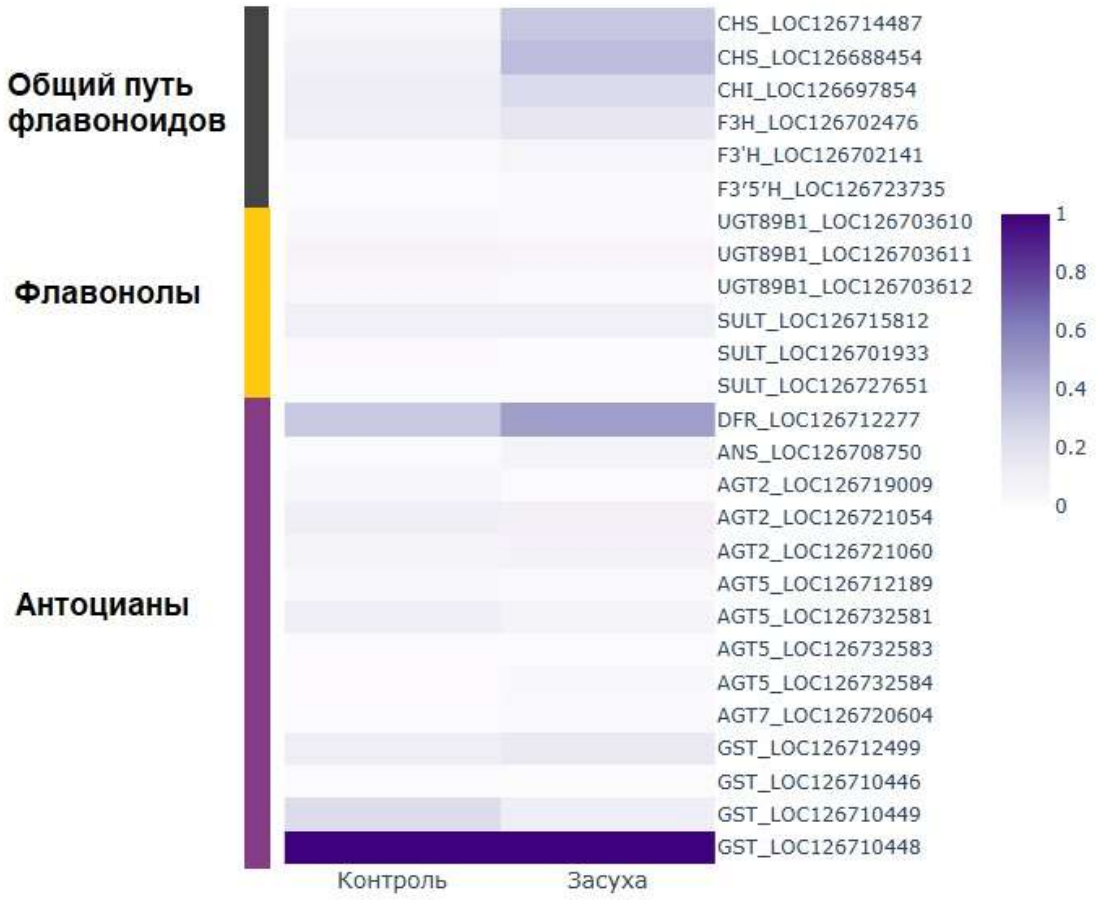


Рис. 1. Тепловая карта транскрипционной анктивности генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов у *Q. robur.* *CHS* – халконсинтаза, *CHI* – халкон-изомераза, *F3H* – флаванон-3-гидроксилаза, *F3'H* – флавоноид-3′-гидроксилаза, F3'5'H – флавоноид-3′,5′-гидроксилаза, *UGT89B1* – флавонол 3-O-гликозилтрансфераза UGT89B1, *SULT* – флавонолсульфотрансфераза, *DFR* – дигидрофлавонол-4-редуктаза, *ANS* – антоцианидинсинтаза, *AGT* – антоцианидинглюкозилтрансфераза, *GST* – глутатион-S-трансфераза

Транскрипционная активность генов общего флавоноидного пути (*CHS*, *CHI*, *F3H, F3'H* и *F3'5'H*), а также двух ключевых генов пути биосинтеза антоцианов (*DFR* и *ANS*), была выше в группе, подвергнутой засухе по сравнению с контрольно группой. Несмотря на в целом низкий уровень экспресси исследуемых генов, разница в активности нескольких из них между контрольной и экспериментальной группами была значительной. Так, транскрипционная активность *ANS* при засухе была в 7 раз выше (0,01 и 0,07 у контрольной и экспериментальной групп соответственно), F3'H – почти в 4 раза выше (0,01 и 0,05 у контрольной и экспериментальной групп соответственно), а F3'5'H экспрессировался только в группе с дефицитом влаги. Также значительно выше при засухе была экспрессия двух генов общего флавоноидного пути *CHS* (0,06, 0,09 и 0,33, 0,39 в контрольной и экспериментальной группе соответственно). В то же время гены, отвечающие за модификации антоцианидинов (*AGT*) и их транспорт и накоппление в вакуолях (*GST*), а также гены модификации флавонолов (*UGT89B1, SULT*) имели одинаковый уровень активности в обеих группах. Можно также заметить, что один из генов транспорта антоцианов имел очень высокий по сравнению с другими генами уровень активности.

Помимо секвнирования траснкриптомов была проведена неинвазивная оценка содержания антоцианов и флавонолов в листьях *Q. robur* (рис. 2). Как в случае антоцианов, так и флавонолов их содержание достоверно различалось у контрольной и экспериментальной групп ($p = 0,001$ и $p = 0,00002$ для антоцианов и флавонолов соответственно). Однако при дефиците флаги содержание антоцианов снижалось по сравнению с контролем, а флавонолов, напротив, увеличивалось.

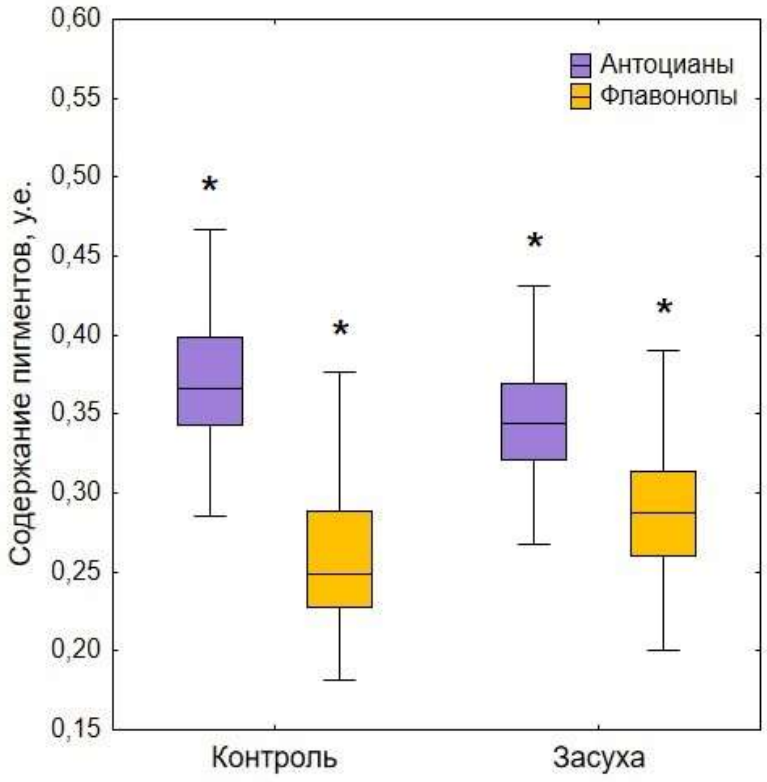


Рис. 2. Содержание антоцианов и флавонолов в листьях *Q. robur* в условиях засухи. * – статистически значимые различия с контрольной группой (критерий Манна-Уитни, при $p < 0,05$)

Обсуждение. Проведенное исследование позволило оценить изменения транскрипционной активности генов, вовлеченных в биосинтез антоцианов и флавонолов у *Q. robur* в условиях засухи. В целом полученные данные демонстрируют сложный и неоднозначный характер ответа растения на засуху.

Повышение транскрипционной активности ключевых генов общего флавоноидного пути (*CHS*, *CHI*, *F3H*, *F3'H*, *F3'5'H*) и специфических генов антоцианового пути (*DFR*, *ANS*) в условиях засухи согласуется с данными, полученными у других видов растений (Ahmed et al., 2021; Kim et al., 2012; Ma et al., 2014). Кроме того, повышение транскрипционной активности генов общего флавоноидного пути может объясняться тем, что они задействованы в синтезе предшественников всех флавоноидов, а не только антоцианов (Gould, 2004; Tanaka et al., 2008).

Наибольшее увеличение транскрипционной активности по равнению с контрольной группой наблюдалось у гена *ANS*. Так как *ANS* является одним из ключевых генов в биосинтетическом пути антоцианов (Guo et al., 2019; Golovko, 2023), это может говорить о более активном синтезе данных соединений в условиях засухи. Однако, вопреки ожиданиям, неинвазивные измерения показали достоверное снижение содержания антоцианов в листьях при дефиците влаги. Это противоречие между транскрипционной активностью генов биосинтетического пути и содержанием антоцианов в литьях может объясняться отсутствием изменений в экспрессии генов, отвечающих за транспорт и накопление антоцианов (*GST*), что могло привести к нарушению процесса переноса и накопления антоцианов в вакуолях. Антоцианы не способны в полной мере выполнять свои защитные функции в клетках без транспорта с с помощью *GST* (Petrussa et al., 2013), поэтому синтезированные антоцианы могут подвергаться деградации в цитоплазме, что может объяснить снижение их содержания в условиях засухи, несмотря на активную работу генов биосинтетического пути. Кроме того, возможно, гены пути биосинтеза антоцианов проявляют большую активность на более ранних стадиях воздействия засухи, как, например, в исследовании (Kim et al., 2012), что говорит о необходимости секвенирования транскриптомов *Q. robur* на более ранних сроках воздействия дефицита влаги. Повышение транскрипционной активности генов синтеза флавонолов, а также увеличение содержания флавонолов при засухе может говорить о компенсации недостатка антоцианов. Это согласуется с их ролью в нейтрализации активных форм кислорода и защите от УФ-излучения (Laoué et al., 2022), негативное влияние которого может возрастать на фоне ослабления фотозащитной функции антоцианов.

Заключение. Было выявлено, что двухнедельный водный дефицит вызывает значительное повышение транскрипционной активности ключевых генов биосинтеза антоцианов, в частности *ANS*, а также генов общего флавоноидного пути (*CHS*, *F3H* и *F3'H*). Однако отсутствие значительных изменений в экспрессии генов модификации (*AGT*) и транспорта (*GST*) антоцианов, наряду с данными спектрального анализа, позволяет предположить, что максимальная транскрипционная активность генов биосинтеза антоцианов может проявляться на более ранних стадиях стресса. Кроме того, наблюдалось увеличение содержания флавонолов в листьях *Q. robur*, что может говорить о компенсации недостатка антоцианов.

Полученные результаты расширяют знания об адаптации *Q. robur* к засухе на молекулярно-генетическом уровне, однако необходимы дальнейшие исследования изменения экспрессии генов пути биосинтеза флавоноидов на более ранних стадиях воздействия засухи.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Крючков С. Н., Иозус А. П., Морозова Е. В. Семеноводство дуба черешчатого в степной зоне Нижнего Поволжья. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;6:569-569. [Kruckov S.N., Iozus A.P., Morozova E.V. Seed production of english oak in the steppe zone of the lower Volga region. *Modern problems of science and education.* 2015;6:569-569].

Морозова Е. В., Иозус А. П., Крючков С. Н. Особенности вегетативного размножения дуба черешчатого для защитного лесоразведения в степной зоне европейской части России. *Успехи современного естествознания*. 2016;12-2:309-313 [Morozova E. V., Iozus A. P., Kryuchkov S. N. Features of vegetative propagation english oak for protective afforestation in the region of the steppes of the European part of the Russian Federation. *Advances in current natural sciences.* 2016;12-2:309-313]

Ahmed U., Rao M. J., Qi C., Xie Q., Noushahi H. A. et al. Expression profiling of flavonoid biosynthesis genes and secondary metabolites accumulation in populus under drought stress. Molecules. 2021;26(18):5546. doi: https://doi.org/10.3390/molecules26185546.

Byrne A., Beaudin A. E., Olsen H. E., Jain M., Cole C. et al. Nanopore long-read RNAseq reveals widespread transcriptional variation among the surface receptors of individual B cells. *Nature communications*. 2017;8(1):16027. doi: https://doi.org/10.1038/ncomms16027.

Falcone Ferreyra M. L., Rius S. P., Casati P. Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. Frontiers in plant science. 2012;3:222. doi: https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00222.

Golovko T. K. Plant anthocyanins: structure, biosynthesis regulation, functions, and ecology. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2023;70(7):161. doi: https://doi.org/10.1134/S1021443723700292.

Gould K. S. Nature′ s swiss army knife: the diverse protective roles of anthocyanins in leaves. *Bio-Med Research International*. 2004;2004(5):14-320. doi: https://doi.org/10.1155/S1110724304406147

Guo N., Han S., Zong M., Wang G., Zheng S., Liu F. Identification and differential expression analysis of anthocyanin biosynthetic genes in leaf color variants of ornamental kale. *BMC genomics*. 2019;20(1):564. doi: https://doi.org/10.1186/s12864-019-5910-z.

Kim B. G., Lee E. R., Ahn J. H. Analysis of flavonoid contents and expression of flavonoid biosynthetic genes in Populus euramericana Guinier in response to abiotic stress. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry. 2012;55(1):141-145. doi: https://doi.org/10.1007/s13765-012-0025-0.

Laoué J., Fernandez C. Ormeño E. Plant flavonoids in mediterranean species: A focus on flavonols as protective metabolites under climate stress. Plants. 2022;11(2):172. doi: https://doi.org/10.3390/plants11020172.

Ma D., Sun D., Wang C., Li Y., Guo T. Expression of flavonoid biosynthesis genes and accumulation of flavonoid in wheat leaves in response to drought stress. Plant physiology and biochemistry. 2014;80:60-66. doi: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.024.

Mannino G., Gentile C., Ertani A., Serio G., Bertea C. M., Anthocyanins: biosynthesis, distribution, ecological role, and use of biostimulants to increase their content in plant foods – a review. *Agriculture*. 2021;11:212. doi: https://doi.org/10.3390/agriculture11030212.

Naing A. H., Kim, C. K. Abiotic stress-induced anthocyanins in plants: Their role in tolerance to abiotic stresses. *Physiologia Plantarum*. 2021;172(3):1711-1723. doi: https://doi.org/10.1111/ppl.13373

Panche A. N., Diwan A. D., Chandra S. R. Flavonoids: an overview. *Journal of nutritional science.* 2016;5:e47. doi: https://doi.org/10.1017/jns.2016.41.

Petrussa E., Braidot E., Zancani M., Peresson C., Bertolini A., Patui S., Vianello A. Plant flavonoids – biosynthesis, transport and involvement in stress responses. International journal of molecular sciences. 2013;14(7):14950-14973. doi: https://doi.org/10.3390/ijms140714950.

Tanaka Y., Sasaki N., Ohmiya A. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *The Plant Journal*. 2008;54(4):733-749. doi: https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03447.x.

Xu W., Dubos C., Lepiniec L. Transcriptional control of flavonoid biosynthesis by MYB-bHLH-WDR complexes*. Trends in plant science*. 2015;20(3):176-185. doi: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.12.001.

Информация об авторе

Зыбинская Полина Алексеевна, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, ORCID 0000-0002-7493-1110.

Information about the author

Zybinskaya Polina Alekseevna, junior researcher, Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, pr-t Universitetskij, 97, zybinskaya-pa@vfanc.ru, ORCID 0000-0002-7493-1110.

Авторский вклад. Автор настоящего исследования принимал непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомился и одобрил представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declares no conflict of interest.

УДК 633.174: 664.23 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.007.65-73

Селекция гибридов зернового сорго на качество крахмала

Кибальник О. П., Каменева О. Б.✉
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Россия

Аннотация. Крахмал один из самых важных видов природного, возобновляемого сырья, применяемого во многих сферах химического синтеза, пищевой, бумажной и многих других видах промышленности. Самым распространенным источником для его получения является зерно злаковых культур. Сорго, наряду с основными сельскохозяйственными культурами (пшеница, кукуруза), также содержит значительное количество крахмала в зерне (70-78 %). Кроме того, благодаря функциональным и технологическим свойствам крахмала, данная культура может рассматриваться как альтернативный источник сырья при выращивании в регионах страны, подверженных частым засухам. Целью исследований являлся подбор родительских компонентов для создания гибридов F1 сорго с улучшенным качеством крахмала в зерне. Так, ЦМС-линии (материнское формы), сорта-опылители (отцовское формы) и созданные на их основе гибриды первого поколения испытывались на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в 2021-2025 гг. (г. Саратов). Проведенные в 2021-2023 гг. исследования позволили в статье отразить результаты кластеризации исходного материала зернового сорго по основным хозяйственно-ценным признакам и выделить наиболее необходимые сорта и ЦМС-линии, входящие в первый, третий и четвертый кластеры, для использования в гибридизации для получения гибридов с высоким содержанием крахмала в зерне. Гибриды F1 на стерильной основе в течение 2024-2025 гг. были оценены по биохимическому составу, в том числе количеству накапливаемого крахмала. Рассчитан гетерозис истинный и гипотипический, коэффициент фенотипического доминирования. В результате проведенных исследований выявлены перпективные родительские формы и гибрид зернового сорго А2 КВВ181/Магистр, характеризующийся 7,29 т/га урожайностью зерна и долей амилозы (21 %) в общем содержании крахмала.

Ключевые слова. Сорго зерновое; родительские формы; гибрид; крахмал; амилоза; амилопектин.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации и тематического плана ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» № 124020300045-3.

Цитирование. Кибальник О. П., Каменева О. Б. Селекция гибридов зернового сорго на качество крахмала // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):65-73. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.007.65-73.

Поступила в редакцию: 21.11. 2025 Принята к печати: 05.12.2025

UDK 633.174: 664.23 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.007.65-73

Breeding of grain sorghum hybrids for starch quality

Kibalnik O. P., Kameneva O. B.✉
Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn", Saratov, Russia

Abstract. Starch is one of the most important natural and renewable raw materials used in chemical synthesis, the food and paper industries, and many other sectors. The most common source of starch is cereal grains. Sorghum, along with major agricultural crops such as wheat and maize, also contains a substantial amount of starch in the grain (70–78%). Moreover, due to the functional and technological properties of starch, sorghum can be regarded as an alternative raw material for cultiva-

✉ – Для контактов/Corresponding author.

tion in drought-prone regions of the country. The aim of the study was to select parental components for producing F1 sorghum hybrids with improved grain starch quali-ty. CMS lines (female parents), pollinator varieties (male parents), and the resulting F1 hybrids were evaluat-ed in field experiments carried out at the experimental station of RosNIISK "Rossorgo" (Saratov) in 2021–2025. The research conducted in 2021–2023 made it possible to classify the initial grain sorghum material into clusters based on major economically valuable traits and to identify the most promising varieties and CMS lines belonging to the first, third, and fourth clusters for use in hybridization aimed at obtaining high-starch hybrids. The F1 hybrids produced on a sterile basis were evaluated in 2024–2025 for their biochemi-cal composition, including starch accumulation. True and hypothetical heterosis, as well as the coefficient of phenotypic dominance, were calculated. As a result, promising parental forms were identified, along with a high-potential grain sorghum hybrid A2 KVV181/Magister, characterized by a grain yield of 7.29 t/ha and an amylose fraction of 21.0% in total starch content.

Keywords. grain sorghum; parental forms; hybrid; starch; amylose; amylopectin.

Finding. The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation and the thematic plan of the Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize, No. 124020300045-3.

For citation. Kibalnik O. P., Kameneva O. B. Breeding of grain sorghum hybrids for starch quality // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):65-73. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.007.65-73.

Received: 21.11. 2025 Accepted: 05.12.2025

Введение. Среди зерновых продовольственных и кормовых культур сорго (*Sorghum bicolor* L. Moench) считается устойчивой к изменению климата, обладающей значительным потенциалом для выращивания в регионах с засушливыми условиями и на менее плодородных почвах. При этом в годы с низкой влагообеспеченностью, влекущие гибель других зерновых, сорго способно генерировать семена и сохранять вегетативную массу зеленой. Кроме того, зерно обладает полноценным по компонентному составу питательных веществ профилем. Эти свойства ставят сорго в один ряд по значимости в обеспечении продовольственной безопасности не только нашей страны, но и мира, с основными стратегическими сельскохозяйственными культурами – пшеницей, кукурузой, рисом, ячменем. Низкая себестоимость возделывания, широкий ареал произрастания и высокая приспособляемость к окружающей среде, подтверждает большой потенциал сорго. При этом, культура в значительной степени отзывчива на плодородие почвы, применение орошения, удобрений, отсутствие стрессоров, что проявляется накоплением полноценных главных питательных компонентов зерна – крахмала и белка (Kaufman et al., 2017; Micaela, Drago, 2020; Wang et al., 2022). Однако, влияние засухи в период цветения у отдельных генотипов может привести к снижению общего содержания крахмала, амилозы и амилопектина (Bing et al., 2014).

Крахмал является основным компонентом эндосперма зерна сорго: на его долю приходится более 80 % от общей массы сухого вещества (Kang et al., 2022; Xiao et al., 2022). Функциональность крахмала сорго, малоотличимого от крахмала кукурузного, а также разнообразие промышленного использования его определяются физико-химическими свойствами, включая клейкие свойства, желатинизацию, ретроградацию, текстуру и кинетику переваривания Поэтому всестороннее изучение качества состава, кристаллической и молекулярной структур позволяет раскрыть конечные его свойства и подобрать необходимые технологические приемы для получения новых модификаций крахмала, что способствует расширению сферы его применения. При этом, крайне важно оставлять задачу по улучшению качества крахмала за селекцией сорго, которая позволит получать специализированные сорта и гибриды, а значит расширит возможности применения природного крахмала как в пищевой, так и в других видах промышленности (Ягофаров и др., 2012; Muhammad et al., 2025).

Природные или нативные крахмалы представляют собой гетерогенную смесь амилозы – линейного полимера, составляющего около 20-25 % из общей массы крахмала, и амилопектина, имеющего разветвленную структуру, на долю которого приходится порядка 80%. Каждая фракция обладает своими уникальными свойствами, которые зависят от структуры молекул. Поэтому в пищевых и химических технологиях, приоритетным направлением является специализированное применение каждой фракции крахмала. Так амилоза с уникальными свойства-

ми природного линейного полимера широко применяется в пищевой, фармацевтической, текстильной, бумажной и многих других видах промышленности. Пленки, полученные на ее основе, характеризуются примерно такой же разрывной прочностью и модулем эластичности, как и целлофановые, но являются абсолютно съедобными. Амилозная пленка используется для упаковки многих видов продуктов питания, в том числе мясных продуктов, сосисок и т. д. Свойства амилозы имеют широкое применение в фармацевтике, не только как оболочка для таблетированных форм, но и как компонент-наполнитель для лекарственного вещества (Руськина, Попова, 2017).

Цель наших исследований состояла в подборе родительских компонентов для создания гибридов F1 сорго с улучшенным качеством крахмала в зерне.

Материалы и методы. Полевые исследования выполнены на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в 2021-2025 гг. Площадь делянок составила в гибридном питомнике и родительских форм – 7,7 м^2. Повторность трехкратная. Густота стояния растений скорректирована вручную: зерновое сорго – 100-150 тыс. раст./га. Посев выполнен широкорядным способом с междурядьями 70 см.

Хозяйственно ценные показатели образцов сорго оценены согласно методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (Головочев, Кириловская, 1989) и широкого унифицированного классификатора СЭВ и международного классификатора СЭВ (Якушевский и др., 1982). Биохимический анализ сухого размолотого зерна сортов и гибридов выполнен на инфракрасном анализаторе Spectra Star 2400, на содержание амилозы в составе крахмала по общепринятой методике (ГОСТ, 2015).

Гетерозис рассчитывали по следующим формулам (Гужов и др., 1999):

$$Г_{истинный} = \frac{F1 - РЛ}{РЛ} \times 100\ \%;$$

$$Г_{гипотетический} = \frac{F1 - Рср}{Рср} \times 100\ \%,$$

где *F*1 – показатель гибрида; *Р*л – показатель лучшей родительской формы; *Р*ср – среднее значение родительских форм.

Коэффициент фенотипического доминирования: $hp = \frac{F1 - РЛ}{РЛ - Рср}$.

Группировку образцов по комплексу селекционных признаков проводили методом кластерного анализа, а достоверность различий между кластерами подтверждали дисперсионным однофакторным анализом на 5 %-ном уровне значимости в программе Агрос 2.09.

Результаты. С целью подбора компонентов для создания новых гибридов с заданными параметрами важно проанализировать основные признаки, по которым ведется селекция, за несколько вегетационных сезонов. В данном случае мы анализировали совокупность селекционных признаков за 2021-2023 гг., различающихся по метеорологическим условиям. Такой подход позволяет выбрать генотипы со стабильным проявлением того или иного признака, независимо от гидротермического режима в период вегетации сорго.

Для группировки отцовских и материнских форм проведена кластеризация по минимуму эвклидовых расстояний 15 образцов по 12 основным селекционным признакам в среднем за 2021-2023 гг. На 12 шаге итерации (Евклидово расстояние равно 19,68) образовались 5 кластеров (рис. 1).

Достоверность различий между группами подтверждается результатами дисперсионного однофакторного анализа по большинству представленных признаков. Существенные различия между кластерами установлены по высоте растений при созревании, длине соцветия, выдвинутости ножки соцветия, содержанию в зерне белка, крахмала и безазотистых экстрактивных веществ (рис. 2).

В первый кластер включены наибольшее количество образцов (РСК Каскад; Л-65/14; Л-251/14; Магистр; Кулон; РСК Инфинити; Сармат). Растения этой группы отличались высотой при созревании (128,3 см), более короткими соцветиями (20,0 см) с выдвинутой ножкой соцветия (22,5 см). Кроме того, образцы данного кластера характеризовались невысоким содержанием белка в зерне (10,18 %), но наибольшим количеством безазотистых экстрактивных веществ (83,67 %).

Второй кластер состоит из селекционной линии Л-50/14 и сорта РСК Кахолонг, которые характеризуются более длинным соцветием (25,0 см) с очень короткой выдвинутостью ножки (14,0 см) и высокой урожайностью (зерно – 5,03 т/га, биомасса – 19,72 т/га). Вместе с тем ли-

стья данных образцов оказались крупные: площадь наибольшего листа составила 201,7 см². Зерно характеризуется высоким содержанием крахмала (76,37 %), БЭВ (83,27 %), но меньшим количеством белка (10,23 %).

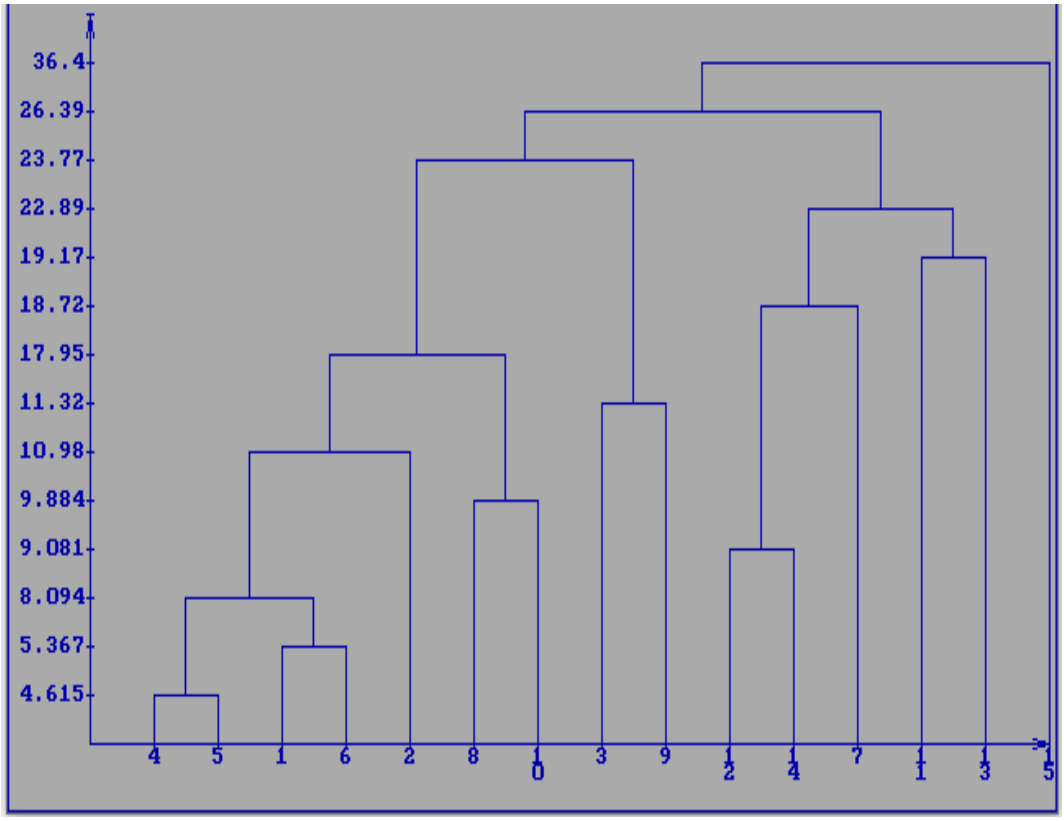


Рис. 1. Дендрограмма сходства компонентов скрещиваний по комплексу селекционных признаков, среднее за 2021-2023 гг. (1 – Л-251/14; 2 – Кулон; 3 – Л-50/14; 4 – РСК Каскад; 5 – Л-65/14; 6 – Магистр; 7 – Аванс; 8 – РСК Инфинити; 9 – РСК Кахолонг; 10 – Сармат; 11 – А1 Ефремовское 2; 12 – А4 КП 70; 13 – А2 КВВ 181; 14 – А2 Восторг; 15 – А2 КВВ 114)

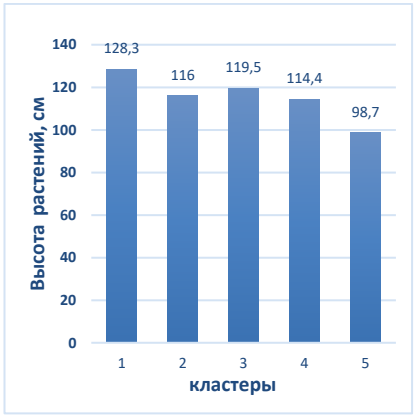
В третий кластер входят две ЦМС-линии А4 КП 70, А2 Восторг и сорт Аванс. Селекционными особенностями данных образцов – более крупное зерно (масса 1000 зерен составила 34,6 г) и соцветие (длина – 25,1 см). В зерне содержится 11,46 % белка, 3,94 % жира, при этом снижены показатели БЭВ и крахмала.

Стерильные линии А1 Ефремовское 2 и А2 КВВ 181, входящие в четвертый кластер, отличались высоким накоплением клетчатки (1,94 %) и белка (11,52 %) в зерне. Линии формировали урожайность биомассы до 19,39 т/га.

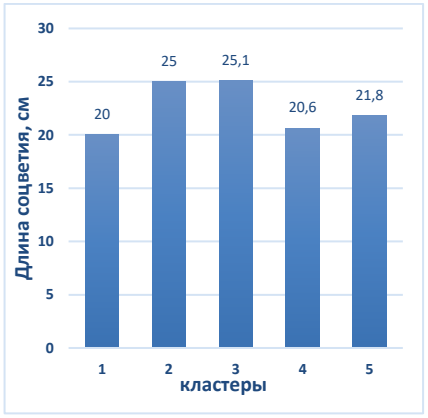
Представителем пятого кластера является одна линия А2 КВВ114, зерно которой отличается сочетанием наибольшего количества крахмала (76,64 %), белка (11,48 %) и жира (4,04 %). При этом, морфометрические признаки и урожайность оказались наименьшими.

В результате проведенной кластеризации ЦМС-линий, перспективных линий и сортов сорго зернового по морфометрическим признакам, биохимическим показателям зерна и продуктивности показаны различия исходного материала (см. рис. 2). Установлено, что образцы 2 и 5 кластеров характеризуются очень высоким содержанием крахмала (76,37-76,64 %), а образцы 1,3,4 кластеров – высоким (73,85-74,59 %). Выявленные различия кластеров по высоте растений при созревании, длине соцветия, выдвинутости ножки соцветия, содержанию в зерне белка, крахмала и безазотистых экстрактивных веществ создают предпосылки для целенаправленной селекционной работы по выведению продуктивных гибридов сорго с высоким выходом крахмала с единицы площади.

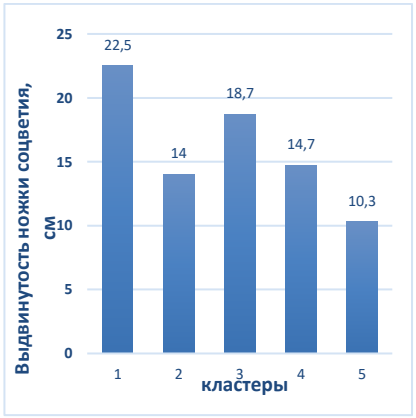
Следующим этапом было создание гибридов с использованием выделенных на основе кластеризации родительских форм. Наиболее перспективные комбинации представлены в табл. 1.



$НСР_{05}$ = 14,26



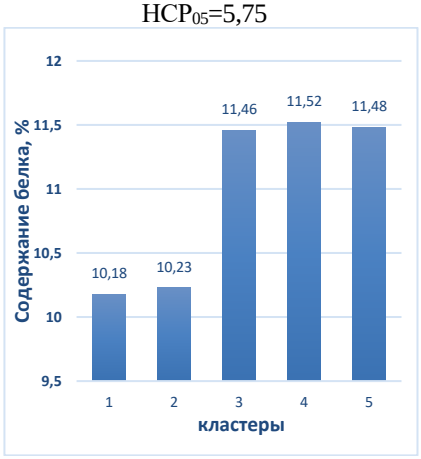
$НСР_{05}$ = 3,82



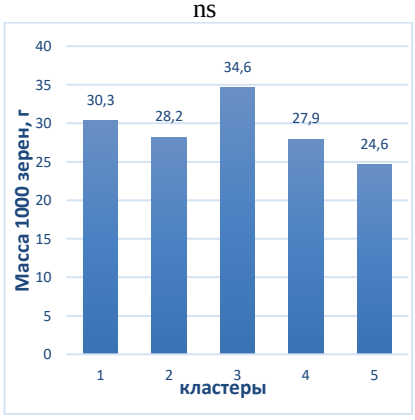
$НСР_{05}$=5,75

ns

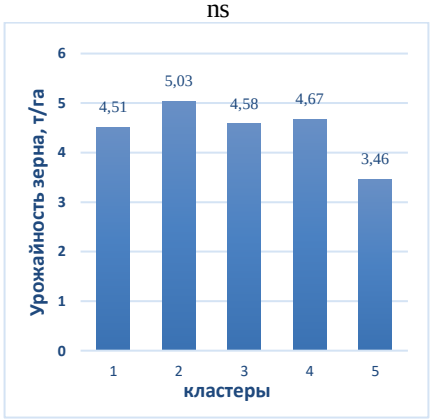
ns



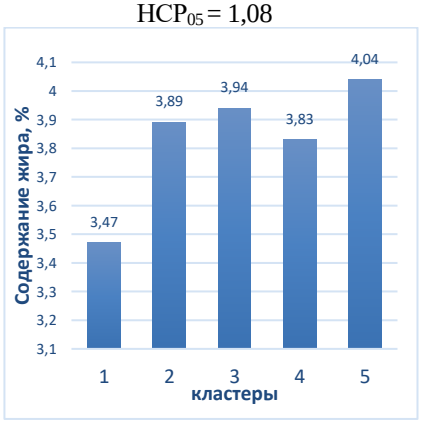
$НСР_{05}$ = 1,08



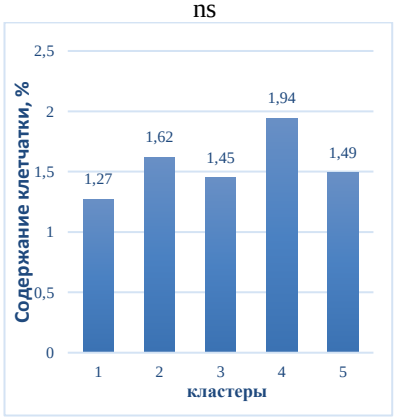
ns



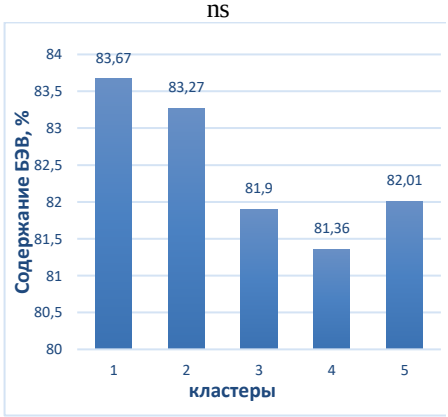
ns



ns



ns



$НСР_{05}$ = 1,30

$НСР_{05}$ = 1,38

Рис. 2. Средние показатели селекционных признаков родительских форм для гибридов сорго, включенных в кластеры, среднее за 2021-2023 гг. Примечание: ns – отсутствие различий на 5 %-ном уровне значимости

Таблица 1

Характеристика гибридов зернового сорго по основным селекционным признакам, среднее за 2024-2025 гг.

Гибрид	Период «всходы – цветение», сут	Высота растений, см	Длина соцветия	Урожайность зерна, т/га	Масса 1000 зерен, г
А2 КВВ 181/Магистр	52,30	155,10	21,9	7,29	34,20
А2 Восторг/Аванс	50,00	129,70	22,6	6,30	29,80
А2 КВВ 181/ Кулон	52,00	147,30	23,3	8,87	33,70
А2 КВВ 181/РСК Каскад	51,30	134,00	22,2	8,12	32,50
$НСР_{05}$	2,27	7,07	1,12	0,38	1,63

Из диаграммы на рис. 3 следует, что истинный гетерозис проявился в двух комбинациях А2 КВВ181/Кулон, А2 Восторг/Аванс и составил 0,8-4,3 %, соответственно. Гипотетический гетерозис установлен у всех комбинаций в интервале 1,2-7,2 %. Коэффициент фенотипического доминирование указывает на проявление свердоминирования в комбинации А2КВВ181/Кулон (hp = 1,05) и неполного доминирования в комбинации А2 Восторг/Аванс (hp = 0,75). У гибрида А2 КВВ181/Аванс наблюдается гибридная депрессия по количеству общего крахмала (hp = –0,28). Интересен тот факт, что у гибридов с разными материнскими формами и одинаковой отцовской формой отмечена различная степень проявления наследования признака, что важно учитывать в селекции на повышение содержания крахмала в зерне сорго.

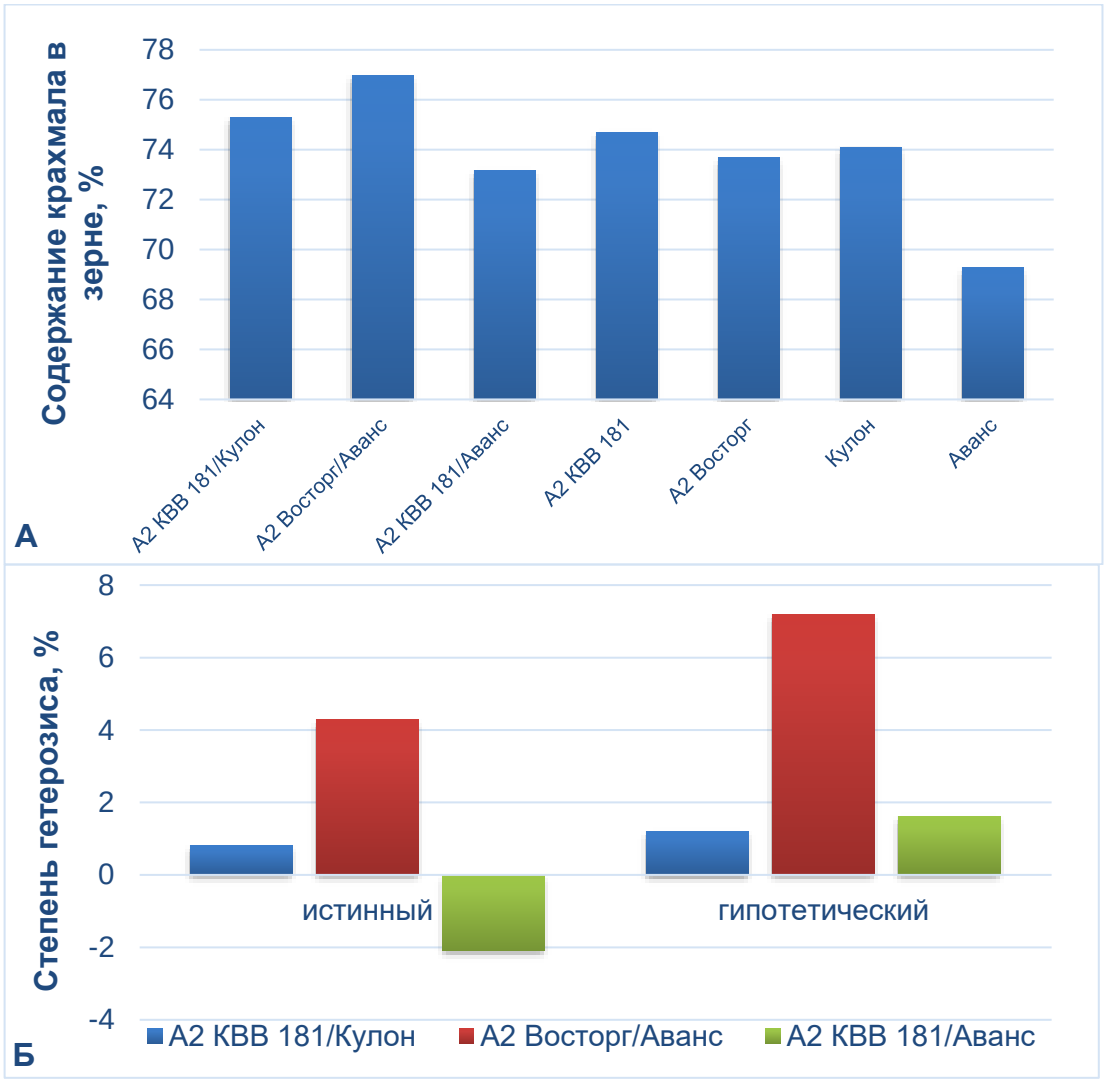


Рис. 3. Содержание крахмала в зерне (А) и степень гетерозиса (Б) у гибридов F1 сорго, 2024 г.

На диаграммах рис. 4 отражены показатели накопления амилозы в крахмале зерна гибридов по сравнению с родительскими формами. Проявление гетерозиса по данному признаку установлено в комбинации с сортом Магистр: истинный гетерозис – 7,7 %, гипотетический – 13,8 %. Доминирование признака оказалось неполным: коэффициент фенотипического доминирования 0,62.

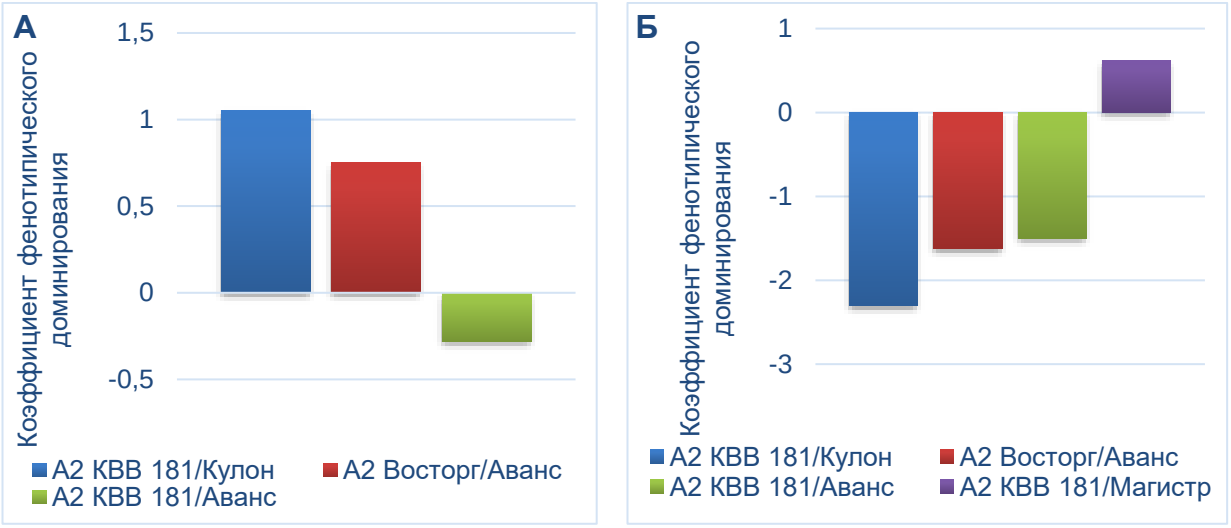


Рис. 4. Коэффициент фенотипического доминирования по содержанию крахмала (А) и амилозы (Б) в зерне гибридов F1 сорго, 2024 г.

Обсуждение. Для выбора компонентов гибридных комбинаций наиболее важная работа заключается в обработке большого массива экспериментальных данных. Поэтому использование методов многомерной статистики значительно облегчает задачу селекционерам и позволяет более точно подобрать исходный материал. Одним из таких методов является кластерный анализ, получивший распространение среди многих сельскохозяйственных культур, в т. ч. и зернового (Кибальник и др., 2023), сахарного сорго (Кибальник, Кибальник, 2023), суданской травы (Куколева и др., 2023).

В результате группировки рабочей коллекции родительских форм зернового сорго выявлены образцы с комплексом необходимых хозяйственно ценных признаков, которые могут быть использованы в селекции гибридов на повышение качества продукции. Наиболее востребованными оказались компоненты первого, третьего и четвертого кластеров. Дальнейшая селекция гибридов способствовала выделению 4 перспективных гибридов, характеризующихся высокой продуктивностью и содержанием крахмала в зерне при возделывании в засушливых условиях.

Крахмал является основным компонентом зерна многих злаковых культур, в т. ч. и сорго, биосинтез и накопление которого, в конечном итоге влияют на урожайность и качество (Xiao et al., 2022). Известно, что в контроле за синтез крахмала в зерне сорго отвечают 5 генов: *Sh 2* (Shrunken 2), *Bt2* (Brittle 2), *SssI* (Soluble starch synthase I), *Ae 1* (Amylose extender 1), *Wx* (Waxy). За формирование типа эндосперма ответственен ген *Wx*. Крахмалистый тип имеет *WxWxWx* комбинацию, средневосковой – *WxWxwx*; *Wxwxwx* и восковой – *wxwxwx* (Ковтунов и др. 2025). Тем не менее, ожидаемый результат от скрещивания родительских форм с особо ценными признаками не всегда имеет накопительный характер, так как общее содержание крахмала, а также соотношение амилозы и амилопектина значительно варьирует в пределах одного вида растений и зависит от многих факторов и условий года. В результате наших исследований установлено, что наследование накопления крахмала носит как промежуточный характер, так и характер сверхдоминирования. Вместе с тем уровень усвояемости крахмала у гибридов F1 соответствовал его уровню у материнских линий, что свидетельствует о важности материнского генотипа в определении этого признака (Elkonin et al., 2013). Также выявлены комбинации, у которых коэффициент фенотипического доминирования составил 0,75-1,05 по содержанию крахмала и 0,62 по количеству амилозы. При этом установлен положительный истинный и гипотетический гетерозис. Так, по совокупности изученных показателей к перспективным гибридам для дальнейших испытаний следует отнести комбинацию А2 КВВ181/Магистр.

Заключение. Высокое содержание крахмала в зерне сорго, а также его функциональные и технологические свойства, позволяет считать сорго перспективным и надежным крахмалоносом. В целом крахмал сорго как природный биополимер по свойствам подходит для получения широкого ассортимента продуктов питания и новых биоразлагаемых и экологичных материалов. Для получения гибридов с высоким содержанием крахмала проведена кластеризация рабочей коллекции родительских форм, которая позволила подобрать перспективные компоненты для скрещиваний, включенные в первый, третий и четвертый кластеры. Созданы гибриды с высоким содержанием крахмала. Наследование крахмала и амилозы носит в основном промежуточный характер. Для дальнейших испытаний выделен среднеранний гибрид А2 КВВ181/Магистр (период «всходы-цветение 52,3 суток), формирующий 7,29 т/га зерна и характеризующийся доминирование по накоплению амилозы.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

ГОСТ ISO 6647-1-2015 Рис. Определение содержания амилозы. Часть1. Контрольный метод. Москва.Стандартинформ,2015. [GOST ISO 6647-1-2015 Fig. Determination of Amylose Content. Part 1. Control Method. Moscow. Standartinform, 2015].

Гужов Ю. Л., Фукс А., Валичек П. Селекция и семеноводство культивируемых растений.М.:1999. [Guzhov Yu. L., Fuchs A., Valichek P. Breeding and Seed Production of Cultivated Plants. Moscow: 1999].

Кибальник О. П., Кибальник С. В. Прогнозирование и подбор исходного материала в селекции сахарного сорго на основе кластеризации. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2024;4(73): 54-61. doi: https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-73-4-54-61 [Kibalnik O. P., Kibalnik S. V. Prediction and selection of initial material in sugar sorghum breeding based on clustering. *Vestnik NGAU = Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University*. 2024;4(73): 54-61. doi: https://doi.org/10.31677/2072-6724-2024-73-4-54-61].

Кибальник О. П., Ларина Т. В., Каменева О. Б. Селекционная ценность засухоустойчивых стерильных линий сорго. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(2): 187-193. doi: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.2.187-193 [Kibalnik O. P., Larina T. V., Kameneva O. B. Breeding value of drought-resistant sterile sorghum lines. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural science of the Euro-North-East*. 2023;24(2): 187-193. doi: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.2.187-193].

Ковтунов В. В., Костылев П. И., Ковтунова Н. А., Игнатьева Н. Г. Закономерности наследования крахмала в зерне гибридов F2 сорго зернового. *Аграрный вестник Урала*. 2015;7(137): 6-11. [Kovtunov V. V., Kostylev P. I., Kovtunova N. A., Ignatieva N. G. Patterns of starch inheritance in grain of F2 sorghum hybrids. *Agrarnyi vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2015;7(137): 6-11].

Куколева С. С., Ефремова И. Г., Калинин Ю. А., Светлов В. В., Колганов Н. А. Кластеризация биохимического состава надземной биомассы суданской травы. *Селекция и сорторазведение садовых культур.* 2023;10(1): 56-64. [Kukoleva S. S., Efremova I. G., Kalinin Yu. A., Svetlov V. V., Kolganov N. A. Clustering of the biochemical composition of the above-ground biomass of Sudan grass. *Selekciya i sortorazvedeniye sadovyh kul'tur = Selection and variety breeding of garden crops.* 2023;10(1): 56-64].

Головочев В. И., Кириловская Е. В. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М., 1989. [Golovochev V. I., Kirilovskaya E. V. Methodology for State Variety Testing of Agricultural Crops. Moscow, 1989].

Руськина А. А., Попова Н. В. Анализ современных способов модификации крахмала как инструмента повышения его технологических свойств. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии».*2017;5(3): 12-20. [Ruskina A. A., Popova N. V. Analysis of modern methods of starch modification as a tool for improving its technological properties. *Vestnik YuUrGU = Bulletin of the South Ural State University. Series "Food and Biotechnology".* 2017;5(3): 12-20].

Ягофаров Д. Ш., Канарский А. В., Сидоров Ю. Д., Канарская З. А. Применение крахмалосодержащего сырья в биотехнической промышленности. *Вестник Казанского технологического университета.*2012;15(12): 208-211. [Yagofarov D. Sh., Kanarsky A. V., Sidorov Yu. D., Kanarskaya Z. A. Application of starch-containing raw materials in the biotechnical industry. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University.*2012;15(12): 208-211].

Якушевский Е. С., Варадинов С. Г., Корнейчук В. А., Баняи Л. Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ возделываемых видов рода Sorghum

Moench. Л., 1982. [Yakushevsky E. S., Varadinov S. G., Korneichuk V. A., Banyai L. The wide unified CEC classifier and the international CEC classifier of cultivated species of the genus *Sorghum* Moench. L., 1982].

Bing Y., Zhou Y. -F., Gao M.-Y., Zhang Z., Han Y., Yang G.-D., Xu W., Huang R.-D. Effect of Drought Stress During Flowering Stage on Starch Accumulation and Starch Synthesis Enzymes in Sorghum Grains. *Journal of Integrative Agriculture*. 2014;13(11): 2399-2406. doi: https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60694-2.

Elkonin L. A., Italianskaya J. V., Fadeeva I. Y., Kozhemyakin V. V., Bychkova V. V. In vitro protein digestibility in grain sorghum: effect of genotype and interaction with starch digestibility. *Euphytica*. 2013;193(3): 327-337. doi: https://doi.org/10.1007/s10681-013-0920-4.

Kang X., Zhu W., Xu T., Sui J., Gao W., Liu Z., Jing H. Cui B., Qiao X., Abd El-Aty A. M. Characterization of starch structures isolated from the grains of waxy, sweet, and hybrid sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Frontiers in Nutrition. 2022;9: 1052285. doi: https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1052285.

Kaufman R. C., Wilson J., Bean S. R., Xu F., Shi Y.-C. Sorghum starch properties as affected by growing season, hybrid, and kernel maturity. *Journal of Cereal Science*. 2017;74: 127-135. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.01.014.

Micaela A., Drago S. R. Comparison of isolation methods and physicochemical characteristics of starches isolated from red and white sorghum hybrids. *Starch-Stärke*.2020;72(11-12):2000023. doi: https://doi.org/10.1002/star.202000023.

Muhammad Kh. Z., Daraz A., Raheela A., Jinsong B. Sorghum starch: Composition, structure, functionality, and strategies for its improvement. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(1): 70101. doi: https://doi.org/10.1111/1541-4337.70101.

Wang Y., Wang J.-S., Dong E.-W., Liu Q.-X., Wu A.-L., Jiao X. -Y. Effect of nitrogen application level on grain starch accumulation at grain filling stage in sorghum spikelets. *Acta Agronomica Sinica*. 2022; 49(7): 1968-1978. doi: https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2023.24152.

Xiao Q., Huang T., Cao W., Ma K., Liu T., Xing F., Ma Q., Duan H., Ling M., Ni X., Liu Z. Profiling of transcriptional regulators associated with starch biosynthesis in sorghum (Sorghum bicolor L.). *Frontiers in Plant Science*. 2022;13: 999747. doi: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.999747.

Информация об авторах

Кибальник Оксана Павловна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», 410050, Россия, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, д. 4 e-mail: kibalnik79@yandex.ru ORCID 0000-0002-1808-8974.

Каменева Ольга Борисовна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ РосНИИСК «Россорго», 410050, Россия, г. Саратов, 1-й Институтский проезд, д. 4 e-mail:kamenewa.olga2012@yandex.ru ORCID 0000-0003-0270-197.

Information about authors

Kibalnik Oksana Pavlovna, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institu-tion “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”; 410050, Russian Federation, Saratov, 1st Institutskiy proezd, 4; e-mail: kibalnik79@yandex.ru. OR-CID: 0000-0002-1808-8974.

Kameneva Olga Borisovna, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Maize”; 410050, Russian Federation, Saratov, 1st Institutskiy proezd, 4, e-mail: kamenewa.olga2012@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0270-1970.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author’s contribution. Author of this research paper have directly participated in the planning, executionandanalysisofthisstudy. Authors of this paperhave read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 631.52 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.008.74-80

Изменение экспрессии гена *psbA* у *Robinia pseudoacacia* L. на разных фенологических стадиях в засушливых условиях

Третьякова А. В.✉,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Россия

Аннотация. Изучение молекулярных механизмов функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений в условиях засухи имеет важное значение для оценки их адаптивного потенциала и дальнейшего использования в агролесомелиорации. *Robinia pseudoacacia* L. является одним из наиболее часто используемых видов для выращивания в засушливых регионах благодаря высокой устойчивости к неблагоприятным условиям среды, например, засухи. Ключевую роль в работе фотосистемы II играет белок D1, кодируемый геном *psbA*, транскрипционная активность которого может служить индикатором состояния фотосинтетического аппарата при стрессах. В настоящем исследовании была проведена оценка уровня транскрипционной активности гена *psbA* у двух популяций R. pseudoacacia на разных фенологических стадиях — облиствение, бутонизация, цветение и окончание созревания плодов — в условиях естественной засухи. Амплификация гена и выраженные пики плавления были получены только на стадиях бутонизации и цветения, тогда как на этапе облиствения и стадии окончания созревания плодов сигнал был крайне низким или отсутствовал, что указывает на минимальную транскрипционную активность *psbA* в эти периоды. Статистическая обработка выявила достоверное снижение экспрессии *psbA* на стадиях бутонизации и цветения внутри обеих популяций, а также значимые различия между популяциями на стадии цветения, что отражает возможные различия в адаптационных реакциях на засуху. Полученные результаты свидетельствуют о важной роли *psbA* как маркера состояния фотосистемы II и могут быть использованы при отборе устойчивых генотипов для защитного лесоразведения в засушливых условиях.

Ключевые слова. *Robinia pseudoacacia L., транскрипционная активность генов, psbA, засуха, фенологические фазы, агролесомелиорация*

Финансирование. Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FNFE-2025-0013 «Управление экспрессией генов, вовлеченных в процесс адаптации к неблагоприятным факторам внешней среды, для улучшения хозяйственно-ценных признаков древесно-кустарниковых и культурных растений, используемых в агролесомелиорации».

Цитирование. Третьякова А. В. Изменение экспрессии гена *psbA* у *Robinia pseudoacacia* L. на разных фенологических стадиях в засушливых условиях // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):74-80. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.008.74-80.

Поступила в редакцию: 23.10.2025 Принята к печати: 27.11.2025

UDC 631.52 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.008.74-80

Changes in *psbA* gene expression in *Robinia pseudoacacia* L. at different phenological stages under drought conditions

Tretyakova A. V.✉
Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», Volgograd, Russia

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Abstract. The study of the molecular mechanisms underlying the functioning of the photosynthetic apparatus of woody plants under drought conditions is essential for assessing their adaptive potential and for their further use in agroforestry and land reclamation. *Robinia pseudoacacia* L. is one of the most widely used species for cultivation in arid regions due to its high tolerance to adverse environmental conditions, including drought. A key role in the operation of photosystem II is played by the D1 protein encoded by the psbA gene, whose transcriptional activity can serve as an indicator of the state of the photosynthetic apparatus under stress. In the present study, the transcriptional activity of the psbA gene was evaluated in two populations of R. pseudoacacia at different phenological stages-leafing, budding, flowering, and the end of fruit maturation-under natural drought conditions. Gene amplification and distinct melting peaks were obtained only during the budding and flowering stages, whereas at the leafing stage and the end of fruit maturation, the signal was extremely low or absent, indicating minimal psbA transcriptional activity during these periods. Statistical analysis revealed a significant decrease in psbA expression between the budding and flowering stages within both populations, as well as significant differences between the populations at the flowering stage, which may reflect variation in drought-adaptation responses. The results highlight the important role of psbA as a marker of photosystem II status and demonstrate its potential use in selecting drought-resistant genotypes for protective afforestation in arid environments.

Keywords. *Robinia pseudoacacia* L., gene transcriptional activity, psbA, drought, phenological stages, agroforestry reclamation.

Funding. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FNFE-2025-0013 «Regulation of gene expression involved in the adaptation to adverse environmental factors to improve economically valuable traits of woody and cultivated plants used in agroforestry».

For citation. Tretyakova A. V. Changes in *psbA* gene expression in *Robinia pseudoacacia* L. at different phenological stages under drought conditions // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):74-80. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.008.74-80.

Received: 23.10.2025 Accepted: 27.11.2025

Введение. *Robinia pseudoacacia* L. (белая акация) – один из наиболее распространенных быстрорастущих древесных видов, активно используемых в условиях засушливого климата на юге России. Благодаря таким ценным свойствам, как высокая засухоустойчивость, способность переносить засоление почв, а также формировать мощную корневую систему и ажурную крону, R. pseudoacacia широко применяется в защитном лесоразведении, агролесомелиорации и городском озеленении. Этот вид успешно используется для создания ветрозащитных лесных полос, укрепления склонов и оврагов, предотвращения эрозии почв (Манаенков, Абакумова, 2015; Трещевская и др., 2017; Крючков и др., 2023).

Одним из ключевых факторов, ограничивающих рост и продуктивность растений в степных и засушливых районах, является водный дефицит (Soma et al., 2021). В условиях недостатка влаги растения активируют широкий спектр адаптивных механизмов, направленных, в том числе, на поддержание фотосинтетической активности, стабилизацию работы фотосистем и минимизацию повреждений, вызванных стрессом (Osakabe et al., 2014)

Понимание молекулярных механизмов, обеспечивающих устойчивость *R. pseudoacacia* к засухе, имеет важное значение для повышения эффективности ее использования в агролесомелиорации и селекционной работе. Одним из способов определения функционального состояния фотосинтетического аппарата растений является активность генов, кодирующих белки фотосистем.

Ген *psbA* кодирует белок D1, являющийся ключевым компонентом реакционного центра фотосистемы II (PSII). Белок D1 обеспечивает перенос электронов в процессе фотосинтеза и играет центральную роль в функционировании и устойчивости PSII (van Wijk K. et al., 1997). Известно, что D1 – один из наиболее уязвимых белков фотосистемы, быстро подвергающийся фотодеструкции под действием света, засухи и других абиотических стрессов. Для поддержания фотосинтетической активности растения используют механизм постоянного обновления белка D1, включающий деградацию поврежденных молекул и синтез новых (Murata N. et al., 2007; Inagaki et al., 2022).

Изменения в экспрессии гена *psbA* отражают адаптацию фотосинтетического аппарата к стрессовым условиям. Показано, что уровень транскрипции *psbA* изменяется при засухе, высоких температурах и при действии абсцизовой кислоты, а в некоторых случаях повышенная экспрессия *psbA* способствует большей устойчивости растений к водному дефициту (Huo Y. et al., 2016; Martins et al., 2023). Таким образом, *psbA* может рассматриваться как молекулярный маркер функционального состояния фотосистемы II и общей стрессоустойчивости растений.

Фенологическая стадия развития растения существенно влияет на интенсивность фотосинтетических процессов и уровень транскрипционной активности генов, связанных с фотосинтезом. В разные фенофазы активность фотосинтетических генов может изменяться в зависимости от физиологического состояния растения и перераспределения метаболических ресурсов между вегетативными и репродуктивными органами (Song, Wang, 2023; Bao et al., 2024). Кроме того, популяции, произрастающие в различных экологических условиях, могут характеризоваться различными паттернами экспрессии генов, связанных с ответом на стресс, что отражает локальную адаптацию к климатическим и почвенным особенностям среды (Van Wallendael A. et al, 2019).

В связи с этим исследование экспрессии гена *psbA* у двух популяций *R. pseudoacacia* на разных фенологических стадиях представляет интерес для понимания механизмов регуляции фотосинтетической активности в засушливых условиях Волгоградской области и для оценки адаптивного потенциала данного вида. Полученные данные могут быть использованы при отборе устойчивых форм *R. pseudoacacia* для защитного лесоразведения и агролесомелиорации в засушливых регионах.

Цель исследования – оценить экспрессию гена *psbA* у двух популяций *R. pseudoacacia* на разных фенологических стадиях с целью выявления особенностей регуляции фотосинтетического аппарата в засушливых условиях.

Материалы и методы. Сбор образцов производился у двух популяций *R. pseudoacacia* на территории питомника ФНЦ агроэкологии РАН (координаты: 48°31'21"N 44°34'47"E) и Кировского селекционно-семеноводческого комплекса (ССК) (координаты: 48°37'04"N 44°22'52"E). На обоих участках условия умеренного антропогенного воздействия. Образцы листьев были собраны с 15 растений с каждого участка во время следующих фенофаз: облиствение (конец апреля), бутонизация (начало мая), цветение (середина мая) и окончание созревания плодов (конец августа). Свежесобранные образцы помещали в криопробирки со стабилизатором РНК St-100 (Биолабмикс, Россия), после чего хранили при -80 °С до выделения РНК.

Участок питомника ФНЦ агроэкологии РАН (П1) – условия произрастания *R. pseudoacacia* L. отличны тем, что исследуемые древесные растения располагаются близко относительно друг друга – сомкнутость крон около 80-90 %. В следствие этого, несмотря на очень схожий флористический состав травянистого яруса, его обилие здесь намного ниже, чем в Кировском ССК. Почва светло-каштанового типа. Верхний древесный ярус представлен исключительно *R. pseudoacacia* L. Кустарниковый ярус состоит из *Ribes aureum* Pursh. высотой около 1,8 м. По краю грунтовой дороги, проходящей вдоль посадки, произрастает *Rhus typhina* L. высотой от 1,6 м до 3 м, образующий большое количество поросли. Травянистый ярус довольно скудный и представлен по большей части мезофитами – *Festuca pratensis* Huds., *Poa trivialis* L., *Elymus repens* L. и др. У *R. pseudoacacia* не было выявлено каких-либо следов заболеваний и серьезных повреждений, что свидетельствует о хорошем жизненном состоянии деревьев.

Участок Кировского ССК (П2) расположен на возвышенной относительно города территории, где преобладающими видами являются *R. pseudoacacia, Gleditsia triacanthos* L. и *Cotinus coggygria* Scop, а также единичные особи *Ulmus pumila* L. Почва светло-каштанового типа. Высота *R. pseudoacacia* в среднем составляет от двух до четырех метров, сомкнутость крон 50-60 %. Основу травянистого покрова формируют ксеромезофитные растения, высота которых в среднем составляет 0,3-0,5 м. *R. pseudoacacia* активно дает поросль, образуя тем самым нижний древесный ярус. У *R. pseudoacacia* было отмечено хорошее жизненное состояние.

Выделение РНК из листьев и ОТ-ПЦР-РВ с референсным геном *ACT*, отобранным нами ранее как наиболее стабильно экспрессирующимся в условиях засухи у *R. pseudoacacia,* проводилось по методике, описанной ранее (Tretyakova et al., 2024). В таблице 1 указаны нуклеотидные последовательности праймеров и их температуры отжига (T_m). Праймеры к гену *psbA* (MT120809.1) были подобраны с помощью онлайн-сервиса Primer-BLAST, а праймеры к гену *ACT* взяты из статьи (Liu et al., 2023). Относительная транскрипционная активность целевых генов была рассчитана по методу $2^{-\Delta\Delta Ct}$ (Livak, Schmittgen, 2001)

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в программе Statistica 12.0 (StatSoftInc., США), где были рассчитаны медиана, 1-й и 3-й квартиль. Достоверность различий между независимыми выборками оценивалась с помощью критерия Манна-Уитни ($p < 0,05$), между зависимыми выборками – по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$).

Таблица 1

Последовательности праймеров и температуры их отжига

Ген	Прямой (5'→ 3')	Обратный (5'→ 3')	Температура отжига (T_m), °C
psbA	CTGGAGGGGCAGCAATGAAA	GGGGTCGCTTCTGTAACTGG	64
ACT	CAAAGTGATGCCCTTGTGAC	TCGTGGATTGGGTCGGTG	60

Результаты. В результате анализа кривых плавления было выявлено, что транскрипционная активность гена *psbA* варьирует на разных фенологических фазах. Не на всех стадиях было зафиксировано образование выраженного пика плавления (рис. 1). Согласно данным ана-

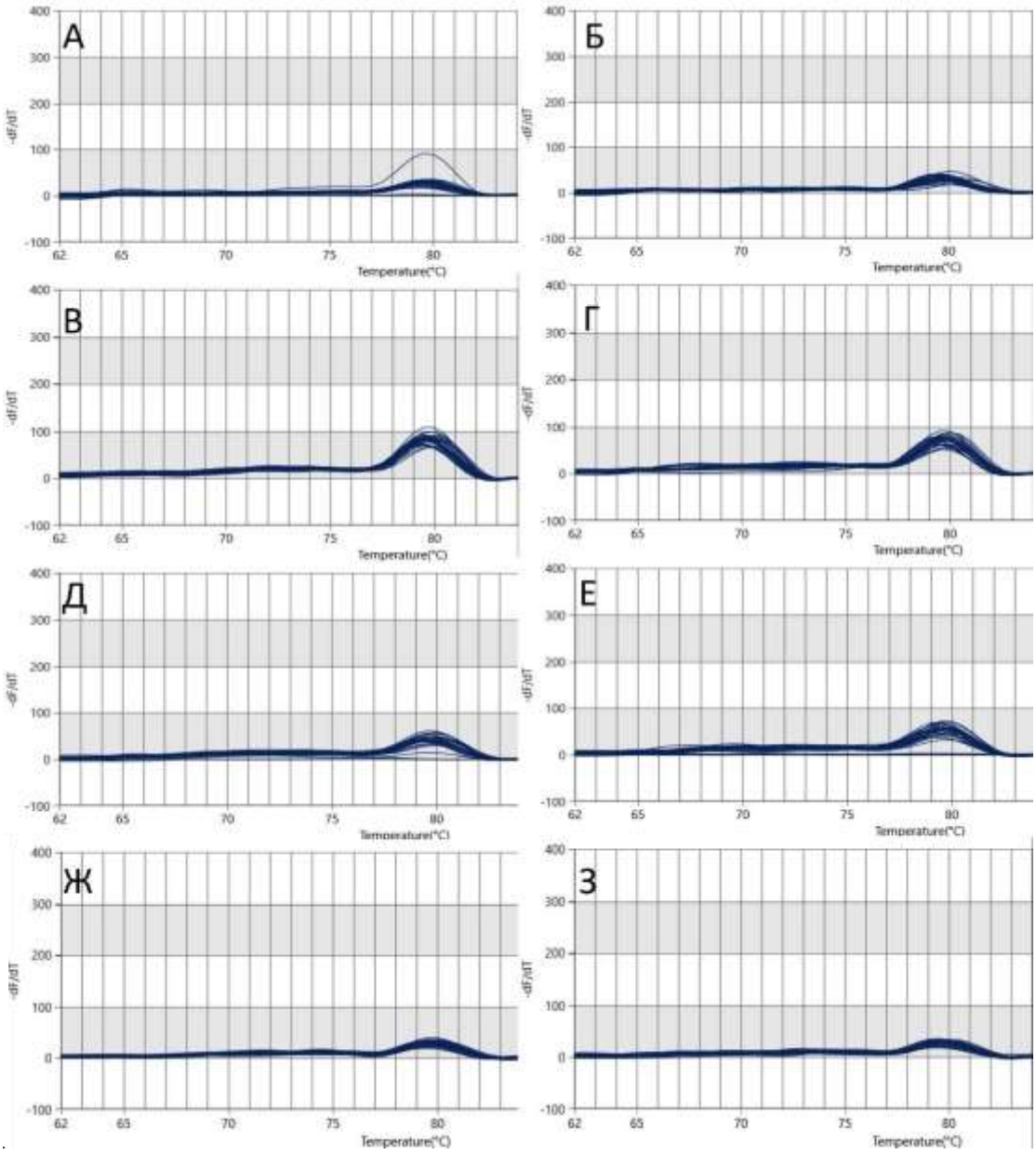


Рис. 1. Пики плавления продукта амплификации *psbA R. pseudoacacia* на разных участках и фенологических фазах. А-П1 на стадии облиствения, Б-П2 на стадии облиствения, В-П1 на стадии бутонизации, Г-П2 на стадии бутонизации, Д-П1 на стадии цветения, Е-П2 на стадии цветения, Ж-П1 на стадии окончания созревания плодов, З-П2 на стадии окончания созревания плодов

лиза кривых плавления, которые отражают температуру денатурации двойной спирали амплифицированного фрагмента ДНК и используется для подтверждения наличия ПЦР-продукта, на стадиях облиствения и конца созревания плодов интенсивность пика плавления была значительно ниже по сравнению с другими фазами, что указывает на крайне низкий уровень амплифицированного продукта. Наибольшая интенсивность пика наблюдалась на фазе бутонизации, несколько ниже – на фазе цветения, что может указывать на активность гена в ранние репродуктивные фазы. Однако стоит отметить, что, несмотря на различия пиков, ПЦР-продукты на каждой фазе имели схожие характеристики плавления, подтверждая специфичность амплификации целевого фрагмента ДНК.

Дальнейший анализ относительной экспрессии гена *psbA* с использованием метода количественной ПЦР в реальном времени выявил статистически достоверные различия как между популяциями, так и между фенологическими стадиями (рис. 2). На стадии цветения уровеньтранскрипционной активности *psbA* достоверно различался между двумя исследуемыми популяциями ($p < 0,0007$). Медиана значений относительной экспрессии в популяции П2 (0,15) была примерно в 7,5 раза выше, чем у П1 (0,02), что указывает на более высокую транскрипционную активность гена *psbA* в популяции П2 в период цветения.

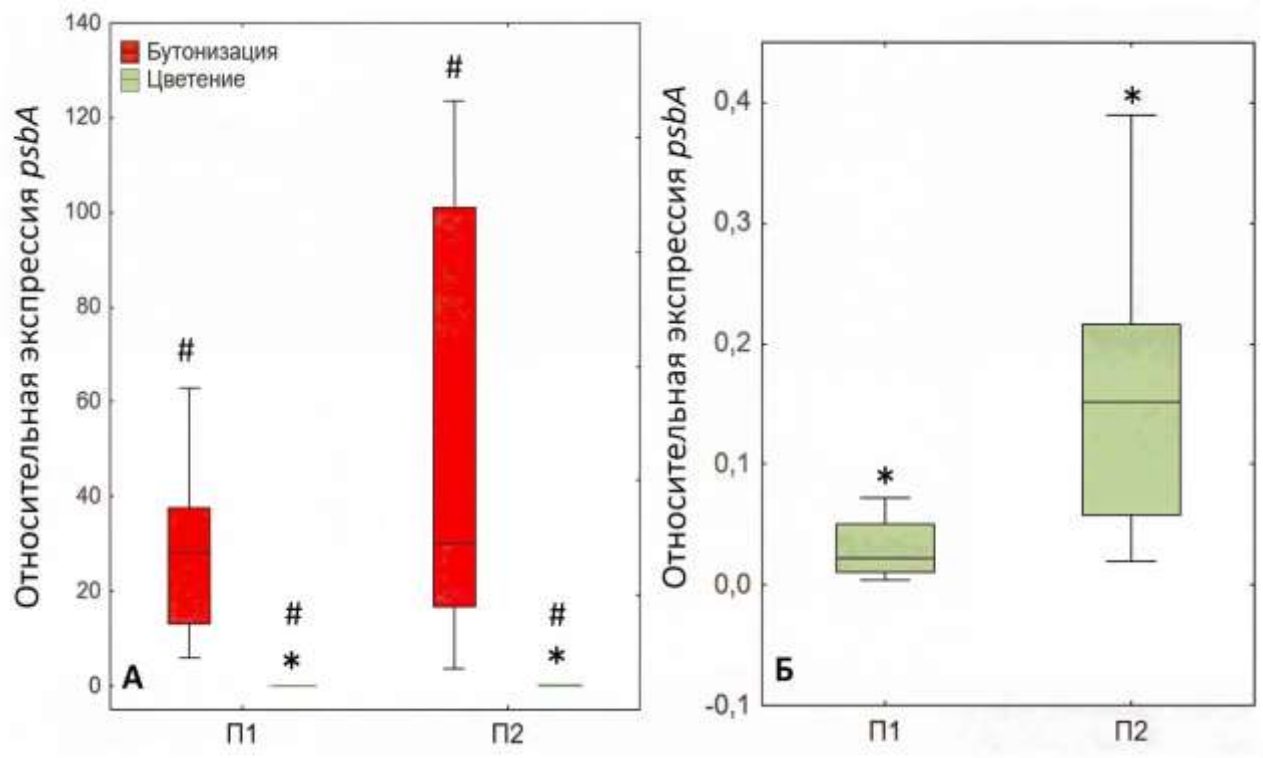


Рис. 2. Относительная экспрессия гена *psbA* у *R. pseudoacacia*: А – между популяциями и фенологическими фазами; Б – увеличенное изображение между популяциями во время фазы цветения. *– статистически значимые различия между популяциями (критерий Манна-Уитни, $p < 0,05$), # – статистически значимые различия внутри группы (критерий Вилкоксона, $p < 0,05$)

Также были выявлены существенные различия и внутри популяций ($p < 0,0009$). В популяции П1 уровень транскрипционной активности *psbA* на стадии бутонизации был значительно выше, чем на стадии цветения. Так, медиана значений относительной экспрессии на стадии бутонизации (28,23) была в 1410 раз выше, чем на стадии цветения (0,02). В популяции П2 аналогичная тенденция сохранилась: уровень транскрипционной активности также снижался от фазы бутонизации (30,6) к фазе цветения (0,15), и медиана значений на стадии бутонизации была в 204 раза выше, чем значение медианы на фазе цветения.

Эти данные свидетельствуют о максимальной активности гена *psbA* в период бутонизации *R. pseudoacacia* с последующим снижением к фазе цветения, что может быть связано с изменением фотосинтетического аппарата растения на разных этапах развития.

Обсуждение. Низкий или отсутствующий пик плавления на ранней и поздней фенологических стадиях отражает физиологически обусловленные колебания экспрессии гена *psbA* в ответ на развитие листьев и возможные засушливые условия среды. Эти колебания могут быть напрямую связаны с изменением уровня транскрипционной активности гена *psbA*, кодирующего белок D1 реакционного центра фотосистемы II, на разных этапах онтогенеза растения.

На ранней стадии облиствения, когда листья еще не полностью сформированы и происходит формирование фотосинтетического аппарата, транскрипционная активность *psbA* остается низкой (Mulo et al., 2012). Однако во время фазы бутонизации наблюдается наиболее высокий уровень экспрессии *psbA*, что объясняется активным развитием фотосинтетических тканей и усилением синтеза белков фотосистем. На стадии цветения транскрипционная активность снижается вследствие перераспределения метаболических ресурсов на генеративные органы. К фазе окончания созревания плодов она падает до минимальных значений. Это снижение может быть обусловлено как естественным старением листьев, так и действием абиотического стресса, например, засухи, которая ускоряет деградацию белков фотосистемы II и повреждение D1-субъединицы (Huo et al., 2016).

Таким образом, наблюдаемые различия в уровне транскрипционной активности *psbA* между фенологическими стадиями, включая резкое снижение при переходе от бутонизации к цветению, связаны с изменением состояния фотосинтетического аппарата растения в ходе онтогенеза и влиянием внешних факторов, таких как засушливые условия (Mulo et al., 2012; Martins et al., 2023).

Заключение. Анализ транскрипционной активности гена *psbA* на разных фенологических фазах *R. pseudoacacia* показал, что она зависит от стадии развития растения и условий среды. Выраженные пики плавления были получены только на стадиях бутонизации и цветения, тогда как на ранней фазе облиствения и в период окончания созревания плодов сигнал был крайне слабым или отсутствовал. Это указывает на низкий уровень транскрипции *psbA* в эти периоды и, вероятно, снижение активности фотосинтетического аппарата.

Статистический анализ показал резкое падение экспрессии *psbA* при переходе от бутонизации к цветению в обеих популяциях (с уменьшением медианы в 1410 раз у П1 и в 204 раза у П2), что отражает перестройку метаболизма растения и перераспределение ресурсов на генеративные органы. При этом между популяциями были выявлены достоверные различия на стадии цветения: экспрессия гена *psbA* у П2 была примерно в 7,5 раза выше, чем в П1, что может указывать на лучшую адаптацию данной популяции в засушливых условиях.

Общее снижение уровня экспрессии и отсутствие четких пиков плавления на ранней (облиствение) и поздней (конец созревания плодов) стадиях, вероятно, связано с низкой фотосинтетической активностью молодых и стареющих листьев, а также с воздействием засушливых условий, которые дополнительно подавляют транскрипцию генов, связанных с фотосинтезом.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Крючков, С. Н., Солонкин, А. В., Соломенцева, А. С., Жолобова, О. О. Элементы технологии размножения Robinia pseudoacacia L. для защитного лесоразведения в условиях деградации и опустынивания территорий. Аридные экосистемы. 2023;1(94):96-104. DOI: https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-96-104. [Kryuchkov S. N., Solonkin A. V., Solomentseva A. S., Zholobova O. O. Propagation technology of Robinia pseudoacacia L. for protective afforestation in degraded and desertified territories. Arid Ecosystems. 2023;1(94):96–104. DOI: https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-96-104].

Манаенков А. С., Абакумова Л. И. Повышение эффективности полезащитного лесоразведения в острозасушливых районах России. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015;4(28):73-83. [Manaenkov A. S., Abakumova L. I. Increase in efficiency of field-protective for-estations in critical droughty regions of Russia. Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. NatureManagement. 2015;4(28):73-83.

Трещевская Э. И., Тихонова Е. Н., Малинина Т. А., Навалихин С. В. Использование робинии лжеакации (Robinia pseudoacacia L.) для облесения техногенно нарушенных земель. Лесотехнический журнал. 2017;3(27):151–157. DOI: https://doi.org/10.12737/article_59c2273cd022e3.42507886. [Treshchevskaya E. I. et al. The use of Robinia pseudoacacia for afforestation of post-mining lands. 2017;3(27):151–157. DOI: https://doi.org/10.12737/article_59c2273cd022e3.42507886].

Bao Y. et al. Light and light signals regulate growth and development in woody plants. Forests. 2024;15(3):523. DOI: https://doi.org/10.3390/f15030523.

Huo Y., Wang M., Wei Y., Xia Z. Overexpression of the maize psbA gene enhances drought tolerance through regulating antioxidant system, photosynthetic capability, and stress defense gene expression in tobacco. Frontiers in Plant Science. 2016;6:1223. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01223.

Inagaki N. Processing of D1 protein: A mysterious process carried out in chloroplasts. Int. J. Mol. Sci. 2022;23(5):2520; https://doi.org/10.3390/ijms23052520.

Liu S. et al. The lectin gene TRpL1 of tetraploid Robinia pseudoacacia L. response to salt stress. Journal of Forestry Research. 2023;34(2):497–505. DOI: https://doi.org/10.1007/s11676-022-01479-0.

Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2^-ΔΔCT method. Methods. 2001;25(4):402-408. DOI: https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262.

Martins J., Neves M., Canhoto J. Drought-stress-induced changes in chloroplast gene expression in two contrasting Arbutus unedo genotypes. Plants. 2023;12(24):4133. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12244133.

Mulo P., Sakurai I., Aro E. M. Strategies for psbA gene expression in cyanobacteria, green algae and higher plants: from transcription to PSII repair. Biochim. Biophys. Acta. 2012;1817(1):247-257. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2011.04.011.

Murata N., Takahashi S., Nishiyama Y., Allakhverdiev S. I. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. Biochim. Biophys. Acta. 2007;1767(6):414-421. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2006.11.019.

Osakabe Y., Osakabe K., Shinozaki K., Tran L. S. P. Response of plants to water stress. Frontiers in Plant Science. 2014;5:86. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086.

Soma F., Takahashi F., Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. Cellular phosphorylation signaling and gene expression in drought stress responses: ABA-dependent and ABA-independent regulatory systems. Plants. 2021;10:756. DOI: https://doi.org/10.3390/plants10040756.

Song G., Wang Q. Seasonal dynamics of photosynthetic nitrogen content and partitioning in deciduous forests. Photosynthesis Research. 2023;156(3):355-366. DOI: https://doi.org/10.1007/s11120-022-00992-x.

Tretyakova A. V., Zybinskaya P. A., Krylov P. A. Selection of reference genes for gene expression analysis by RT-qPCR in Robinia pseudoacacia L. under drought conditions. Scientific Agronomy Journal. 2024;4:43-47. DOI: https://doi.org/10.34736/FNC.2024.127.4.006.43-47.

Van Wijk K. J. et al. Synthesis and assembly of the D1 protein into photosystem II. Biochemistry. 1997;36(20): 6178-6186. DOI: https://doi.org/10.1021/bi962921l.

Van Wallendael A. et al. A molecular view of plant local adaptation: incorporating stress-response networks. Annual Review of Plant Biology. 2019;70:559-583. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100114.

Информация об авторе

Третьякова Анна Вадимовна, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, e-mail: tretaykova@vfanc.ru, ORCID: 0009-0001-4478-4711.

Information about the author

Tretyakova Anna Vadimovna, Junior Researcher, Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences”, 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., e-mail: tretaykova@vfanc.ru, ORCID: 0009-0001-4478-4711.

Авторский вклад. Автор настоящего исследования принимал непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Ознакомился и одобрил представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Author’s contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Each of the authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 575.22 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.009.81-90

Генотипирование *Quercus robur* L. на территории Ставропольского края

Кузьмин П. А.✉, Магомедова М. О., Молитвина Е. В.
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», Волгоград, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью сохранения генетических ресурсов дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) – важнейшей лесообразующей породы Европейской части России, испытывающей значительное воздействие климатических изменений. Учащение засух, аномальных температур и других абиотических стрессов требует разработки эффективных стратегий идентификации и сохранения генетического разнообразия вида. Особую значимость приобретают исследования, направленные на выявление адаптационного потенциала популяций в различных экологических условиях. Основной целью работы являлась оценка генетического полиморфизма двух локальных популяций *Q. robur* (QR5 и QR97), произрастающих в различных почвенно-климатических условиях Ставропольского края, с использованием ISSR-маркеров. Для анализа использовались 8 ISSR-праймеров на основе динуклеотидных повторов. Экстракция ДНК проводилась CTAB-методом, амплификации с последующей визуализацией результатов электрофорезом в агарозном геле. Обработка данных включала создание бинарных матриц и анализ в программе POPGENE с расчетом основных популяционно-генетических параметров: числа аллелей, генного разнообразия Нея, индекса Шеннона и индекса полиморфного информационного содержания (PIC). Результаты исследования выявили значительный уровень генетического разнообразия в обеих популяциях. Показатель полиморфных локусов составил 71,21 % для QR97 и 69,70 % для QR5. Наибольшее количество полиморфных локусов обнаружено при использовании праймера UBC815. Значения PIC варьировали от 0,23 до 0,39, что подтверждает достаточную информативность большинства использованных маркеров. Популяция QR97, произрастающая в более стрессовых условиях, характеризовалась более высокими показателями генетического разнообразия. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов для отбора устойчивых генотипов и планирования мероприятий по защитному лесоразведению и восстановлению дубрав.

Ключевые слова. *Quercus robur* L.; генотипирование; ISSR-маркеры; генетический полиморфизм.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания № FNFE-2025-0007 «Генотипирование древесных и кустарниковых пород устойчивых к ограничивающим рост и развитие факторам внешней среды».

Цитирование. Кузьмин П. А., Магомедова М. О., Молитвина Е. В. Генотипирование *Quercus robur* L., произрастающего в условиях Ставропольского края // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):81-90. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.009.81-90.

Поступила в редакцию: 06.10.2025 Принята к печати: 05.12.2025

UDC 575.22 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.009.81-90

Genotyping of *Quercus robur* L. growing in the Stavropol Krai

Kuzmin P. A.✉, Magomedova M. O, Molitvina E. V.
Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Abstract. The relevance of this study is determined by the need to preserve the genetic resources of pedunculate oak (*Quercus robur* L.), a key forest-forming species in the European part of Russia that is being significantly affected by climate change. The increasing frequency of droughts, extreme temperatures, and other abiotic stresses necessitates the development of effective strategies for identifying and conserving the species' genetic diversity. Research aimed at revealing the adaptive potential of populations in different ecological conditions is of particular importance. The main objective of this work was to assess genetic polymorphism in two local populations (QR5 and QR97) of Q. robur that grow under different edaphic and climatic conditions in Stavropol Krai using ISSR markers. Eight ISSR primers based on dinucleotide repeats were used for the analysis. DNA extraction was performed using the CTAB method, followed by amplification and visualization of the results using agarose gel electrophoresis. Data processing included construction of binary matrices and analysis using the POPGENE software to calculate key population-genetic parameters: number of alleles, Nei's gene diversity, Shannon's index, and the polymorphism information content (PIC) index. The results revealed a significant level of genetic diversity in both populations. The percentage of polymorphic loci was 71.21 % for QR97 and 69.70 % for QR5. The highest number of polymorphic loci was detected using the UBC815 primer. The PIC values ranged from 0.23 to 0.39, which confirms that most of the markers used are sufficiently informative. Population QR97, growing under more stressful conditions, was characterized by higher genetic diversity indicators. The practical significance of the study lies in the potential application of these results for selecting stress-tolerant genotypes and for planning protective afforestation and oak woodland restoration

Keywords. *Quercus robur* L.; genotyping; ISSR markers; genetic polymorphism.

Funding. The study was carried out within the state assignment No. FNFE-2025-0007 "Genotyping of tree and shrub species resistant to environmental factors limiting growth and development".

For citation. Kuzmin P. A., Magomedova M. O., Molitvina E. V. Genotyping of *Quercus robur* L. growing in the Stavropol Krai // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):81-90. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.009.81-90.

Received: 06.05.2025 Accepted: 05.12.2025

Введение. Генотипирование является одним из ключевых методов современной генетики, позволяющим изучать генетическое разнообразие и структуру популяций растений (Чесноков, Косолапов, 2016). Повышенный интерес в данном контексте представляет дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) – вид, имеющий важное экологическое и хозяйственное значение. Принадлежа к наиболее многочисленному роду (*Quercus*, ~600 видов) в семействе *Fagaceae*, *Q. robur* играет ключевую роль в формировании лесных экосистем, обеспечивая защиту почв от эрозии (Стаменов, 2024).

Ставропольский край характеризуется разнообразием климатических условий, которые оказывают значительное влияние на растительные сообщества и создает уникальную возможность для изучения адаптационного потенциала древесных видов. Природные условия Нефтекумского и Степновского р-нов Ставропольского края отличаются засушливостью, особенностями почв и растительности. Эти различия связаны с географическим положением, рельефом и климатом районов (Лапенко и др., 2020).

В первом преобладают светло-каштановые почвы, толщина почвенного слоя – от 30 до 50 см. Климат этой территории резко-континентальный, характеризуется более умеренными температурами и относительно равномерным распределением осадков (500-600 мм в год). Летний период продолжительный, с частыми суховеями. Для территории Степновского р-на, расположенной в сухостепной зоне на каштановых почвах, характерна скудная растительность. Она сохранилась только на землях, непригодных для пахоты, – на склонах балок и около населенных пунктов (Лапенко и др., 2020).

Значительные площади заняты песками, а среднее плодородие почв ниже среднекраевых показателей. Почвенный покров здесь отличается наличием солонцов и различной степенью засоления, что создает дополнительные стрессовые факторы для древесной растительности. Для этой местности характерны более экстремальные климатические условия: выраженная континентальность климата, меньший объем осадков (300-400 мм в год), частые засухи и

суховеи. Для района характерны ковыльно-типчаковые степи с примесью полупустынной полынно-солянковой растительности (Лапенко и др., 2020).

Такие существенные различия в почвенно-климатических условиях между районами произрастания исследуемых популяций представляют особый научный интерес. Они позволяют оценить, как различные экологические факторы влияют на генетическую структуру и адаптационный потенциал *Q. robur*. В условиях наблюдаемых климатических изменений подобные исследования приобретают особую актуальность, так как позволяют прогнозировать устойчивость древесных видов к изменяющимся условиям среды.

Метод ISSR-маркирования (Inter Simple Sequence Repeats) заключается в амплификации регионов геномной ДНК, расположенных между повторами простых последовательностей (микросателлитами). Он широко применяется в популяционно-генетических исследованиях благодаря своей простоте, высокой воспроизводимости и информативности (Ng, Tan, 2015). Этот метод позволяет выявлять полиморфизм на уровне ДНК, что особенно важно для видов с высокой генетической вариабельностью, таких как *Q. robur*.

Целью данной работы является генотипирование двух популяций *Q. robur* с использованием ISSR-маркеров для оценки их генетического полиморфизма в условиях Ставропольского края. Полученные результаты могут быть использованы для разработки стратегий сохранения генетических ресурсов вида, а также для понимания его адаптационного потенциала в условиях засушливого климата.

Материалы и методы. Работа выполнена в 2025 г. в лаборатории молекулярной селекции Федерального научного центра агроэкологии РАН (г. Волгоград). Материалом для исследования послужили образцы двух популяций (по 18 объектов в каждой), собранные на территории Северо-Кавказского филиала ФНЦ агроэкологии РАН. Первая популяция (QR5) расположена на 5 участке первого дендрологического насаждения Нефтекумского р-на (координаты: 44.536475, 44.928671), вторая популяция (QR97) находится на территории участкового лесничества Степновского р-на (координаты: 44.341679, 44.81165) (рис. 1).

Материально-методическая база в данной работе основана на ранее проведенных исследованиях по генотипированию *Robinia pseudoacacia* L. (Кузьмин и др., 2025). Методика проведения анализа генетической структуры растительных объектов отличается универсальностью для экстрагирования ДНК CTAB-методом, установления ее концентрации, проведения ПЦР и постановки электрофореза. В качестве отличительных черт выделяется применение различных праймеров, имеющих иные последовательности и температуры отжига, что ведет к редактированию параметров проведения амплификации (табл. 1).

В данном случае, амплификацию проводили на термоциклере Applied Biosystems QuantStudio 5 (Thermo Fisher Scientific, США) по следующему профилю: начальная денатурация при 95°С – 10 мин, 40 циклов амплификации (денатурация 95 °С/30 с, отжиг при температурах 55,0 °С для UBC841, 52,4 °С для UBC811/815/826/834/836/840 или 49, °С для UBC807 – 30 с, элонгация 72 °С/60 с), финальная элонгация 72°С – 10 мин.

Визуализацию продуктов амплификации осуществляли методом электрофореза в 2 % агарозном геле в TAE-буфере с детекцией бромистым этидием (6 мкл/200 мл геля). В качестве маркера молекулярных масс использовали Step50 plus (0,1 мг/мл). Документирование результатов проводили с помощью системы гель-визуализации iBright CL1500.

В качестве дополнительного контроля эффективности праймеров проанализировали частоту встречаемости каждого локуса у *Q. robur* на основе электрофореграмм ампликонов. В дополнение, индекс полиморфного информационного содержания (PIC), характеризующий информативность локусов, рассчитали на основе двоичных матриц с помощью формулы (Чесноков, Артемьева, 2015) (табл. 2):

$$PIC = 1 - \sum_{i=1}^{n} P_i^2,$$

где *i* – *i*-й аллель *j*-го маркера, *n* — число аллелей *j*-го маркера, *P* – частота аллелей.

Анализ полиморфизма включал подсчет количества и частоты встречаемости ампликонов для каждого праймера на основе трех независимых повторностей. Оценку ISSR-локусов проводили по бинарной системе (1 – наличие, 0 – отсутствие ампликона) с помощью программы «Microsoft Excel 2010». Для статистической обработки данных использовали двоичные матрицы, анализируемые в программе POPGENE v.1.31. Рассчитывали следующие популяционно-генетические параметры: наблюдаемое (n_a) и эффективное (n_e) число аллелей, генное разнообразие Нея (h), информационный индекс Шеннона (I).

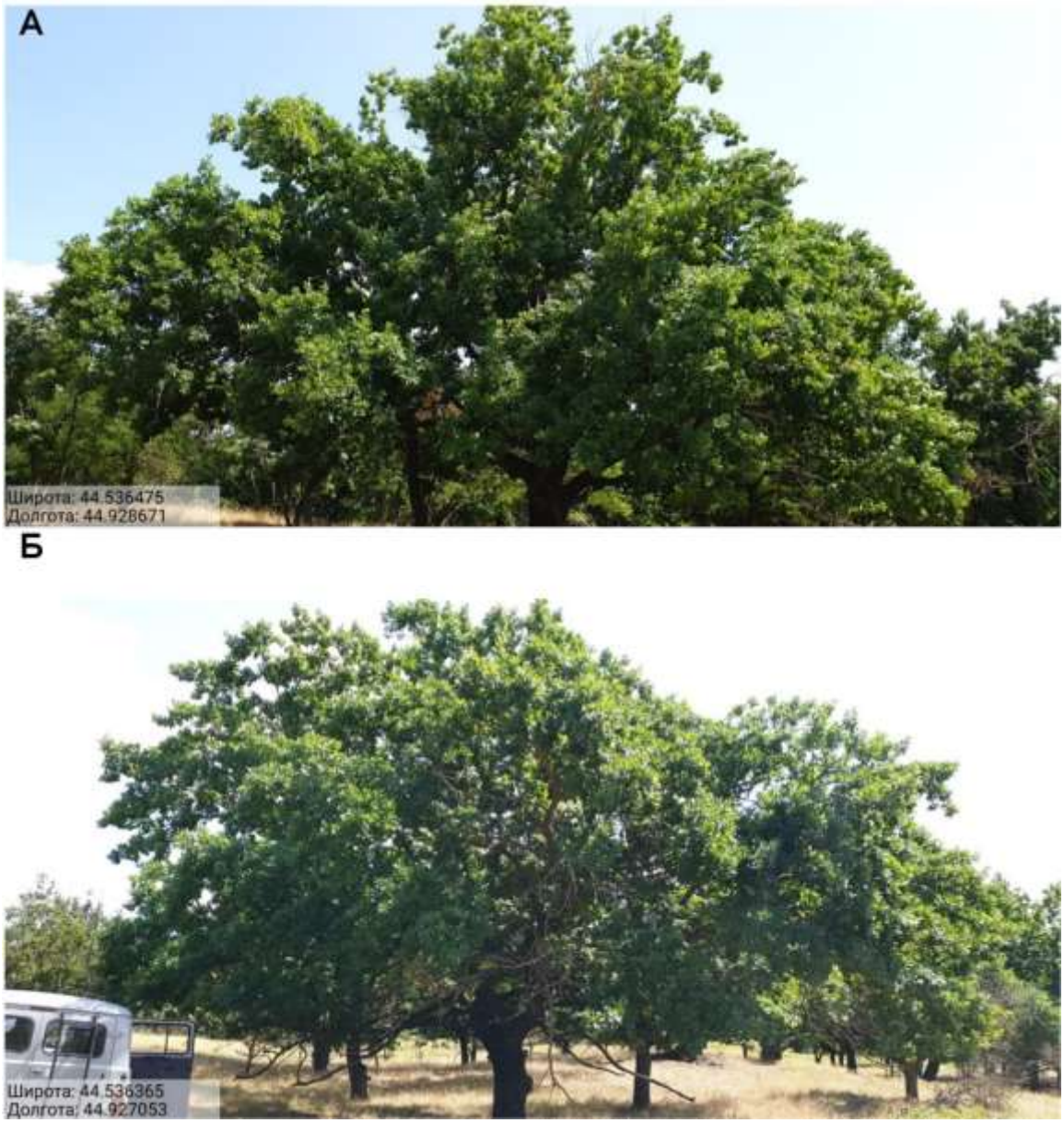


Рис. 1. Местоположения *Q. robur,* А – (QR5), Б – (QR97)

Таблица 1

Праймеры ISSR, используемые в данном исследовании

Название	Последовательность ′5–3′	Температура отжига праймера, (Tm, °C)
UBC807	(AG)8T	49,9
UBC811	(GA)8C	52,4
UBC815	(CT)8G	52,4
UBC826	(AC)8C	52,4
UBC834	(AG)8Y	52,4
UBC836	(AG)8YA	52,4
UBC840	(GA)8YT	52,4
UBC841	(GA)8YC	55

Результаты. В ходе исследования осуществлялось тестирование ISSR-праймеров, используемых ранее в аналогичной работе (Рябуха, Кузьмин, 2025) при генотипировании популяций *Q.robur*, произрастающих на территории Волгоградской обл. Как результат, были отобраны 8 прай-

Таблица 2

Оценка изученных ISSR локусов популяций *Q. robur*

Название праймера	Длины фрагментов (п.н.)	Фрагменты		PIC
		QR97	QR5	
1	2	3	4	5
UBC807	250	-	0,06	0,24
	300	0,83	0,72	
	400	1,00	0,72	
	450	-	0,06	
	500	1,00	-	
UBC811	300	-	1,00	0,35
	350	0,44	-	
	400	0,56	0,94	
	450	-	0,39	
	500	0,72	0,11	
	600	0,94	0,94	
	700	0,50	-	
	750	0,22	-	
	800	0,44	-	
	1000	0,56	-	
UBC815	250	-	0,06	0,23
	300	0,11	-	
	350	0,22	0,78	
	400	0,28	0,72	
	500	0,17	0,56	
	600	0,11	0,06	
	700	0,06	0,06	
	800	-	0,06	
	1000	-	0,11	
UBC826	200	0,06	-	0,33
	250	-	0,17	
	300	0,39	0,83	
	350	0,44	0,28	
	400	1,00	0,94	
	450	-	0,94	
	500	0,94	-	
	600	0,44	-	
	700	0,22	-	
	800	0,83	-	
UBC834	250	-	0,61	0,32
	300	0,17	0,56	
	350	0,17	-	
	400	-	0,72	
	450	-	0,44	
	500	0,72	0,72	
	600	0,61	0,56	
	700	0,06	0,06	
	1000	-	0,06	
UBC836	300	0,94	1,00	0,39
	350	0,94	-	
	400	0,22	0,94	
	450	-	0,33	
	500	0,61	0,67	
	600	0,44	0,50	
	700	0,06	0,50	
	800	0,44	-	
	1000	-	0,56	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
UBC840	300	0,94	0,94	0,28
	500	0,89	0,83	
	600	0,72	0,56	
	700	0,06	-	
	800	0,44	0,44	
UBC841	250	0,28	-	0,28
	300	-	0,72	
	350	0,89	0,50	
	400	0,56	0,94	
	450	0,06	-	
	500	0,89	0,89	
	800	0,44	-	
	1000	0,17	-	

меров, которые отличились уровнем амплификации (достаточным количеством фрагментов ДНК) (табл. 3). Главным отличием данной работы стал процент полиморфности праймеров. В сравнении с прошлыми данными (50,0 %) праймер UBC815 показал 83,3 и 62,5 % соответственно для двух популяций, что указывает на большую генетическую вариабельность и неоднородность распределения признаков.

Таблица 3

Результат анализа ISSR-спектров ампликонов популяций *Q. robur*

Праймер	Популяция	Граница длин локусов спектра, п. н.	Число локусов в спектре	Число полиморфных локусов	Процент полиморфности
UBC807	QR97	250-500	3	0	0
	QR5		3	1	33,3
UBC811	QR97	300-1000	8	0	0
	QR5		5	1	20,0
UBC815	QR97	250-1000	6	5	83,3
	QR5		8	5	62,5
UBC826	QR97	200-800	8	0	0
	QR5		5	1	20,0
UBC834	QR97	250-1000	5	3	60,0
	QR5		8	2	25,0
UBC836	QR97	300-1000	7	1	14,3
	QR5		7	0	0
UBC840	QR97	300-800	5	1	20,0
	QR5		4	0	0
UBC841	QR97	200-1000	8	3	37,5
	QR5		5	0	0

Количество фрагментов составляло от 3 до 8. Размер фрагментов варьировал от 200 до 1000 п. н. Максимальное количество локусов в спектре для QR97 отмечено при использовании праймеров UBC811, UBC826, UBC841. Для QR5 – UBC815, UBC834, UBC836. При этом наибольшее число полиморфных локусов в обеих популяций приходится на UBC815 и UBC834, а для QR97 еще и UBC841 (рис. 2).

Информативность маркеров (PIC) определяется количеством аллелей и частотой их встречаемости в изучаемой выборке. Согласно общепринятой классификации (Roy et al., 2023), локусы с PIC больше 0,5 рассматриваются как высокополиморфные, значения в диапазоне 0,25-0,50 соот-

ветствуют умеренному полиморфизму, а показатели ниже 0,25 свидетельствуют о низком индексе полиморфного содержания.

Исходя из полученнойоценки ISSR локусов популяций *Q. Robur*, в данном случае видно, что значения PIC варьирует от 0,23 до 0,39. Такие значения указывают на то, что праймеры достаточно информативные. Исключением являются праймеры UBC807 и UBC815, так как значения ниже 0,25 говорят о слабой информативности праймера. Несмотря на число выявленных аллелей, они не отличаются высокой частотой встречаемости внутри популяций.

Генетическое разнообразие популяций *Q. robur* оценивали с помощью программы POPGENE на основе бинарных матриц. Рассчитанные параметры генетической изменчивости представлены в (табл. 4).

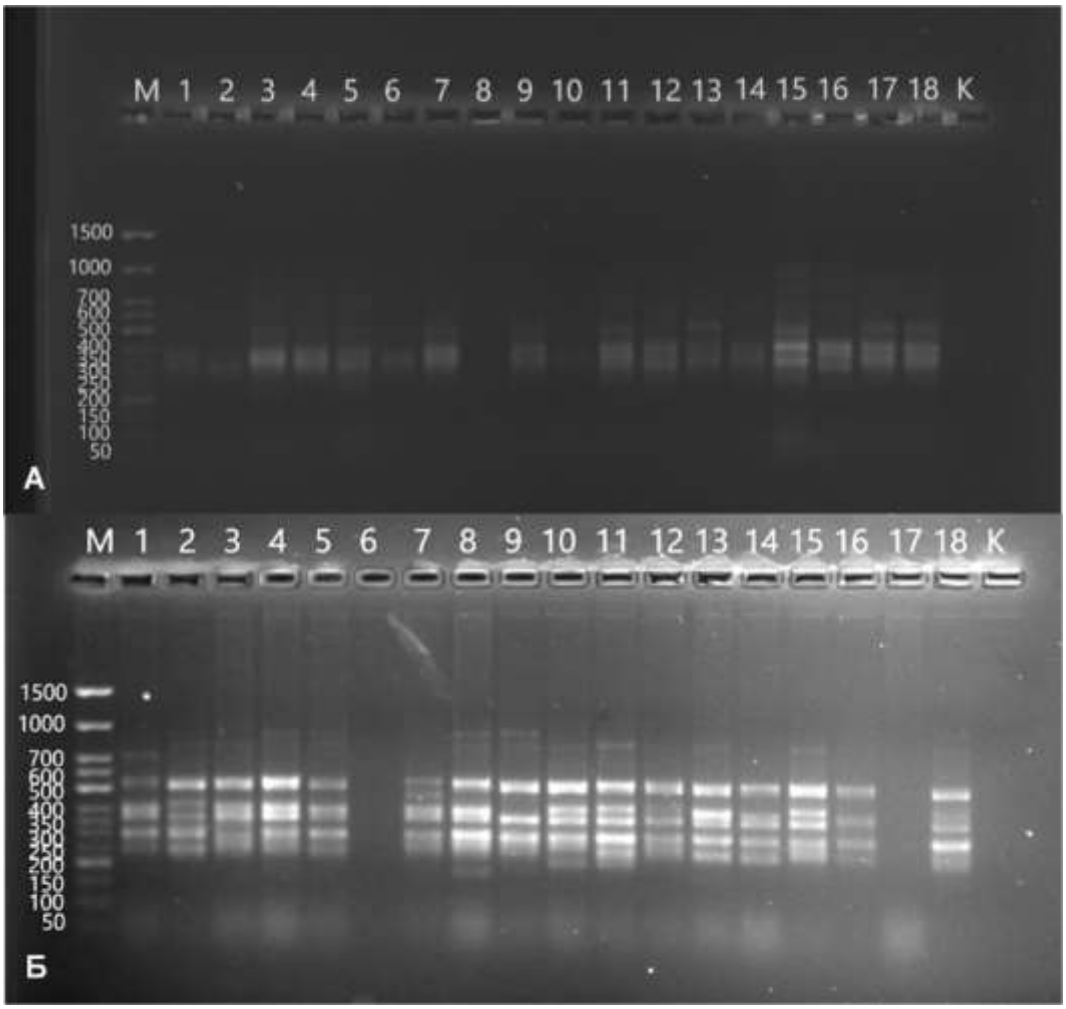


Рис. 2. Электрофореграммы ампликонов *Q. Robur* (А – QR5 (UBC815), Б – QR97 (UBC841), К – отрицательный контроль, М – ДНК маркер Step50 plus)

Таблица 4

Значения показателей генетического разнообразия популяций *Q. robur*

Populations	n_a	n_e	h	I	Процент polymorphic loci
QR97	1,71 ± 0,46	1,36 ± 0,35	0,22 ± 0,19	0,33 ± 0,27	71,21
QR5	1,70 ± 0,46	1,40 ± 0,39	0,23 ± 0,20	0,35 ± 0,29	69,70

Примечание: n_a – абсолютное число аллелей на локус; n_e – эффективное число аллелей на локус; h – разнообразие генов; I – информационный индекс Шеннона; у всех вышеуказанных параметров даны стандартные отклонения.

Обсуждение. В научной литературе имеются сведения о результатах генетической структуры различных популяций растений с использованием ISSR-маркеров (Кузнецов, 2021; Nikonoshina et al., 2016; Gemmill, Grierson, 2021). Высокий уровень полиморфизма указывает на высокий уровне генетического разнообразия (Soraisham et al., 2025). В ряде исследований отмечается связь между уровнем генетического разнообразия и устойчивостью популяций к неблагобриятным изменениям в окружающей среде (Bo et al., 2025). С возрастанием генетического разнообразия увеличивается устойчивость популяции растений (Diallo et al., 2024).

Полученные в работе данные свидетельсвуют о том, что у популяций *Q. robur*, произрастающей на территории Ставропольского края ++наблюдается достаточно высокий уровень полиморфизма. Популяция QR97 характеризовалась более высокими показателями генетического разнообразия (n_a = 1,71 ± 0,46; n_e = 1,36 ± 0,35; h = 0,22 ± 0,19), а также на 2% более высоким уровнем полиморфизма по сравнению со второй популяцией. Это указывает на то, что вторая популяция является генетически более гомогенной. Исследование полиморфизма межмикросателлитных локусов с помощью праймеров позволяет анализировать генетическое разнообразие как внутри отдельных популяций *Q. robur*, так и между различными популяциями. Выявление популяций с высоким уровнем полиморфизма этих маркеров представляет научную и практическую ценность. Полученные результаты исследования могут стать одним из этапов в разработке методик и рекомендаций по укреплению существующих экотипов *Q. robur* и сохранению защитных насаждений данной территории.

В исследованиях, проведенных на территории Ростовской области, изучено генетическое разнообразие пяти ценопопуляций дуба черешчатого. Выявлен высокий уровень генетической дифференциации естественных ценопопуляций (GST = 1,0350), при этом степень полиморфизма была различной (Chokheli et al., 2018). Такие исследования в дальнейшем способствуют расширению генетического фонда *Q. robur*, что способствует его эффективному воспроизводству. Кроме того, полученные данные могут служить для отбора перспективных генотипов, обладающих повышенной устойчивостью к различным стрессовым факторам окружающей среды.

Заключение. Результаты исследования показали, что обе популяции характеризуются высоким уровнем полиморфизма, при этом популяция QR97, произрастающая в более засушливых условиях Степновского р-на, демонстрирует несколько более высокие показатели (71,21 % полиморфных локусов) по сравнению с популяцией QR5 из Нефтекумского р-на (69,70 %). Это согласуется с данными по эффективному числу аллелей (n_e = 1,36 ± 0,35 для QR97 и 1,40 ± 0,39 для QR5) и индексу Шеннона (I = 0,33 ± 0,27 и 0,35 ± 0,29 соответственно), что свидетельствует о значительном генетическом разнообразии обеих популяций.

Максимальное количество локусов в спектре для QR97 отмечено при использовании праймеров UBC811, UBC826, UBC841. Для QR5 – UBC815, UBC834, UBC836. При этом наибольшее число полиморфных локусов в обеих популяций приходится на UBC815, что подтверждает его высокую информативность для изучения генетической структуры *Q. robur*. При этом значения индекса полиморфного информационного содержания (PIC) варьировали от 0,23 до 0,39, что указывает на достаточную информативность большинства использованных маркеров, за исключением UBC807 и UBC815, показавших более низкие значения. Эти результаты подчеркивают важность тщательного подбора ISSR-праймеров для подобных исследований. Таким образом, полученные данные имеют практическое значение для разработки стратегий сохранения генетических ресурсов *Q. robur* в условиях Ставропольского края. Высокий уровень полиморфизма, особенно в популяции QR97, указывает на ее адаптационный потенциал к засушливым условиям, что делает ее ценной для использования в программах защитного лесоразведения и восстановления дубрав.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Кузьмин П. А., Магомедова М. О., Молитвина Е. В. Генотипирование экотопических популяций *Robinia pseudoacacia* L. с использованием ISSR-маркеров. *Таврический вестник аграрной науки.* 2025;42(2): 147-160. https://doi.org/10.5281/zenodo.16563800 [Kuzmin P. A., Magomedova M. O., Molitvina E. V. Genotyping of ecotopic populations of *Robinia pseudoacacia* L. using ISSR

markers. *Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki*. 2025;42(2): 147-160. doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.16563800.

Кузнецов В. М. Оценка генетической дифференциации популяций молекулярным дисперсионным анализом (аналитический обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2021;22(2): 167-187. doi: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.167-187 [Kuznetsov V. M. Evaluation of genetic differentiation of populations by molecular analysis of variance (analytical review). *Agrarian Science of the Euro-North-East.* 2021;22(2): 167-187. doi:https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.167-187].

Лапенко Н. Г., Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г. Растительность степных фитоценозов и особенности ее вегетации в условиях Ставропольского края. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020;193(2): 9-18. doi: https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-193-2-9-19 [Lapenko N. G., Eroshenko F. V., Storchak I. G. Vegetation of steppe phytocenoses and features of its vegetation in the conditions of the Stavropol krai. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020;193(2): 9-18. doi: https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-193-2-9-19].

Рябуха А. Ф., Кузьмин П. А. Молекулярно-генетический анализ популяций *Quercus robur* L. на основании полиморфизма ISSR- и SSR-маркеров*. Лесной вестник / Forestry Bulletin.* 2025;29(2): 42-54. doi: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-2-42-54 [Ryabukha A. F., Kuzmin P. A. Molecular genetic analysis of *Quercus robur* L. populations based on ISSR and SSR marker polymorphism. *Lesnoi vestnik / Forestry Bulletin*. 2025;29(2): 42-54. doi: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-2-42-54].

Стаменов М. Н. Макроморфологические особенности особей *Quercus robur* L. в Александровском районе Оренбургской области. *Вопросы степеведения.* 2024;1: 48-59. doi: https://doi.org/10.24412/2712-8628-2024-1-48-59 [Stamenov M. N. Macromorphological features of *Quercus robur* L. individuals in the Alexandrovsky district of the Orenburg region. *Voprosy stepevedeniya.* 2024;1: 48-59. doi: https://doi.org/10.24412/2712-8628-2024-1-48-59].

Чесноков Ю. В., Артемьева А. М. Оценка меры информационного полиморфизма генетического разнообразия. *Сельскохозяйственная биология.* 2015;50(5): 571-578. doi: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.571rus [Chesnokov Yu. V., Artemyeva A. M. Evaluation of the measure of informational polymorphism of genetic diversity. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya.* 2015;50(5): 571-578. doi: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.571rus].

Чесноков Ю. В., Косолапов В. М. Генетические ресурсы растений и ускорение селекционного процесса. М.: Угрешская типография, 2016 [Chesnokov Yu. V., Kosolapov V. M. Genetic resources of plants and acceleration of the breeding process. Moscow: Ugreshskaya tipografiya, 2016].

Diallo S., Badiane F. A, Kabkia B. A., Diédhiou I., Diouf M., Diouf D. Genetic diversity and population structure of cowpea mutant collection using SSR and ISSR molecular markers. *Scientific Reports*, 2024;14,1: 31833. doi: https://doi.org/10.1038/s41598-024-83087-y.

Ng W. L., Tan S. G. Inter-Simple Sequence Repeat (ISSR) Markers: Are We Doing it Right. *American Society for Microbiology Science Journal.* 2015;9(1): 30-39.

Nikonoshina N. A., Martynenko N. A., Nechaeva Yu. S., Prishnivskaya Ya. V., Boronnikova S. V. Molecular genetic analysis of populations of Populus nigra L. in the middle and southern Urals based on polymorphism of issr markers. *Modern problems of science and education*. 2016;3: 403-403.

Gemmill C., Grierson E. Inter-simple sequence repeats (ISSR), microsatellite-primed genomic profiling using universal primers. *Molecular Plant Taxonomy*. *Methods in Molecular Biology*. 2021; 249-262. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0997-2_14.

Roy P., Sogir S. B., Basak T. On the Polymorphism Information Content (PIC) – A practical application for the DNA sequencing data*. European Journal of Medical and Health Research.* 2023;1: 21-29. doi: https://doi.org/10.59324/ejmhr.2023.1(1).04.

Chokheli V., Kagan D., Varduny T., Kozlovsky B. L., Sereda M. M., Kapralova O. A., Dmitriev P. A., Padutov V. E. Ecological and genetic differentiation of populations of *Quercus robur* L. in the Rostov Region with the use of ISSR-markers. *Turczaninowia.* 2018;21(4): 161-167. doi: https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0802.

Bo W, Wang S, Xing G, Wang Y. Genetic diversity analysis of *Iris germanica* cultivars based on ISSR and SRAP molecular markers. *Front Plant Sci.* 2025;10;16: 1629234. doi: https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1629234.

Soraisham R, Tongbram P, Thingnam S. S., Aheibam B, Zothanzama J, Lourembam DS, Thangjam R. Deciphering genetic relationships within and among banana (Musa spp.) genome groups using ISSR and SRAP markers. *J Genet Eng Biotechnol*. 2025;23(3): 100540. doi: https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2025.100540.

Информация об авторах

Кузьмин Петр Анатольевич, к. с-х. н, ведущий научный сотрудник с и.о. заведующего лабораторией молекулярной селекции, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, kuzmin-p@vfanc.ru, ORCID: 0000-0002-1303-765X.

Магомедова Милана Олеговна, лаборант-исследователь, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, magomedova-m@vfanc.ru, ORCID: 0009-0000-9473-9751.

Молитвина Екатерина Владимировна, лаборант-исследователь, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразве-дения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр-кт. Университетский, 97, molitvina-e@vfanc.ru, ORCID: 0009-0002-4868-917X.

Information about the authors

Kuzmin Petr Anatolyevich, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Acting Head of the Laboratory of Molecular Breeding, Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, pr-t Universitetskij, 97, kuzmin-p@vfanc.ru, ORCID: 0000-0002-1303-765X.

Magomedova Milana Olegovna, Laboratory Researcher, Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., e-mail: magomedova-m@vfanc.ru, ORCID: 0009-0000-9473-9751.

Molitvina Ekaterina Vladimirovna, Laboratory Researcher, Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., e-mail: molitvina-e@vfanc.ru, ORCID: 0009-0002-4868-917X.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Author of this research paper have directly participated in the planning, executionandanalysisofthisstudy. Authors of this paperhave read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

UDC 631.52 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.010.91-101

Co-expression network of dehydrin-associated genes in *Quercus robur* L. during water deficit

Oleynikov A. A., Krylov P. A.✉,
[1]Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", Volgograd, Russia

Abstract. The study of the molecular mechanisms underlying the tolerance of woody species to abiotic stresses has become increasingly relevant in the context of climate change and the growing frequency of droughts. Understanding which genes and protein families are involved in the response to water deficit not only reveals the fundamental aspects of plant physiology but also provides the basis for developing breeding strategies to improve stress resistance. The main challenge is that in long-lived species such as *Quercus robur* L., the regulatory mechanisms of gene expression involved in drought adaptation remain poorly understood. Therefore, this study aimed to identify key genes and protein families co-expressed with dehydrins, as well as the functional processes underlying the plant's multicomponent response to water stress. To achieve this, transcriptomic analysis, gene network construction, and functional annotation were employed. GO term enrichment and semantic clustering allowed us to highlight the main biological processes related to growth regulation, cell division, responses to biotic and abiotic stimuli, and cell wall metabolism. Additionally, KEGG pathway analysis was conducted, which clarified the involvement of the identified genes in signaling and metabolic cascades. The results showed that the *Q. robur* gene network under drought forms a complex system of interactions that includes PR proteins, cell wall enzymes, and antioxidant components. These data demonstrate the multilevel nature of adaptation and highlight the importance of a comprehensive in silico approach for uncovering the mechanisms of woody plant resilience to abiotic stress.

Keywords. *Quercus robur* L.; drought; gene networks; transcriptomics; GO analysis; KEGG pathways; plant stress tolerance.

Funding. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FNFE-2025-0013 "Regulation of gene expression involved in the adaptation to adverse environmental factors to improve economically valuable traits of woody and cultivated plants used in agroforestry".

For citation. Oleynikov A. A., Krylov P. A. Co-expression network of dehydrin-associated genes in Quercus robur L. during water deficit // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):91-101. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.010.91-101.

Received: 13.10.2025 Accepted: 14.11.2025

УДК 631.52 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.010.91-101

Анализ описательной генной сети дегидринов и коэкспрессируемых с ними генов у *Quercus robur* L. в условиях дефицита влаги

Олейников А. А., Крылов П. А.✉
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Россия

Аннотация. Изучение молекулярных механизмов устойчивости древесных пород к абиотическим стрессам приобретает особую актуальность в условиях изменения климата и

✉ – Corresponding author /Для контактов.

участившихся периодов засухи. Понимание того, какие гены и белковые семейства участвуют в ответе на водный дефицит, позволяет не только раскрыть фундаментальные аспекты физиологии растений, но и заложить основу для разработки селекционных стратегий повышения стрессоустойчивости. Проблема заключается в том, что у таких долгоживущих видов, как *Quercus robur* L., недостаточно изучены механизмы регуляции экспрессии генов, задействованных в адаптации к засушливым условиям. В связи с этим целью исследования стало выявление ключевых генов и белковых семейств, коэкспрессируемых с дегидринами, а также функциональных процессов, обеспечивающих многокомпонентный ответ растения на водный стресс. Для решения задачи использованы методы транскриптомного анализа, построения генных сетей и функциональной аннотации. Обогащение GO-терминов и кластеризация по семантической схожести позволили выделить основные биологические процессы, связанные с регуляцией роста, делением клеток, ответом на биотические и абиотические стимулы, а также метаболизмом клеточной стенки. Дополнительно проведен анализ KEGG-путей, что позволило уточнить участие идентифицированных генов в сигнальных и метаболических каскадах. Результаты показали, что генная сеть *Q. robur* при засухе формирует сложную систему взаимодействий, включающую PR-белки, ферменты клеточной стенки и антиоксидантные компоненты. Эти данные свидетельствуют о многоуровневом характере адаптации и подчеркивают значение комплексного in silico-подхода для раскрытия механизмов устойчивости древесных пород к абиотическим стрессам.

Ключевые слова. *Quercus robur* L.; засуха; генные сети, транскриптомика; GO анализ; KEGG пути; стрессоустойчивости растений.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FNFE-2025-0013 «Регуляция экспрессии генов, участвующих в адаптации к неблагоприятным факторам окружающей среды, для улучшения экономически ценных признаков древесных и культурных растений, используемых в агролесомелиорации».

Цитирование. Олейников А. А., Крылов П. А. Анализ описательной генной сети дегидринов и коэкспрессируемых с ними генов у *Quercus robur* L. в условиях дефицита влаги // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):91-101. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.010.91-101.

Поступила в редакцию: 13.10.2025 Принята к печати: 14.11.2025

Introduction. *Quercus robur* L. is one of the dominant oak species in Central Europe, collectively accounting for about 10 % of forest stands. Among broadleaved trees, oaks rank second in abundance after beech (Schroeder & Kersten, 2023). Under changing climatic conditions, oaks exhibit high adaptive capacity, making them ecologically promising species (Schroeder, 2021). Consequently, their proportion in European forests is expected to increase in the coming decades (Perkins et al., 2018). Moreover, *Q. robur* is a forest-forming species widely used in agroforestry and protective afforestation (Kulik, 2022; Filippov et al., 2025; Huang et al., 2025). In this context, studying the genetic resources and molecular mechanisms underlying oak development and stress responses is of fundamental importance.

Climate change profoundly affects global photosynthetic patterns and the long-term resilience of forest ecosystems. Recent studies report an intensification of soil and ecological droughts during the growing season in recent years. The increasing severity of droughts is associated with enhanced water stress caused by altered evapotranspiration due to rising temperatures and shifting precipitation regimes (Rolando et al., 2025; Niemczyk et al., 2024). With the projected rise in drought frequency, concerns have emerged that intervals between dry periods may become shorter than the recovery time of forest ecosystems, potentially leading to irreversible degradation and large-scale tree mortality. This underscores the urgent need for comparative studies assessing species-specific drought tolerance and recovery potential by integrating physiological, morphological, and biochemical traits as indicators of adaptation to a changing climate (Müller, 2022; González, 2023).

Dehydrins (DHNs), belonging to group II of the late embryogenesis abundant (LEA) protein family, play a pivotal role in the molecular genetic mechanisms that protect plant cells from damage. A characteristic feature of DHNs is their structural flexibility: in an unbound state, they lack a defined secondary structure, but upon interaction with ligands, they adopt an α-helical conformation, enabling their protective functions (Szlachtowska, 2023).

The aim of this study was to study DHN genes in *Q. robur* involved in drought adaptation by constructing a gene co-expression network based on transcriptomic data.

Materials and Methods. Transcriptome sequencing data acquisition. RNA-seq data used in this study were derived from a previously published experiment (Zybinskaya, Tretyakova & Krylov, 2025). Total RNA was extracted from *Q. robur* seedlings exposed to drought stress (SRR31824597) and control, non-stressed seedlings (SRR31824599). Libraries were prepared using the Ligation Sequencing Kit V14 – Direct cDNA Sequencing (SQK-LSK114) protocol provided by the Nanopore Community (version DCS_9187_v114_revI_31Jul2024). Sequencing was performed using the MinION Mk1C third-generation platform (Oxford Nanopore Technologies, UK), and raw signal acquisition was conducted via MinKNOW software (v.23.04.3). Basecalling and real-time alignment were performed using Dorado (Oxford Nanopore Technologies, UK), mapping reads to the *Q. robur* reference genome (assembly v3.1, GenBank accession GCF_932294415.1). The aligned reads served as the basis for downstream transcriptomic analyses, including DHN gene identification and construction of co-expression networks under drought conditions.

Identification of genes, modeling and visualization of a gene network. After obtaining the raw transcriptomic data, adapter sequences were trimmed using Trimmomatic. Expressed DHN genes were then identified with the HISAT2 aligner (Kim et al., 2019) by mapping reads to the reference genome. To further confirm the classification of proteins as dehydrins, sequence analysis was performed with the HMMER hmmscan tool using the hidden Markov model profile UCH (PF00257). Candidate sequences were considered dehydrins if they had an e-value ≤ 1e−5 and contained characteristic motifs and Pfam annotations. Gene transcriptional activity was assessed by counting reads per gene using samtools bedcov, and read quantification was performed with featureCounts (Liao et al., 2014) in long-read mode. Since the experimental design did not include replicates, statistical testing for differential expression was not conducted. For network construction, count normalization was carried out using the CPM normalization method with an added pseudocount, followed by log2 fold-change transformation, calculated as the log2 ratio of normalized expression levels between drought and control conditions. Co-expressed genes were identified using a custom R script based on fold-change similarity, highlighting all vertices directly connected to DHN genes. The Cytoscape platform (Shannon et al., 2003) was used for network visualization, and functional annotation of neighboring genes was performed using NCBI's Batch Entrez utility (Benson et al., 2012).

Analysis of functional enrichment. Gene annotation and visualization of GO term distributions were conducted using the Gene Ontology (GO) database with the R package rrvgo. The list of LOC identifiers was mapped to *Quercus lobata* L. homologs due to the limited annotation of *Q. robur*. The enrichment analysis covered categories of Biological Process (BP), Molecular Function (MF), and Cellular Component (CC). The significance of enrichment was evaluated with an EASE Score threshold of 0.1, and multiple testing correction was applied using the FDR method (q = 0.05).

Results. Identification of genes. Based on RNA-seq data analysis, we identified 7 DHN genes in *Q. robur* under drought conditions and 91 proteins co-expressed with them. These included 13 proteins involved in carbohydrate metabolism and cell wall organization, 9 membrane proteins responsible for lipid transport, 38 stress-related protective proteins, 7 oxidoreductases, 9 regulatory and signaling proteins, 5 catalytic enzymes, 3 proteins associated with mitochondrial metabolism, and 11 unclassified proteins (Table).

Table

Annotation of unique proteins co-expressed with DHN

Protein name	Protein family	Main function
1	2	3
Thaumatin-like protein (PR-5)	PR-proteins	Antifungal defense, cell wall barrier
Pathogenesis-related protein 1 (PR-1)	PR-proteins	Signaling and protective proteins against pathogens
Pathogenesis-related protein 4	PR-proteins	Antifungal activity
Endochitinase (acidic, EP3)	PR-3/PR-4/PR-8	Hydrolysis of fungal cell wall chitin
Glucan endo-1,3/1,4-glucanase	PR-2	Degradation of fungal cell wall β-glucans
Germin-like proteins	PR-16	Antioxidant activity, protection
MLP-like proteins	Pathogenesis-related 10	Stress response

Continuation Table

1	2	3
NDR1/HIN1-like proteins	Immune signaling proteins	Innate immunity signaling pathways
Kunitz trypsin inhibitor	Protease inhibitors	Protection against insects and pathogens
Cationic peroxidase 1-like	Peroxidases	ROS detoxification, wall strengthening
Cellulose synthase A	Cell wall enzymes	Cellulose biosynthesis
Pectinesterase-like	Cell wall enzymes	Pectin modification
Laccase-7-like	Cell wall enzymes	Lignification, phenolic metabolism
β-glucosidase 12-like	Glycosidases	Degradation of sugars/glycosides
Berberine bridge enzyme-like	Oxidoreductase	Secondary metabolism
Non-specific lipid-transfer proteins (nsLTPs)	Lipid carriers	Lipid transport, protection, signaling functions
Fatty acyl-CoA reductase 3	Enzymes of lipid metabolism	Wax and fatty alcohol synthesis
GDSL esterase/lipase	Lipid hydrolases	Lipid catabolism
Inositol oxygenase	Enzymes of carbohydrate metabolism	Inositol catabolism
Cytochrome P450 CYP736A12	P450 monooxygenases	Secondary metabolism, oxidoreduction
Caffeic acid 3-O-methyltransferase	Phenylpropanoid pathway proteins	Lignin biosynthesis
Glutathione transferase GST23	Detoxification enzymes	Glutathione conjugation, antioxidant
LOB domain protein	Transcription factors	Morphogenesis, organ development
Pentatricopeptide repeat protein (PPR)	Post-transcriptional regulators	Gene expression in mitochondria and chloroplasts
Ser/Thr protein kinase STY13-like	Kinases	Signaling pathways
Nuclear fusion defective 4-like	Division/reproduction proteins	Cell cycle control
Early nodulin-like protein	Symbiotic proteins	Root development, symbiosis
Cold-shock protein CS120-like	Stress response regulators	Transcription/translation under stress
Protein DESIGUAL 2-like	Regulatory protein	Stress response, signaling pathways
Protein P21-like	Cellular regulators	Cell cycle control, stress
Bark storage protein A-like	Storage proteins	Amino acid reserve
Cocosin 1-like	Storage proteins	Nutrient reserve
Iron-sulfur protein for NADH dehydrogenase	Respiratory chain proteins	Mitochondrial Complex I
α-carbonic anhydrase 7-like	Carbonic anhydrases	CO_2 and pH regulation
1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase (ACC oxidase)	Hormone biosynthesis enzymes	Ethylene biosynthesis

Notably, a substantial number of PR proteins (PR-1, PR-2, PR-3/PR-4/PR-8, PR-5, PR-16) were detected. A considerable proportion of the identified genes encode cell wall-related enzymes (cellulose synthase, laccases, pectinases), indicating active cell wall remodeling processes under drought conditions. Furthermore, several regulatory proteins were identified, including transcription factors (LOB, PPR), kinases, and regulators of the cell cycle and stress responses.

Gene network modeling. The gene co-expression network of *Q. robur* under drought stress was constructed using transcriptomic data, revealing a complex landscape of interactions comprising 98 nodes and numerous connections (Fig. 1). The network exhibited a high degree of interconnectivity, with nodes representing individual genes identified by their LOC numbers and edges denoting potential regulatory or functional relationships.

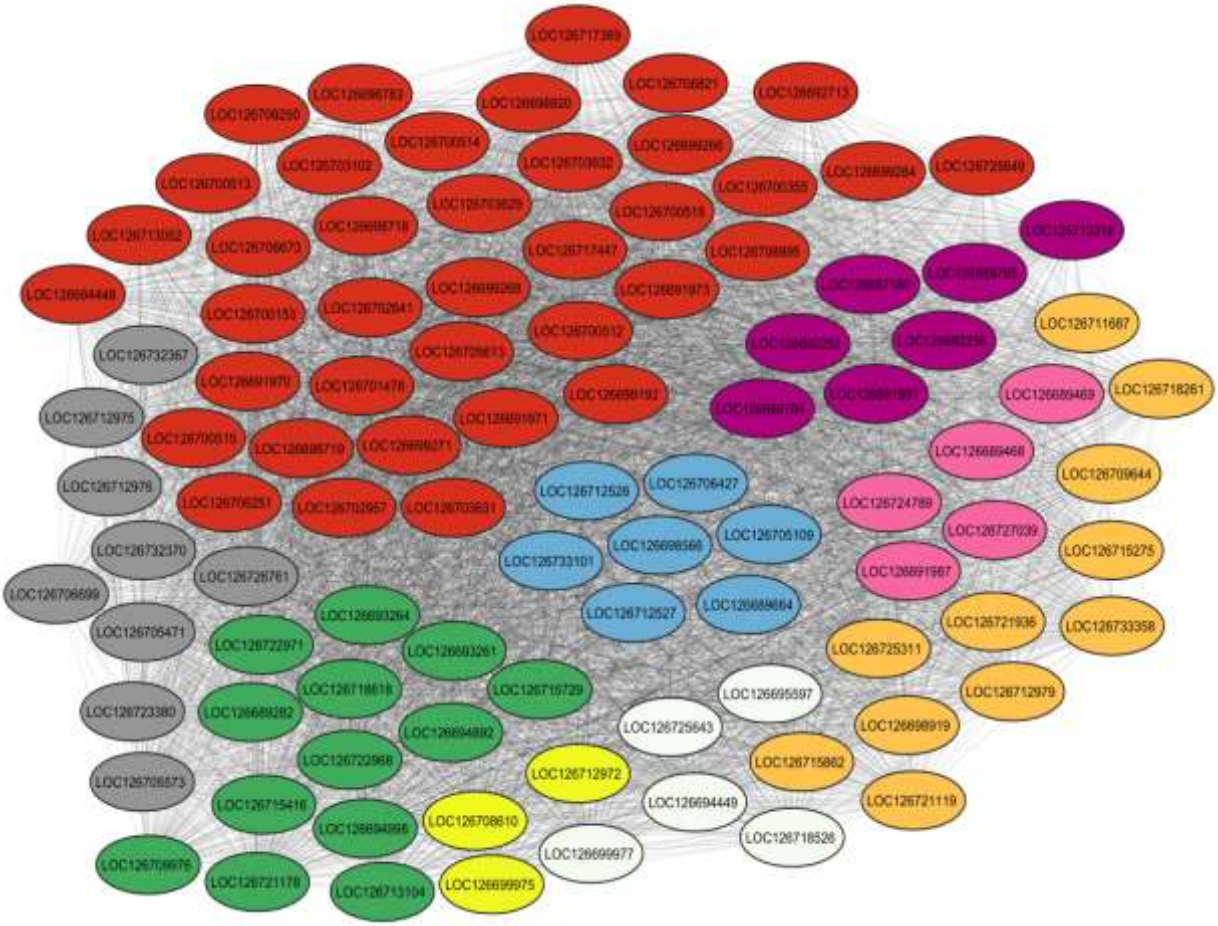


Fig. 1. Co-expression network of *DHN* genes in *Q. robur* under drought conditions

Genes encoding dehydrins, cell wall biosynthetic enzymes, membrane proteins, stress-associated proteins, secondary metabolism enzymes, regulatory proteins, catalytic enzymes, and mitochondrial metabolism proteins are indicated in blue, green, pink, red, gray, purple, white, and yellow, respectively (Fig. 1).

Functional categorization using Gene Ontology. The functional roles of 98 genes identified in the *Q. robur* co-expression network under drought stress were analyzed using Gene Ontology (GO) terms. A total of 189 unique GO terms were identified and classified into biological processes (112 terms), molecular functions (42 terms), and cellular components (35 terms).

The most significantly enriched biological processes included "response to water deprivation" (GO:0009414, p = 0.02), "phenylpropanoid biosynthesis" (GO:0009699, p = 0.03), and "response to oxidative stress" (GO:0006979, p = 0.04). These are consistent with the functions of dehydrins (LOC12670547, LOC12673101) and enzymes such as Laccase-7-like (LOC126706821), which participate in protection against dehydration and in cell wall lignification. Enriched molecular functions included "chitinase activity" (GO:0016798, p = 0.05), associated with Endochitinase (LOC126709976), and "peroxidase activity" (GO:0004601, p = 0.06), corresponding to the role of Cationic peroxidase 1-like in ROS detoxification. Cellular components comprised "cell wall" (GO:0005618) and "cytoplasm" (GO:0005737), reflecting structural adaptations maintained by genes such as Cellulose synthase A (LOC126712976).

To facilitate the interpretation of numerous enriched GO categories, a matrix of semantic similarity among terms was constructed (Fig. 3). Clustering revealed functional clusters associated with the cell cycle and division, metabolic processes, responses to stimuli, and regulatory pathways.

Fig. 2. Map of GO terms for *Q. robur* DHN genes and their neighboring genes

The results of the GO term analysis were visualized using clustering based on semantic similarity (Fig. 4). Each circle in the diagram represents a GO term; color indicates its assignment to a particular cluster grouped around a representative term. The circle size is proportional to the term's significance (–log10 p-value). Labels on the plot indicate key processes summarizing the biological meaning of each cluster. The largest clusters were functionally associated with plant responses to diverse stimuli and stress factors, the cell cycle and division, metabolic processes, and the regulation of growth and proteolysis.

Discussion. Identifying genes that interact to ensure the organism's adaptive functions is one of the primary goals of functional genomics. High-throughput technologies for assessing and quantitatively analyzing genome-wide expression patterns have enabled systematic analyses to identify pathways or gene networks involved in various biological functions under diverse conditions (Burks et al., 2022). In this study, we used our RNA-Seq datasets for *Q. robur* under drought stress to construct a gene co-expression network. Constructing co-expression networks makes it possible to identify the diverse functional roles of genes associated with resistance to abiotic or biotic stress. The developed co-expression network can serve as a valuable resource for the tree genomics research community to explore specific genes of interest within the network, obtain corresponding interactomes, decode gene modules transcriptionally altered under stress conditions or at specific developmental stages, and gain insights into their biological functions.

The resulting gene network of *Q. robur* under drought conditions demonstrates a complex and integrated system of plant adaptation to water stress. The presence of gene families such as PR proteins, dehydrins, and cell wall enzymes indicates a multilevel response involving pathogen defense, structural reinforcement, and metabolic regulation. These findings emphasize that the oak's response to drought is not localized but encompasses multiple levels of cellular organization. PR proteins perform antimicrobial defense, pathogen cell wall degradation, and antioxidant functions (Finkina et al., 2017); their co-expression with DHN genes suggests a close interplay between pathogen defense mechanisms and the plant's re spon-

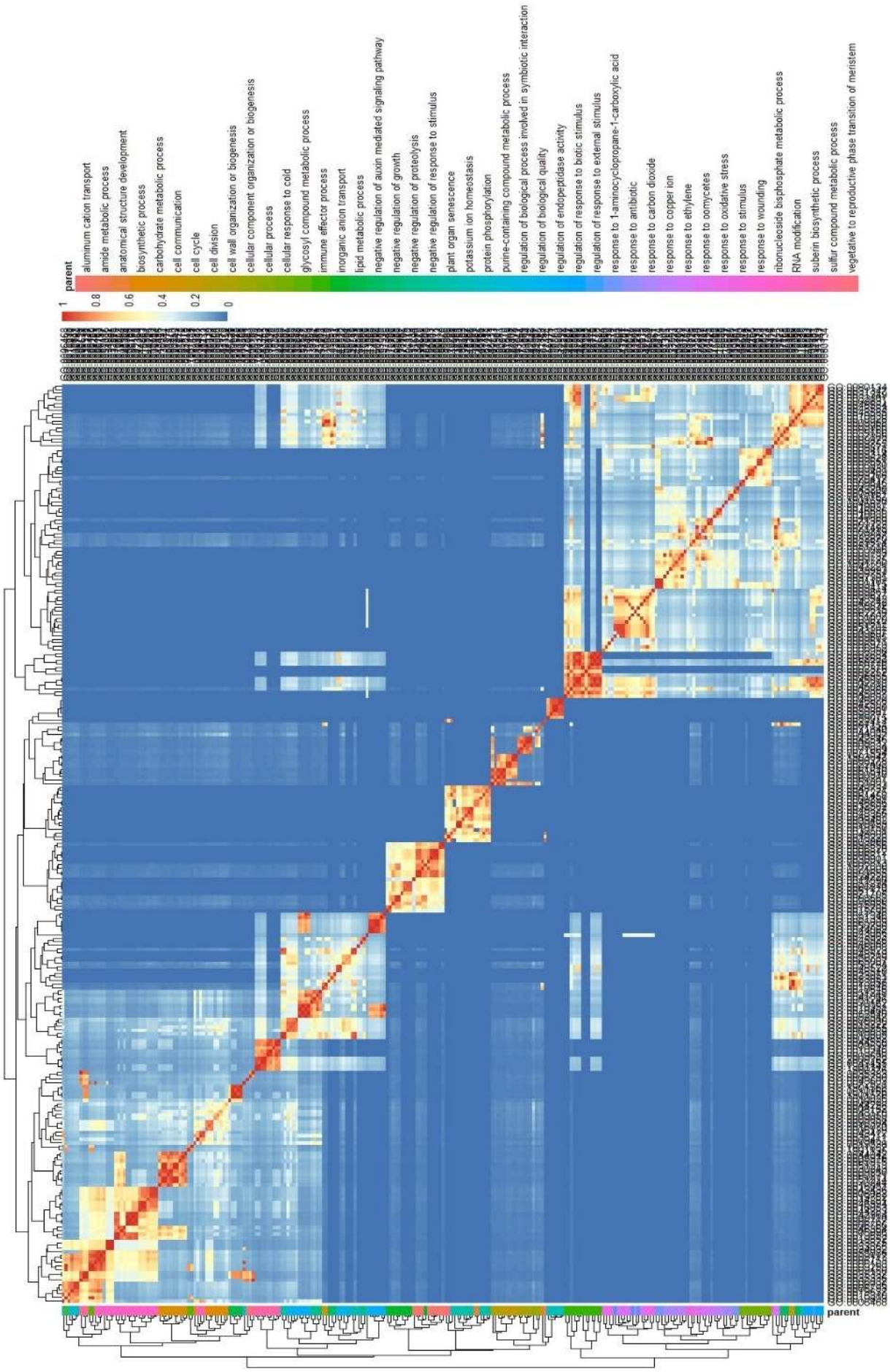


Fig. 3. Heatmap of GO term enrichment for 98 genes of *Q. robur* under drought conditions

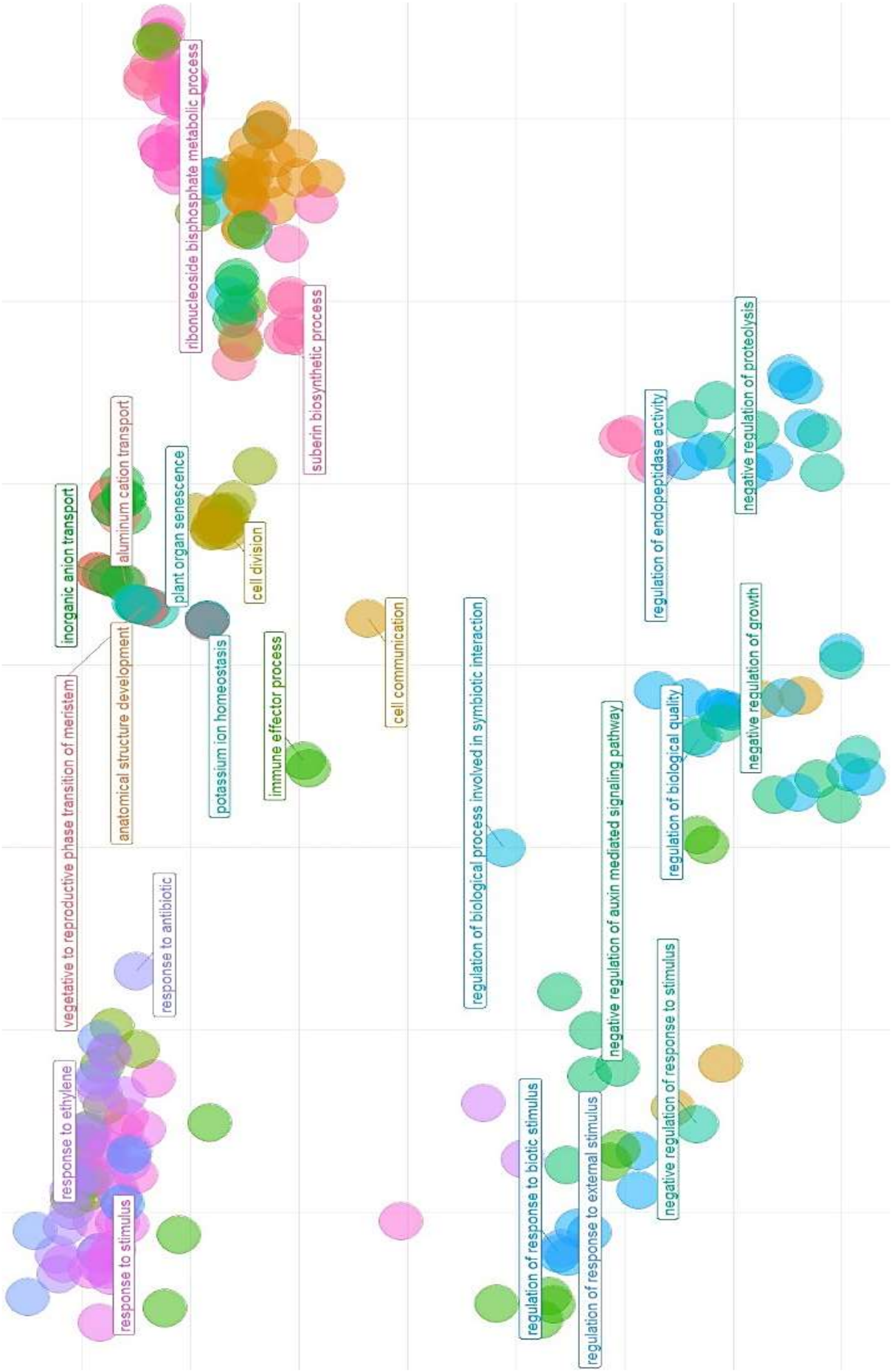


Fig. 4. Two-dimensional projection of semantic similarity of GO terms

se to water deficit. The expression of cell wall-related enzymes also indicates enhanced synthesis and modification of structural cell wall polymers – one of the key mechanisms increasing tissue resistance to dehydration (Wilmowicz et al., 2022). The presence of antioxidant enzymes (catalase-like peroxidase, glutathione S-transferase, cytochrome P450) supports the hypothesis of the critical role of the reactive oxygen species (ROS) detoxification system in the oak's stress response. The network also includes proteins associated with lipid metabolism regulation (lipid transfer proteins, esterases, oxidoreductases), consistent with the importance of lipid metabolism in stabilizing membranes under abiotic stress (Sowemimo et al., 2019). In addition, several regulatory proteins were identified – including transcription factors (LOB, PPR), kinases, and regulators of the cell cycle and stress responses. Their presence reflects the coordinating role of signaling cascades integrating various levels of protective reactions. Of further interest is the presence of storage proteins (cupulin, bark proteins), which may serve as reserve sources of nitrogen and amino acids under conditions of limited metabolism.

Taken together, the annotated genes encompass a wide spectrum of processes-from cell wall reinforcement and antioxidant defense to signaling and metabolic pathways – highlighting the multifaceted nature of *Q. robur*'s response to drought.

Comparison of the obtained data with results published for both model and woody species (e. g., *Q. lobata*) reveals the presence of both conserved and species-specific components of the drought response. Genes associated with the synthesis of proline, sugars, and other osmolytes have been identified in most plants and constitute a universal system for stabilizing cells under drought stress (Degu et al., 2019; Marcek et al., 2019; Batool et al., 2020). However, in oak, additional modules were activated that are linked to xylem functioning, vessel strengthening, and transpiration regulation. This may reflect a unique longevity strategy of woody species, for which maintaining the integrity of the water-conducting system is critically important under fluctuating climatic conditions. The network organization of the identified genes emphasizes that drought tolerance in *Q. robur* is formed through the coordination of protective, signaling, and metabolic processes. Such an architecture not only enables the plant to withstand periods of water deficit but also provides a foundation for long-term adaptation in ecosystems with variable moisture availability.

GO term analysis associated with drought tolerance revealed an enrichment of categories related to responses to stimuli and stress, cell cycle and division, as well as metabolic processes. Visualization of the data using semantic similarity maps and clustering matrices confirmed the presence of functional modules that reflect the complex and integrated nature of the response. On the scatter plot, GO terms formed clusters corresponding to key processes – from growth regulation and proteolysis to biosynthetic pathways. The heatmap of semantic proximity clearly delineated interconnected groups of terms, facilitating the interpretation of extensive lists and revealing which functional pathways are coordinated under drought conditions. Collectively, these findings indicate that *Q. robur* activates integrated regulatory mechanisms combining both signaling cascades and metabolic rearrangements.

Thus, the network organization of the identified genes, supported by the GO analysis results, emphasizes that drought tolerance in *Q. robur* is formed through the coordination of defense, signaling, and metabolic processes. Such an architecture not only enables the plant to withstand periods of water deficit but also provides a foundation for long-term adaptation in ecosystems with variable moisture availability. The practical significance of these findings lies in the fact that the key network nodes and enriched functional categories can serve as markers in breeding programs or as targets for biotechnological approaches aimed at enhancing drought tolerance in woody species. However, the study design, which included only one biological sample per condition, does not allow for statistically reliable correlation analysis. The constructed network is descriptive in nature and requires experimental validation. The fold-change and $\log_2$FC distance-based approach is suitable for the preliminary identification of modules and hypothesis generation, but a comprehensive correlation and differential expression analysis will require experiments with biological replicates.

Conclusion. In this study, we analyzed the gene network of DHNs and their co-expressed genes in *Q. robur* under simulated drought conditions, which made it possible to identify key molecular mechanisms of plant adaptation to water stress. Construction of the network based on seven genes associated with dehydrin function and 91 co-expressed genes revealed complex interconnections, highlighting their potential role in protecting cells during dehydration. GO enrichment analysis identified 189 unique terms, among which "response to water deprivation" (GO:0009414) and "phenylpropanoid biosynthetic process" (GO:0009699) were significantly enriched, confirming the involvement of the network genes in adaptive processes. The obtained results highlight the importance of dehydrins and associated genes in ensuring *Q. robur* drought tolerance, providing valuable insights into the molecular basis of stress resistance. How-

ever, further studies, including detailed expression profiling and experimental validation of the identified genes' functions, are required to fully reveal their potential for breeding and biotechnological approaches aimed at improving *Q. robur* resilience to climate change.

REFERENCES

Kulik K. N. The current state of protective forest plantations in the Russian Federation and their role in mitigating the effects of droughts and land deserti cation. *Scientific Agronomy Journal*. 2022;3(118):8-13. DOI: https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.001.08-13.

Filippov P. B., Proezdov P. N., Eskov D. V. The influence of the method of creating forest shelterbelts on the growth and development of the petiolate oak in the steppe of the Don plain. *Scientific Agronomy Journal*. 2025;1(128):28-34. DOI: https://doi.org/10.34736/FNC.2025.128.1.004.28-34.

Batool T., Ali S., Seleiman M. F., Naveed N. H., Ali A., Ahmed K., Abid M., Rizwan M., Shahid M. R., Alotaibi M., Al-Ashkar I., Mubushar M. Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Scientific Reports*. 2020;10(1):16975. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-73489-z.

Benson D. A., Dennis A. Benson, Clark K., Karsch-Mizrachi I., Lipman D. J., Ostell J., Sayers E. W. GenBank. *Nucleic acids research*. 2012;42(D1):D36-D42. DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gkt1030.

Burks D. J., Sengupta S., De R., Mittler R., Azad R. K. The Arabidopsis gene co-expression network. Plant Direct. 2022;6(4):e396. DOI: https://doi.org/10.1002/pld3.396.

Degu A., Hochberg U., Wong D. C. J., Alberti G., Lazarovitch N., Peterlunger E., Castellarin S. D., Herrera J.C., Fait A. Swift metabolite changes and leaf shedding are milestones in the acclimation process of grapevine under prolonged water stress. *BMC plant biology*. 2019;19(1):69. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-019-1652-y.

Finkina E., Melnikova D. N., Bogdanov I. V., Ovchinnikova T. V. Plant pathogenesis-related proteins PR-10 and PR-14 as components of innate immunity system and ubiquitous allergens. *Current Medicinal Chemistry*. 2017;24(17):1772-1787. DOI: https://doi.org/10.2174/0929867323666161026154111.

González E. M. Drought stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*. 2023;24(7):6562. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms24076562.

Huang X., Hu Q., Dou M., Liu C., Fan J., Liu J., Zhu P. Physiological and transcriptomic analyses reveal the regulatory mechanisms for the adaptation of Quercus robur to shade conditions. *BMC Plant Biology*. 2025;25(1):821. DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-025-06843-w.

Kim D., Paggi J. M., Park C., Bennett C., Salzberg S. L. Graph-based genome alignment and genotyping with HISAT2 and HISAT-genotype. *Nature biotechnology*. 2019;37(8):907-915. DOI: https://doi.org/10.1038/s41587-019-0201-4.

Liao Y., Smyth G. K., Shi W. featureCounts: an efficient general-purpose program for assigning sequence reads to genomic features. *Bioinformatics*. 2014;30(7):923-930. DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt656.

Marcek T., Hamow K. Á., Végh B., Janda T., Darko E. Metabolic response to drought in six winter wheat genotypes. *PLoS one*. 2019;14(2):e0212411. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212411.

Müller L. M., Bahn M. Drought legacies and ecosystem responses to subsequent drought. *Global Change Biology*. 2022;28(17):5086-5103. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.16270.

Niemczyk M., Wrzesiński P., Szyp-Borowska I., Krajewski S., Żytkowiak R., Jagodziński A. M. Coping with extremes: Responses of Quercus robur L. and Fagus sylvatica L. to soil drought and elevated vapour pressure deficit. *Science of The Total Environment*. 2024;948:174912. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174912.

Sowemimo O. T., Knox-Brown P., Borcherds W., Rindfleisch T., Thalhammer A., Daughdrill G. W. Conserved glycines control disorder and function in the cold-regulated protein, COR15A. *Biomolecules*. 2019;9(3):84. DOI: https://doi.org/10.3390/biom9030084.

Perkins D., Uhl E., Biber P., Du Toit B., Carraro V., Rötzer T., Pretzsch H. Impact of climate trends and drought events on the growth of oaks (Quercus robur L. and Quercus petraea (Matt.) Liebl.) within and beyond their natural range. *Forests*. 2018;9(3):108. DOI: https://doi.org/10.3390/f9030108.

Rolando M., Ganugi P., Secchi F., Said-Pullicino D., Bonifacio E., Celi L. Response of native (*Quercus robur* L.) and alien (Quercus rubra L.) species to water stress and nutrient input in European temperate ecosystems. *Physiologia Plantarum*. 2025;177(1):e70070. DOI: https://doi.org/10.1111/ppl.70070.

Shannon P., Markiel A., Ozier O., Baliga N. S., Wang J. T., Ramage D., Amin N., Schwikowski B., Ideker T. Cytoscape: a software environment for integrated models of biomolecular interaction networks. *Genome research*. 2003;13(11):2498-2504. DOI: https://doi.org/10.1101/gr.1239303.

Schroeder H. Oaks as beacons of hope for threatened mixed forests in Central Europe. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2021;4:670797. DOI: https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.670797.

Schroeder H., Kersten B. A. Small set of nuclear markers for reliable differentiation of the two closely related oak species Quercus robur and Q. Petraea. *Plants (Basel)*. 2023;12(3):566. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12030566.

Szlachtowska Z., Rurek M. Plant dehydrins and dehydrin-like proteins: characterization and participation in abiotic stress response. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1213188. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1213188.

Wilmowicz E. Kućko A., Alché J. D., Czeszewska-Rosiak G., Florkiewicz A. B., Kapusta M., Karwaszewski J. Remodeling of cell wall components in root nodules and flower abscission zone under drought in yellow lupine. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(3):1680. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23031680.

Zybinskaya P. A., Tretyakova A. V., Krylov P. A. Spectral assessment of the physiological condition of *Quercus robur* L. under simulated drought conditions. *Scientific Visualization*. 2025;17(1):36-44. DOI: https://doi.org/10.26583/sv.17.1.04.

Information about the authors

Oleynikov Alexander Alexandrovich, Laboratory Research Assistant, Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., olejnikov.a@vfanc.ru, ORCID: 0009-0002-8225-6001.

Krylov Pavel Andreevich, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Acting Head of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies, Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, 97 Universitetsky Ave., krylov-p@vfanc.ru, ORCID: 0000-0001-9587-5886.

Информация об авторах

Олейников Александр Александрович, лаборант-исследователь, Федеральное государственное бюджетное Научное учреждение "Федеральный научный центр агроэкологии, комплексной мелиорации и защитного лесоразведения Российской академии наук", 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97, olejnikov.a@vfanc.ru, ORCID: 0009-0002-8225-6001.

Крылов Павел Андреевич, к. б. н., ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией геномных и постгеномных технологий, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный Научный центр агроэкологии, комплексной мелиорации и защитного лесоразведения Российской академии наук", 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97, krylov-p@vfanc.ru, ORCID: 0000-0001-9587-5886.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Author of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 634.9 (252.51) DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.011.102-111

Лесокультурное наследие семиаридных и аридных регионов: достижения, проблемы, сценарии развития

Левыкин С. В., Гулянов Ю. А., Казачков Г. В., Садертдинов Р. Р.✉,
Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, Россия

Аннотация. В современных условиях актуальна проблема устойчивости, жизнеспособности и функциональности лесонасаждений в степной зоне. Обобщение отечественного и мирового опыта защитного лесоразведения путем анализа литературных источников, публикаций в периодических изданиях, задокументированных исторических фактов, нормативно-правовых актов, многолетние наблюдения за состоянием защитных лесонасаждений позволяют оценить положительные его эффекты, выявить основные проблемы и определить перспективы развития лесомелиорации. В настоящее время важнейшей задачей лесомелиорации становится экологическая оптимизация существующих лесонасаждений и лесовосстановление с применением природоподобных технологий. Необходимость использования природоподобных технологий подтверждается нормативно-правовыми актами высокого уровня, среди которых Указ Президента РФ от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации», Указ Президента РФ от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий», Указ Президента РФ от 28.02.2024 №145 «О Стратегии научно-технологическогоразвития Российской Федерации».

Целью исследования является определение перспектив развития лесомелиорации на основе оценки опыта защитного лесоразведения и современным проблем данного направления. В статье кратко обобщен опыт защитного лесоразведения в России и некоторые глобальные лесомелиоративные проекты в семиаридных и аридных регионах («Защитный пояс Великих равнин», «Зеленая китайская стена», «Великая зеленая стена»). На основе многолетних исследований, опроса владельцев сельхозугодий, специалистов сельского хозяйства приведены позитивные и негативные последствия защитного лесоразведения, определены основные направления динамики лесонасаждений, отмечена необходимость использования природоподобных технологий в защитном лесоразведении, представлены основные признаки природоподобия в искусственных лесонасаждениях, на основе принципа природоподобности предложены места, на которых возможна и целесообразна лесомелиоративная деятельность.

Ключевые слова. Защитные лесные насаждения; лесомелиорация; природоподобные технологии; лесопригодность.

Финансирование. Работа выполнена по теме НИР Института степи УрО РАН «Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем» № ГР АААА-А21-121011190016-1.

Цитирование. Левыкин С. В., Гулянов Ю. А., Казачков Г. В., Садертдинов Р. Р. Лесокультурное наследие семиаридных и аридных регионов: достижения, проблемы, сценарии развития // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):102-111. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.011.102-111.

Поступила в редакцию: 18.11.2025 Принята к печати: 05.12.2025

UDC 634.9 (252.51) DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.011.102-111

Forest-cultivation heritage of semiarid and arid regions: achievements, challenges, development scenarios

Levykin S. V., Gulyanov Y. A., Kazachkov G. V., Sadertdinov R. R.✉
Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Abstract. In modern conditions, the issues of sustainability, viability, and functionality of forest plantations in the steppe zone have become increasingly relevant. This paper summarizes national and international experience in protective afforestation based on an analysis of scientific literature, periodicals, documented historical records, and regulatory acts. Such an approach makes it possible to evaluate the positive effects of protective afforestation, identify key problems, and outline prospects for the development of forest reclamation. At present, the most important task in forest reclamation is the ecological optimization of existing plantations and the implementation of nature-like technologies. The necessity of applying nature-like technologies is supported by several high-level regulatory acts, including Presidential Decree of the Russian Federation No. 818 of November 2, 2023 "On the Development of Nature-Like Technologies in the Russian Federation," Presidential Decree No. 529 of June 18, 2024 "On Approving the Priority Areas of Scientific and Technological Development and the List of the Most Important High-Tech Technologies," and Presidential Decree No. 145 of February 28, 2024 "On the Strategy for the Scientific and Technological Development of the Russian Federation."

The study aims to identify development prospects for forest reclamation based on an assessment of the experience of protective afforestation and current issues in this field. The article briefly summarizes the history of protective afforestation in Russia and several major global shelterbelt projects ("Great Plains Shelterbelt", "Three-North Shelterbelt Development Program", "Great Green Wall"). Based on long-term research and surveys of farmland owners and agricultural specialists, we identify the positive and negative consequences of protective afforestation, outline the main trends in plantation dynamics, highlight the need for nature-like technologies, list the principal features of nature similarity in artificial plantations, and propose areas where forest reclamation measures are most justified.

Keywords. Protective forest plantations; forest reclamation; nature-like technologies; forest suitability.

Funding. The work was carried out on the topic of research at the Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences "Problems of steppe nature management in the context of modern challenges: optimizing the interaction of natural and socio-economic systems" No. GR AAAAA-A21-121011190016-1.

For citation. Levykin S. V., Gulyanov Y. A., Kazachkov G. V., Sadertdinov R. R. Forest-cultivation heritage of semiarid and arid regions: achievements, challenges, development scenarios // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):102-111. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.011.102-111.

Received: 18.11.2025 Accepted: 05.12.2025

Отечественный и мировой опыт защитного лесоразведения. Научные исследования и мировой опыт лесомелиорации показывают положительный эффект защитного лесоразведения в борьбе с суховеями, пыльными бурями, эрозией, в улучшении гидрологических и климатических условий территории и т. д. Вместе с тем, существует немало проблем, связанных с использованием защитных лесонасаждений.

С одной стороны, многими учеными (В. В. Докучаев, Б. И. Логгинов, Г. И. Матякин, К. И. Кулик, А. С. Манаенков и др.) доказаны благоприятные результаты создания полезащитных лесополос (замедление эрозии, снижение пагубного влияния суховеев, засух, замедление опустынивания, снегозадержание и равномерное распределение снежного покрова по пахотным угодьям, как следствие, повышение урожайности и т.д.). Однако при ненадлежащем уходе за лесонасаждениями возникает ряд негативных последствий: неравномерное распределение твердых осадков в пределах одного поля, неравномерное просыхание различных участков поля; иссушающее действие лесополос на почву; снижение степного биоразнообразия и трансформация степных ландшафтов; повышенная пожароопасность; ухудшение условий жизни типично степных представителей животного мира (сурок, сайгак, стрепет, дрофа); лесополосы становятся источниками биологического загрязнения, болезней растений и др.

Идеи защитного лесоразведения и восстановления лесов в России возникли довольно давно. Первая наиболее известная попытка степного лесоразведения принадлежит Петру I, распорядившемуся заняться разведением культур дуба близ Таганрога (урочище Дубки). Однако еще до этого были распространены приусадебные рощи (преимущественно в Централь-

ной России), выполнявшие прежде всего защитную функцию, известны отдельные попытки разведения леса в степи до царствования Петра I (Цветков, 1957).

Во второй половине XVIII в. К. Г. Лаксман проводил опыты посадок древесных пород в степях Сибири и разработал рекомендации по посадке и посеву различных лесных культур (Лаксман, 1769).

Широкую известность получило лесоразведение на юге России, с которым связаны имена И. Я. Данилевского (разведение культуры сосны на песчаных аренах по берегу р. Донца), В. Я. Ломиковского, В. П. Скаржинского, М. М. Кирьякова и др.

Большой вклад в развитие степного лесоразведения внесли И. И. Корнис (создание лесных плантаций в Молочанском округе), В. Е. Графф (положено начало систематическим работам по разведению леса, создание образцового лесничества), Ф. Ф. Тиханов (совершенствование технологий посадки и ухода за насаждениями), Н. К. Генко (180,5 тыс. га лесонасаждений на юге и юго-востоке России), Г. Ф. Морозов (учение о лесе), Г. Н. Высоцкий (научное обоснование работ по защитному лесоразведению) (Мерзленко, Бабич, 2005).

Велико значение особой степной экспедиции В. В. Докучаева в разработке научных основ степного лесоразведения, в ходе которой ставились производственные опыты по рациональной организации территории и посадке различных видов защитных лесных насаждений (для укрепления оврагов и балок, снегозадержания и лучшего сельскохозяйственного использования весенних и дождевых вод в открытых степях, предохранения русел рек от заиления и берегов от обвалов, задержания распространения песков, устранения вредного действия ветров) (Турусов, 2017).

Большой опыт защитного лесоразведения получен в советский период. В 1921 г. принято Постановление Совета труда и обороны «О борьбе с засухой», согласно которому Центральный Лесной Отдел обязался проводить работы по созданию противоэрозионных, снегосборных лесополос, облесению безлесных пространств, верховий и берегов рек в засушливых районах. За первые две пятилетки было высажено 490 тыс. га лесополос. В соответствии с постановлением СНК СССР и ЦК ВКП(б) от 26 октября 1938 г.«О мерах обеспечения устойчивого урожая в засушливых районах юго-востока СССР» работы по защитному лесоразведению были возложены на колхозы, совхозы и МТС (Кулик, 2023).

В 1931 г. проведена конференция по борьбе с засухой, на которой агролесомелиоративные работы признаны одним из основных звеньев борьбы с засухой в степной зоне. В это же время образован Всесоюзный научно-исследовательский институт агролесомелиорации (ВНИАЛМИ).

Наиболее крупным проектом по защитному лесоразведению в СССР можно считать Постановление Совета Министров СССР и ЦК ВКП(б) 1948 года «О плане полезащитных лесонасаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР» («Сталинский план преобразования природы»), предполагающее создание государственных защитных лесных полос, систему защитных лесонасаждений на полях, на песках. За 5 лет его реализации было создано 2,3 млн га насаждений, среди которых государственные защитные лесные полосы «Саратов – Астрахань», «Камышин – Сталинград», «Пенза – Екатериновка – Вешенская – Каменск», «Воронеж – Ростов-на-Дону», «Сталинград – Степной – Черкесск», «Гора Вишневая – Каспийское море», «Чапаевск – Владимировка», «Белгород – Дон» (Кулик, 2023).

Позже, в 1967 г., ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли Постановление «О неотложных мерах по защите почв от ветровой и водной эрозии», предполагавшее, в том числе, лесомелиоративные мероприятия (создание полезащитных лесных полос площадью 324 тыс. га, облесение склонов, оврагов, балок, песков, берегов рек и водоемов на общей площади 827 тыс. га).

Для оценки масштабов лесомелиорации следует упомянуть фитомелиоративные (в т. ч. лесомелиоративные) работы по закреплению песков в Прикаспии. В ходе реализации «Сталинского плана преобразования природы» закреплено 200 тыс. га подвижных песков, созданы кустарниковые лесопастбища, устойчивые к дефляции, занимающие 50 тыс. га. С 1986 г. в соответствии с «Генеральной схемой по борьбе с опустыниванием Черноземельских и Кизлярских пастбищ» проводился новый этап фитомелиоративных работ по закреплению песков на паст-

бищах в Республиках Калмыкия, Дагестан, Чечня и Астраханской обл. Однако масштабы работ сократились с 48 тыс. га в среднем за год (1986-2001) до 1,7 тыс. га (2014-2020) (Кулик, 2024).

В 1991 г. на территории СССР площадь защитных лесонасаждений только сельскохозяйственного назначения составляла 5,6 млн га. С 1991 года работ по защитному лесоразведению практически не велось, и вследствие отсутствия ухода часть лесонасаждений оказалась утрачена. По данным за 2015 год насчитывалось 983 тыс. га противоэрозионных, 1144 тыс. га полезащитных лесонасаждений, 57 тыс. га на пастбищах, 316 тыс. га на песках, 60 тыс. га по берегам малых рек и близ населенных пунктов (Кулик, 2023).

Несмотря на сокращение работ по защитному лесоразведению Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук разработал стратегию развития защитного лесоразведения в Российской Федерации, в которой сформулированы экономические и ландшафтно-экологические принципы, стратегические основы развития защитного лесоразведения, приведен план и обоснование масштабов и объемов лесомелиоративных работ, представлены приоритетные направления и предложения по развитию защитного лесоразведения.

Представляет большой интерес зарубежный опыт защитного лесоразведения, направленного, главным образом, на борьбу с опустыниванием и пыльными бурями. Наиболее известны следующие глобальные проекты лесомелиорации: «Защитный пояс Великих равнин» («Great Plains Shelterbelt»), «Зеленая китайская стена» («The Three-North Shelterbelt Development Program»), «Великая зеленая стена» («Great Green Wall»).

Реализация проекта облесения Великих равнин в США проходила с 1935 по 1942 гг. «Защитный пояс» пересек с севера на юг штаты Северная Дакота, Южная Дакота, Небраска, Канзас, Оклахома, Техас. Необходимость проекта была связана с активизацией ветровой эрозии и пыльными бурями в США в начале 1930-х годов. При разработке проекта учитывался Российский опыт степного защитного лесоразведения. Общая площадь насаждений должна была составить 29,6 млн га. В результате создано 30233 лесных полос общей площадью 1,62 млн га. К настоящему времени большая часть насаждений утрачена по причине отсутствия ухода, сохранившаяся часть практически не выполняет защитных функций. Однако существуют программы по реставрации некоторых участков лесополос (Кулик, 2024).

Нелишним будет обратить внимание на защитное лесоразведение в других аридных регионах для оценки прочих направлений лесомелиорации (главным образом, борьба с опустыниванием).

В северных и северо-западных провинциях Китая реализуется «Программа облесения Севера» («Три Севера», «Зеленая китайская стена», «The Three – North Afforestation Program»), направленная на борьбу с опустыниванием и увеличение лесистости данной территории с 5,05 % до 14,95 %. Работы начались в 1978 г., их завершение планируется к 2050 г., с 2021 г. продолжается третий, заключительный этап проекта. «Зеленая стена» будет проходить через 13 регионов Китая, длина ее составит около 4500 км, а ширина – около 100 км (Селищев, 2021). К 2024 г. площадь насаждений составляет около 333 тыс. км^2 (Кулик, 2024).

В странах Африки, наиболее подверженых процессам опустынивания (Сенегал, Мавритания, Мали, Буркина-Фасо, Нигер, Нигерия, Чад, Судан, Эритрея, Эфиопия, Джибути, Сомали) создается «Великая зеленая стена» – проект Африканского союза, направленный на препятствование деградации земель путем лесомелиорации южнее Сахары. Согласно проекту, «стена» будет иметь мозаичную структуру, предполагающую создание лесонасаждений в зависимости от природных условий и выполняемых функций. Завершение проекта запланировано в 2030 г., однако из запланированных 100 млн га деградированных земель к 2024 г. облесены 20 га (Кулик, 2024).

Оценка влияния зашитного лесоразведения на степные и агроландшафты. Таким образом, в аридных регионах России и мира был сформирован лесомелиоративный каркас, т. е. система защитных лесонасаждений с различной степенью завершенности и сохранности, включающий разнообразные по структуре, составу и функциям типы насаждений (полезащитные, водозащитные, противоэрозионные лесополосы, массивные лесонасаждения, «зеленые стены» и т. д.). Наряду с безусловным положительным эффектом защитных лесонасаждений

существует их негативное влияние как на природные экосистемы, так и на сельхозугодья, связанные, прежде всего, с их современным неудовлетворительным состоянием.

По результатам многолетних исследований, а также опроса землепользователей, руководителей крестьянско-фермерских хозяйств, агрономов были выявлены позитивные и негативные факторы степного лесоразведения.

Лесополосы продуваемой и ажурной конструкции при должном уходе снижают скорость ветра, ослабляют действие суховеев, как следствие – сохраняется почвенная влага, твердые осадки в зимний период равномерно распределяются по пашне. Также снижение скорости ветра, особенно в ночное время, способствует равномерному покрытию при химической обработке полей, уменьшает губительное воздействие пестицидов на граничащие с полем экосистемы. Однако такой эффект возможен только при завершенной системе лесополос (расстояние между лесоплосами не более 30 высот кроны) и ее продуваемости. В противном случае лесополоса практически не выполняет своих функций. Причем многие лесные культуры (вяз мелколистный, лох узколистный), использующиеся для агролесомелиорации, не достигают необходимой высоты кроны.

Известно противоэрозионное значение защитных лесонасаждений, препятствующих как водной эрозии, так и ветровой (в том числе опустыниванию), защита дорог от заноса снегом, водорегулирующее значение и др.

Кроме того, леса (в том числе искусственные) и даже лесные полосы шириной несколько метров являются местами обитания многих видов животных, местами концентрации, особенно в зимнее время, зайца-русака, серой куропатки, косули, часто – гнездования вяхиря, пустельги и др. птиц, в том числе редких для степной зоны.

Лесонасаждения могут быть использованы как источник лесных ресурсов для сбора плодов растений (особенно при наличии плодовых культур), грибов, лекарственных растений и т. д., поделочного сырья. Одним из новых направлений использования лесных ресурсов является корнепластика, дрифтвуд. Некоторые древесные и кустарниковые степные виды (вяз мелколистный, сосна обыкновенная, береза повислая, дуб черешчатый) иногда приобретают совершенно уникальные формы вплоть до «пружинообразной». В Оренбургской области выявлены природно-антропогенные месторождения (усыхающие лесополосы) экспонатов корнепластики. Фактически бросовый, пожароопасный сухостой можно использовать в качестве материала для инсталляций. Новационный вид искусства инсталляции предполагает минимальное вмешательство в природный материал, исключающее любую доработку до образа, но при этом аранжировку и дополнение таксидермическим материалом, анималистическим фарфором, природными камнями и минералами, чеканкой, и т. д.

Несмотря на положительный эффект лесомелиорации, отмечаются также некоторые негативные ее последствия. Лесополосы занимают существенную площадь сельскохозяйственных угодий, зачастую входят в состав кадастрового выдела поля. Так, например, на поле площадью 200 га при ширине 10 м лесополоса занимает 6 га, что эквивалентно в среднем 12 т зерна или 180 тыс. руб.

При отсутствии ухода защитные лесные насаждения загущены либо вырождаются, что особенно заметно при наличии в их составе вяза мелколистного, клена ясенелистного, лоха узколистного. При загущенности происходит неравномерное распределение снега на поле и, как следствие, неравномерное увлажнение. Загущенные лесополосы являются источниками патогенных микроорганизмов и вредителей, при большой доле сухостоя – источниками повышенной пожарной опасности.

Значительной проблемой является экспансия из лесополос на сельскохозяйственные угодья древесной растительности. Вяз мелколистный и клен ясенелистный совершают экспансию даже на регулярно распахиваемые земли, что зачастую приводит к выбытию сельхозугодий в связи с их полным зарастанием.

В сухостепных регионах зрелые лесополосы испаряют влагу в прилегающей полосе поля шириной 15-20 м (около 9 га поля), что особенно заметно при развитии озимых культур в сухую осень. В некоторых случаях землепользователи вынуждены, например, в Алтайском крае, засевать такие полосы многолетними травами даже на самых плодородных землях.

При зарастании заброшенных сельскохозяйственных угодий вязом мелколистным, лохом узколистным и другими древесными видами из лесополос происходит изменение естественного степного ландшафта – формируется несвойственное данной территории редколесье. Полезащитное лесоразведение ухудшает условия жизни типично степных представителей животного мира, таких, как сурок, сайгак, стрепет, дрофа (Левыкин и др., 2007).

Одной из главных проблем лесомелиорации является отсутствие ухода за насаждениями, что связано с его низкой рентабельностью. В большинстве случаев полезащитные лесополосы находятся в собственности крестьянско-фермерских хозяйств, сельскохозяйственных кооперативов и других сельскохозяйственных предприятий, но использование средств землепользователей для поддержания лесонасаждений в удовлетворительном состоянии маловероятно по причине больших экономических и трудозатрат.

При отсутствии ухода за защитными лесонасаждениями возможно несколько вариантов их динамики. Определенная часть насаждений вырождается частично или полностью в результате старения, пожаров и других неблагоприятных факторов, в ряде случаев (в зависимости от лесных культур) происходит загущение. Другой вариант динамики – распространение поросли путем самосева из посадок на моловостребованные сельхозугодья, особенно на почвах легкого механического состава. В результате формируются своеобразные урочища – колки и редколесья («саванноиды»).

В связи с этим существуют две противоположные проблемы. В некоторых случаях лесная растительность (чаще сосна обыкновенная и береза повислая) распространяется на залежные земли, формируются леса самосевного происхождения, возраст которых в некоторых случаях составляет 25-30 лет. Например, в Целинном муниципальном округе Курганской области площадь таких лесов составляет приблизительно 740 га, что составляет 0,31 % сельскохозяйственных земель. Однако подверженные облесению территории продолжают числиться землями сельскохозяйственного назначения, и собственники земли во избежание штрафных санкций вынуждены проводить затратные мероприятия по раскорчевке и уничтожению молодых лесных массивов вместо перевода участка в категорию земель лесного фонда.

При использовании в качестве лесных культур интродуцентов-агреофитов, происходит зарастание ими не только выведенных из сельскохозяйственного использования земель, но и естественных ландшафтов. Например, берега рек подвержены зарастанию кленом ясенелистным и лохом узколистным, вторичные степи – вязом мелколистным, грушей лесной, скумпией в южных регионах России.

Природоподобие в лесомелиорации. В современных условиях целесообразным представляется использование природоподобных технологий в лесомелиорации, т. е. технологий природопользования, воспроизводящих свойственные ненарушенным экосистемам процессы, формирующих близкие к естественным устойчивые природно-антропогенные ландшафты. Лесомелиорацию также можно считать природоподобной технологией, но необходимо ее совершенствование, использование новых методов.

Нами определены следующие основные признаки природоподобия степной лесомелиорации:

- аборигенный породный состав насаждений, т.е. использование древесных пород, свойственных данной местности и полное отсутсвие интродуцентов;

- лесопригодность типов местности, почв, предполагающая создание лесонасаждений с учетом условий произрастания и исключительно в местах, где лесная растительность возможна в естественном виде, главным образом – местах исторического произрастания, отказ от масштабного облесения последних участков целинных и вторичных степей, особенно при наличии краснокнижных видов;

- куртинность лесонасаждений как один из главных факторов устойчивости;

- смешение лесных культур в насаждениях, препятствующее развитию болезней растений и способствующее формированию устойчивых лесных экосистем;

- разновозрастный состав насаждений;

- минимальные нарушения почвенного покрова и использование по-возможности посева при лесовосстановлении;

- диффузный тип лесонасаждений, предполагающий отсутсвие четкой границы между деревьями разных пород и возрастов, естественное изреживание, мозаичность;

- жизнестойкость насаждений;

- лесовосстановление на новой основе адекватно приоритетам экономического и социокультурного развития страны и потребностям землепользователей;

- учет оптимальной лесистости территории.

Лесомелиоративная деятельность возможна в местах с особой необходимостью лесной растительности: в порядке оперативных противоэрозионных мер (для закрепления песков, оврагов); вдоль дорог, по берегам рек и других водоемов, в районах с частными суховеями и пыльными бурями. Перспективным направлением лесоразведения представляется создание вблизи населенных пунктов «зеленых зон», выполняющих кроме прочего рекреационную функцию и, в некоторых случаях, играющих роль «буферной зоны» ландшафтно-экологического каркаса. Также представляется возможным перевод эффективно самовосстановившихся лесов на бывшей малопродуктивной пашне в категорию земель лесного фонда. В тех метах, где лесомелиоративные мероприятия необходимы, но невозможны или нерентабельны по причине отсутствия лесорастительных условий (например, плакоры в сухостепных областях), возможны другие способы фитомелиорации (например, многолетними травянистыми растениями) (Чибилев и др., 1992, 2016).

Заключение. Обобщение российского (советского) и мирового опыта лесомелиорации позволило сделать выводы об общих проблемах защитных лесонасаждений, связанных, в основном, с отсутствием ухода за ними, несоответствием насаждений лесорастительным условиям. Основными направлениями динамики лесонасаждений являются их вырождение (частичная или полная гибель, загущение) и распространение на выведенные из хозяйственного использования земли или естественные ландшафты. При лесомелиоративных работах необходимо применение природоподобных технологий. Основные признаки природоподобия в лесомелиорации: аборигенный породный состав насаждений; лесопригодность типов местности, почв; куртинность лесонасаждений; смешение лесных культур; разновозрастный состав насаждений; минимальные нарушения почвенного покрова; диффузный тип лесонасаждений; жизнестойкость насаждений. Лесомелиоративная деятельность возможна в местах исторического произрастания лесной растительности, на песках и оврагах в качестве противоэрозионных мер, по берегам водоемов, в районах распространения суховеев и пыльных бурь, в окрестностях населенных пунктов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Вельмовский П. В., Левыкин С. В., Казачков Г. В., Яковлев И. Г., Грудинин Д. А. Ландшафтные критерии степной лесомелиорации. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2016;1(57):10-12 [Velmovsky P. V., Levykin S. V., Kazachkov G. V., Yakovlev I. G., Grudinin D. A. Landscape criteria of steppe forest reclamation. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 2016;1(57): 10-12].

Высоцкий Г. Н. Как садить лес в наших степях и как за ним ухаживать. Москва; Ленинград: Гослесбумиздат, 1949 [Vysotsky G. N. How to plant a forest in our steppes and how to take care of it. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat, 1949].

Гулянов Ю. А. Роль природоподобных технологий и мелиоративных аграрно-технических мероприятий в улучшении экологической обстановки в бассейне реки Урал. *Таврический вестник аграрной науки,* 2023;4(36):51-75. doi: 10.5281/zenodo.10276752 [Gulyanov Yu. A. The role of nature-like technologies and reclamation agricultural and technical measures in improving the environmental situation in the Ural River basin. *Tavrichesky Bulletin of Agrarian Science*, 2023;4(36):51-75. doi: 10.5281/zenodo.10276752].

Докучаев, В. В. Наши степи прежде и теперь. 2-е изд. Москва: Сельхозгиз, 1953 [Dokuchaev, V. V. Our steppes before and now. 2nd ed. Moscow: Selkhozgiz Publ., 1953].

Ерусалимский В. И., Рожков В. А. Многофункциональная роль защитных лесных насаждений. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева.* 2017;(88):121-137. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-121-137 [Erusalimskii V. I., Rozhkov V. A. The multi-

functional role of protective forest plantations. *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2017;(88):121-137. (In Russ.) https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-121-137].

Кулик К. Н., Свинцов И. П. Проблемы защитного лесоразведения в России. *Использование и охрана природных ресурсов в России.* 2009;2(104):58-60 [Kulik K. N., Svintsov I. P. Problems of protective wood cultivation in russia. *Use and protection of natural resources in Russia.* 2009;2(104):58-60].

Кулик К. Н., Кулик К. Д., Слайковская Е. С. Научное обеспечение предотвращения опустынивания агроландшафтов на юго-востоке Европейской России. В: Сб. материалов X международного симпозиума «Степи Северной Евразии», 27 мая - 2 июня 2024 г. Оренбург: Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН, 675-682. doi: 10.24412/cl-37200-2024-675-682 [Kulik K. N., Kulik K. D., Slaykovskaya E. S. Scientific support for the prevention of desertification of agricultural landscapes in southeastern European Russia. In: Collection of materials of the X International Symposium "Steppes of Northern Eurasia", May 27 - June 2, 2024 Orenburg: Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 675-682. doi: 10.24412/cl-37200-2024-675-682].

Кулик К. Н., Беляев А. И., Пугачева А. М., Зыкова А. А. Глобальные проекты агролесомелиорации и их реализация. *Вестник Российской академии наук.* 2024;94(1):55-65. doi: 10.31857/S0869587324010071 [Kulik K. N., Belyaev A. I., Pugacheva A. M., Zykova A. A. Global agroforestry projects and their implementation*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences.* 2024;94(1):55-65. doi: 10.31857/S0869587324010071].

Кулик К. Н. 75 лет Плану преобразования природы. Итоги и уроки реализации. *Научно-агрономический журнал*. 2023;4(123):08-15. doi: 10.34736/FNC.2023.123.4.001.08-15 [Kulik K. N. 75 Years of the Nature Transformation Plan. Results and Lessons of Implementation. *Scientific Agronomy Journal*. 2023;4(123):08-15. doi: 10.34736/FNC.2023.123.4.001.08-15].

Лаксман К. Г. Наилучший способ сеять древесные семена для произрастания лесов в сибирских степях. *Тр. Вольн. Эконом. общ.* 1769;12:67-83 [Laxman K. G. The best way to sow woody seeds for the growth of forests in the Siberian steppes. *Proceedings of the Free Economic Society*, 1769;12:67-83].

Левыкин С. В., Чибилева В. П., Казачков Г. В. Агроэкологическое значение степных лесомелиораций. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2007;4(16-1):26-30 [Levykin S. V., Chibileva V. P., Kazachkov G. V. Agroecological significance of steppe forest reclamation. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 2007;4(16-1):26-30].

Левыкин С. В., Чибилев А. А., Вельмовский П. В., Казачков Г. В., Чибилев А. А. (Мл) Принципы модернизации лесомелиоративного каркаса Оренбургской области. *Вестник Оренбургского государственного университета.* 2015;13(188):168-174 [Levykin S. V., Chibilev A. A., Velmovsky P. V., Kazachkov G. V., Chibilev A. A. (Jr.) Principles of modernization of the forest reclamation framework of the Orenburg region. *Bulletin of Orenburg State University*, 2015;13(188):168-174].

Логгинов Б. И., Устиновская Л. Т. Выращивание высокопродуктивных лесонасаждений в степных районах СССР М., 1966 [Logginov B. I., Ustinovskaya L. T. Cultivation of highly productive forests in the steppe regions of the USSR, Moscow, 1966].

Манаенков А. С., Корнеева, Е. А. Биогеографические аспекты оценки эффективности защиты пахотных земель лесными полосами. *Вестник Московского университета. Серия 5: География.* 2021;3:48-54 [Manaenkov A. S., Korneeva, E. A. Biogeographic aspects of assessing the effectiveness of protection of arable lands by forest strips. *Bulletin of the Moscow University. Episode 5: Geography.* 2021;3:48-54].

Матякин Г. И. Опыт создания лесных полос посевом. Москва, Ленинград: Гослесбумиздат, 1949 [Matyakin G. I. The experience of creating forest strips by sowing. Moscow, Leningrad: Goslesbumizdat, 1949].

Мерзленко М. Д., Бабич Н. А. Выдающиеся лесоводы-лесокультурники России: биографический словарь. Москва: Издательство Архангельского государственного технического университета, 2005 [Merzlenko M. D., Babich N. A. Outstanding foresters and forest cultivators of Russia: biographical dictionary. Moscow: Arkhangelsk State Technical University, 2005].

Постановление Совета Труда и Обороны 29 апреля 1921 г. «О борьбе с засухой» / https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/354768 [Resolution of the Council of Labor and Defense on April 29, 1921 "On combating drought". Access mode: https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/354768].

Постановление СНК СССР и ЦК ВКП(б) от 26 октября 1938 г. «О мерах обеспечения устойчивого урожая в засушливых районах юго-востока СССР» / https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/245872 [Resolution of the Council of People's Commissars of the USSR and the Central Committee of the CPSU(b) dated October 26, 1938 "On measures to ensure a stable harvest in the arid regions of the south-east of the USSR". Access mode: https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/245872].

Постановление Совета Министров СССР и ЦК ВКП(б) 20 октября 1948 г. № 3960 «О плане полезащитных лесонасаждений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких и устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах европейской части СССР» / https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/387810 [Resolution of the Council of Ministers of the USSR and the Central Committee of the CPSU(b) on October 20, 1948 No. 3960 "On the plan for protective forest plantations, the introduction of grassland crop rotations, the construction of ponds and reservoirs to ensure high and stable yields in the steppe and forest-steppe regions of the European part of the USSR". Access mode: https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/387810].

Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР 20 марта 1967 г. «О неотложных мерах по защите почв от ветровой и водной эрозии» / https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/355498 [Resolution of the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers of the USSR on March 20, 1967 "On urgent measures to protect soils from wind and water erosion". Access mode: https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/355498].

Селищев А. С. Опыт Китая по борьбе с опустыниванием и озеленению страны: история, итоги и перспективы. *Российско-китайские исследования.* 2021;5(3):168-178. doi: 10.17150/2587-7445.2021.5(3).168-178 [Selishchev A. S. China's Experience in Combating Desertification and Greenifyng the Country: History, Outcomes and Prospects. *Russian and Chinese Studies.* 2021;5(3):168-178. doi: 10.17150/2587-7445.2021.5(3).168-178].

Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2035 года. 2-е издание. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2023 [Strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation for the period up to 2035, 2nd edition. Volgograd. FSC of agroecology RAS Publ. House, 2023].

Танкова Ж. В., Танков Д. А. Типичные описания ослабленных и погибших насаждений государственной защитной лесной полосы «Гора Вишневая - Каспийское море» в Оренбургской области. В: Сб. материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование». Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. – г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, 2023; 370-372 [Tankova Zh. V., Tankov D. A. Typical descriptions of weakened and dead plantings of the state protective forest strip "Mount Vishnevaya - Caspian Sea" in the Orenburg region. In: Collection of materials of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Forests of Russia: politics, industry, science, education". St. Petersburg, May 24-26, 2023. – St. Petersburg: St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 2023; 370-372].

Турусов В. И., Лепехин А. А., Чеканышин А. С. Опыт лесной мелиорации степных ландшафтов (к 125-летию «Особой экспедиции…» В. В. Докучаева): Монография. Воронеж: Изд-во «Истоки», 2017 [Turusov V. I., Lepekhin A. A., Chekanyshin A. S. The experience of forest reclamation of steppe landscapes (dedicated to the 125th anniversary of the "Special Expedition..." by V. V. Dokuchaev): The monograph. Voronezh: Istoki Publishing House, 2017].

Цветков, М. А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1957 [Tsvetkov M. A. The changes of forest cover in European Russia from the end of XVII century to 1914. Moscow, RAS USSR, 1957].

Чибилев А. А. Экологическая оптимизация степных ландшафтов. Оренбург: Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, 1992 [Chibilev A. A. Ecological optimization of steppe landscapes. Orenburg: Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1992].

Чибилев А. А., Левыкин С. В., Вельмовский П. В., Казачков Г. В., Яковлев И. Г., Потокина С. М. Геоэкологические основы степной лесомелиорации: гармония степи и лесного наследия. *Проблемы геоэкологии и степеведения.* Т. 2. Развитие научной школы в Институте степи УрО РАН. Екатеринбург, 2012;3:76-85 [Chibilev A. A., Levykin S. V., Velmovsky P. V., Kazachkov G. V., Yakovlev I. G., Potokina S. M. Geoecological foundations of steppe forest reclamation: harmony of

steppe and forest heritage. *Problems of geoecology and Steppe studies.* Vol. 2. Development of the scientific school at the Institute of Steppe Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Yekaterinburg, 2012;3:76-85]

Чибилев А. А., Левыкин С. В., Вельмовский П. В., Чибилев А. А.-мл., Казачков Г. В. Оптимизация лесомелиоративного каркаса степных регионов. Оренбург: Институт степи УрО РАН, 2016 [Chibilev A. A., Levykin S. V., Velmovsky P. V., Chibilev A. A. (Jr.), Kazachkov G. V. Optimization of the forest reclamation framework of steppe regions. Orenburg: Institute of the Steppe Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016].

Kulik K. N., Belyaev A. I., Pugacheva A. M. The role of protective afforestation in drought and desertification control in agro-landscapes. Arid ecosystems. 2022;13:1-10. doi: https://doi.org/10.1134/S2079096123010079.

Suchkov D. K. Environmental and Economic Efficiency Protective Afforestation in the Arid Zoned. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2021;13(3):119-138. doi: 10.12731/2658-6649-2021-13-3-119-138.

Информация об авторах

Левыкин Сергей Вячеславович, д. г. н, профессор РАН, г. н. с., Институт степи УрО РАН, г.Оренбург, ул. Пионерская, 11, stepevedy@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0949-9939.

Гулянов Юрий Александрович, д. с-х. н., в. н. с., Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, iury.gulynov@yandex.ru, ORCID 0000-0002-5883-349X.

Казачков Григорий Викторович, к. б. н., с. н. с., Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, tsvikaz@yandex.ru, ORCID 0000-0001- 6779-8334.

Садертдинов Руслан Рамильевич, м. н. с., Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11, 89228570618@mail.ru, ORCID 0009-0006-8761-3046.

Information about the authors

Levykin Sergey Vyacheslavovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, 11 Pionerskaya St., e-mail:stepevedy@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0949-9939.

Gulyanov Yuri Alexandrovich, Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, 11 Pionerskaya St., e-mail: iury.gulynov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5883-349X.

Kazachkov Grigory Viktorovich, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, 11 Pionerskaya str, tsvikaz@yandex.ru, ORCID: 0000-0001- 6779-8334.

Sadertdinov Ruslan Ramilevich, Junior Researcher, Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, 11 Pionerskaya St., 89228570618@mail.ru, ORCID: 0009-0006-8761-3046.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Author of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 502.171 (470.45) DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.012.112-122

Анализ состояния зеленых насаждений дендрологического кластера ФНЦ агроэкологии РАН в г. Камышине Волгоградской области

Калмыкова Е. В.✉,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Россия

Аннотация. В рамках проведения мероприятий по восстановлению зеленых насаждений дендрологического кластера ФНЦ агроэкологии РАН г. Камышин проведено комплексное экологическое обследование, основанное на оценке распространения видов по категориям встречаемости количества особей одного вида в процентах от общего числа особей и оценке экологической устойчивости насаждений с использованием комплексного интегрального показателя. Цель исследований – оценка состояния зеленых насаждений дендрологического кластера ФНЦ агроэкологии РАН в г. Камышине Волгоградской области. Проведен анализ распространения видов на территории дендрария, где были выделены категории встречаемости: 6 видов присутствуют в насаждениях в единичных экземплярах, в незначительном количестве – 22,3 и 23,3 % видов входят в категории «умеренно встречающиеся виды» и «очень редко встречающиеся виды», категория «редко встречающиеся виды» самая обширная – насчитывает около 53,4 % видов от общей коллекции. Преобладающей породой является Робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.) в результате интенсивного естественного возобновления и отсутствия регулярного ухода за коллекцией. Получен средний уровень показателя интегральной устойчивости дендроколлекции Нижневолжской станции по селекции древесных пород (ЭУД) – 18 баллов. Для поддержания на данном уровне и повышения устойчивости дендроколлекции необходимо проводить мероприятия по: омоложению зеленых насаждений, регулярному уходу за коллекцией, увеличению числа видов интродуцентов, определению оптимального количества экземпляров различных жизненных форм растений в композиции с учетом особенностей конкретной коллекции, образовательной и просветительской деятельности.

Ключевые слова. Дендрарий, инвентаризация, зеленые насаждения, биоресурсная дендрологическая коллекция, оценка состояния, адаптация, устойчивость.

Финансирование. Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания по Государственному заданию 125021902499-2 «Научные основы, принципы и методология моделирования и формирования систем полифункциональных дендрологических кластеров антропогенных экосистем в контексте устойчивого развития для оптимизации природопользования, борьбы с засухой и опустыниванием в малолесных регионах России».

Цитирование. Калмыкова Е. В. Анализ состояния зеленых насаждений дендрологического кластера ФНЦ агроэкологии РАН в г. Камышине Волгоградской области // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):112-122. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.012.112-122.

Поступила в редакцию: 17.11.2025 Принята к печати: 05.12.2025

UDC 502.171 (470.45) DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.012.112-122

Analysis of the Condition of Green Spaces in the Dendrological Cluster of the Federal Scientific Center of Agroecology, RAS, Kamyshin, Volgograd Region

Kalmykova E. V.✉

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Agro-ecology, Integrated LandReclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", Volgograd, Russia

Abstract. As part of the restoration of green spaces within the dendrological cluster of the Federal Scientific Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences in Kamyshin, a comprehensive environmental assessment was carried out. The assessment was based on the analysis of species distribution by occurrence categories (the proportion of individuals of a given species relative to the total number of individuals) and the evalua-tion of the ecological stability of plantings using an integrated sustainability index. The aim of the study was to assess the condition of green spaces in the dendrological cluster of the Federal Scientific Center for Agroe-cology of the Russian Academy of Sciences in Kamyshin, Volgograd Region. An analysis of species distribu-tion within the arboretum identified several occurrence categories: six species were represented by single specimens; 22.3 and 23.3 % of species fell into the categories of “moderately occurring” and “very rare” species; the “rare species” category was the largest, comprising about 53.4 % of the total collection. The pre-dominant species was Robinia pseudoacacia L., resulting from intensive natural regeneration and the lack of regular maintenance of the collection. The dendrocollection of the Nizhnevolzhskaya Station for Woody Plant Breeding showed an average integrated sustainability index of 18 points. To maintain this level and improve the sustainability of the dendrocollection, measures are required, including the rejuvenation of green spaces, regular maintenance of the collection, increasing the number of introduced species, determining the optimal number of specimens of different plant life forms in accordance with the characteristics of the collection, and conducting educational and outreach activities.

Keywords. arboretum, inventory, green spaces, bioresource dendrological collection, condition assessment, adaptation, sustainability.

Finding. The work was carried out under State Assignment No. 125021902499-2 "Scientific foundations, principles, and methodology for modeling and developing systems of multifunctional dendrological clusters of anthropogenic ecosystems in the context of sustainable development for optimizing nature management and combating drought and desertification in sparsely forested regions of Russia".

For citation. Kalmykova E. V. Analysis of the Condition of Green Spaces in the Dendrological Cluster of the Federal Scientific Center of Agroecology, RAS, Kamyshin, Volgograd Region // Scientific and Agronomic Journal. 2025;4(131):112-122. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.012.112-122.

Received: 17.11.2025 Accepted: 05.12.2025

Введение. В настоящее время, в эпоху бурного роста урбанизации и населения городов, нарастающего темпа загрязнения окружающей среды, роль озеленения становится чрезвычайно высокой для поддержания благоприятной среды человека (Baiturina, 2023). Для создания гармоничного природно-экологического каркаса урбо- и агроландшафтов необходимо использовать растения, обладающие комплексом средостабилизирующих качеств (Бебия и др., 2018; Морозова, 2022; Kondo M. et al., 2018; Maas J. et al., 2009), полностью адаптированных к агроклиматическим условиям произрастания. Только на основе многолетнего опыта изучения взаимодействия деревьев и кустарников с окружающей средой, подбора наиболее устойчивых и перспективных видов растений, а также сохранение и восстановление уже существующих насаждений возможно сформировать благоприятную среду в городах (Болышова и др., 2012; Anjum S. et al., 2011).

Камышинский дендрарий представляет собой уникальный объект зеленых насаждений с накопленным многолетним опытом интродукционной работы в богарных условиях (Вишнякова, 2024). Дендрарий предназначен для проведения фундаментальных, поисковых и прикладных комплексных исследований в области интродукции, биоэкологии, селекции, семеноведения и семеноводства. С 1931 г. проведены интродукционные испытания более 450 видов древесных растений, которые позволяют обосновать перспективность введения новых видов в культуру (хозяйственно ценных, лекарственных или декоративных) с учетом особенностей прохождения возрастных состояний, ритмов роста и сезонного развития растений, периода длительности существования в новых условиях; уровень устойчивости растений к неблагоприятным факторам окружающей среды (морозам, засухам, резким сменам температур и др.). В настоящее время по итогам инвента-

ризации 2023-2024 гг. были выявлены существенное сокращение и изменение видового состава по отношению к показателям прошлых лет, загущение посадок за счет интенсивного естественного возобновления, что привело к разрушению структуры дендрария по систематическому принципу (Вишнякова, 2024; Семенютина и др., 2024).

Исследование встречаемости видов в зеленых насаждениях необходимо для выделения устойчивых видов и расширения видового ассортимента зеленых насаждений, разработки практических рекомендаций по реконструкции зеленых насаждений, компенсационному озеленению, системе содержания и защиты озелененных территорий (Морозова, 2024; Шихова, 2023). Оценка экологической устойчивости насаждений деревьев на исследованной территории позволяет выявить устойчивые виды деревьев к экстремальным факторам урбанизированной среды и факторы, влияющие на эту устойчивость, оценить степень нарушенности древостоя под влиянием экологических факторов (Федорова и др., 2021).

Таким образом, для повышения устойчивости дендроколлекции следует проводить инвентаризацию древесных растений для рекомендации необходимых мероприятий по восстановлению насаждений, регулярному уходу за коллекцией, увеличению числа видов интродуцентов и определению оптимального количества экземпляров различных жизненных форм растений в композиции с учетом особенностей конкретной коллекции.

Цель исследований – оценка состояния зеленых насаждений дендрологического кластера ФНЦ агроэкологии РАН в г. Камышине Волгоградской обл.

Материалы и методы. Объектами исследования служили древесные растения дендроколлекций на территории Нижневолжской станции по селекции древесных пород – филиала ФНЦ агроэкологии РАН г. Камышина Волгоградской области. Ассортимент растительности устанавливался по результатам инвентаризации зеленых насаждений в 2024-2025 гг. В ходе исследования проводился пересчет деревьев, определялась таксономическая единица, количество и встречаемость видов. Территория исследования расположена в Камышинском р-не на севере Волгоградской обл., относится к степной климатической зоне с резко-континентальным климатом, среднегодовое количество осадков в диапазоне 400 мм. Характерна повышенная ветровая активность в течение года, почвы каштановые с преобладанием легкосуглинистых (более 65 %).

Оценка распространения видов основывалась на категориях встречаемости количества особей одного вида в % от общего числа особей (рис. 1) (Сперанская, 2006).

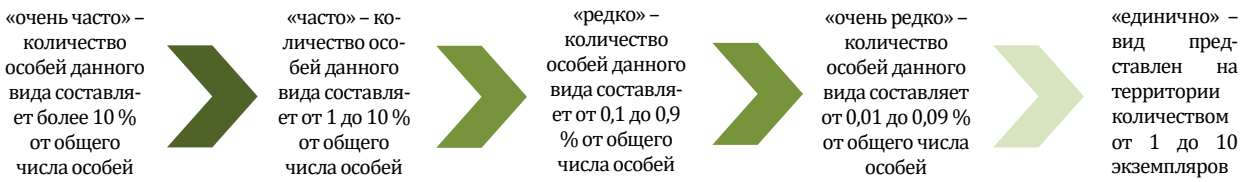


Рис. 1. Категории встречаемости одного вида в процентах от общего числа особей

Оценка экологической устойчивости насаждений производилась с использованием интегрального показателя комплексной оценки (Воронин, 2018), в котором учитываются маркеры экологического благополучия (значение баллов в интервале от 1 до 5): доля интродуцированных видов растений из других регионов, средний возраст насаждений в составе дендроколлекций, доля единичных таксонов, доля засухоустойчивых растений в составе коллекций растений, доля зимостойких растений в составе коллекций (табл. 1).

Интегральный показатель экологической устойчивости дендроколлекций (ЭУД) – это сумма баллов биоэкологических показателей, представленных выше (формула 1), которая отражает результат комплексной оценки устойчивости дендроколлекций (рис. 2):

$$ЭУД = \Sigma I_{xi}, \quad (1)$$

где I_{xi} – баллы по биоэкологическим показателям (I_{x1}– доля интродуцированных видов растений из других регионов; I_{x2}– средний возраст насаждений в составе дендроколлекций; I_{x3} – доля единичных таксонов; I_{x4} – доля засухоустойчивых растений в составе коллекции; I_{x5} – доля зимостойких растений в составе коллекции).

Таблица 1

Критерии показателей экологической устойчивости

Балл	Доля интродуцированных видов из других регионов, %	Средний возраст насаждений в дендроколлекции, лет	Доля видов, предствленных единичными экземплярами, %	Доля зимостойких видов в составе коллекции, %	Доля засухоустойчивых видов в составе коллекции, %
1	Более 40	Более 100	Более 40	Менее 50	Менее 50
2	31-40	81-100	31-40	50-60	50-60
3	21-30	61-80	21-30	61-70	61-70
4	11-20	31-60	11-20	71-80	71-80
5	5-10	10-30	0-10	Более 80	Более 80

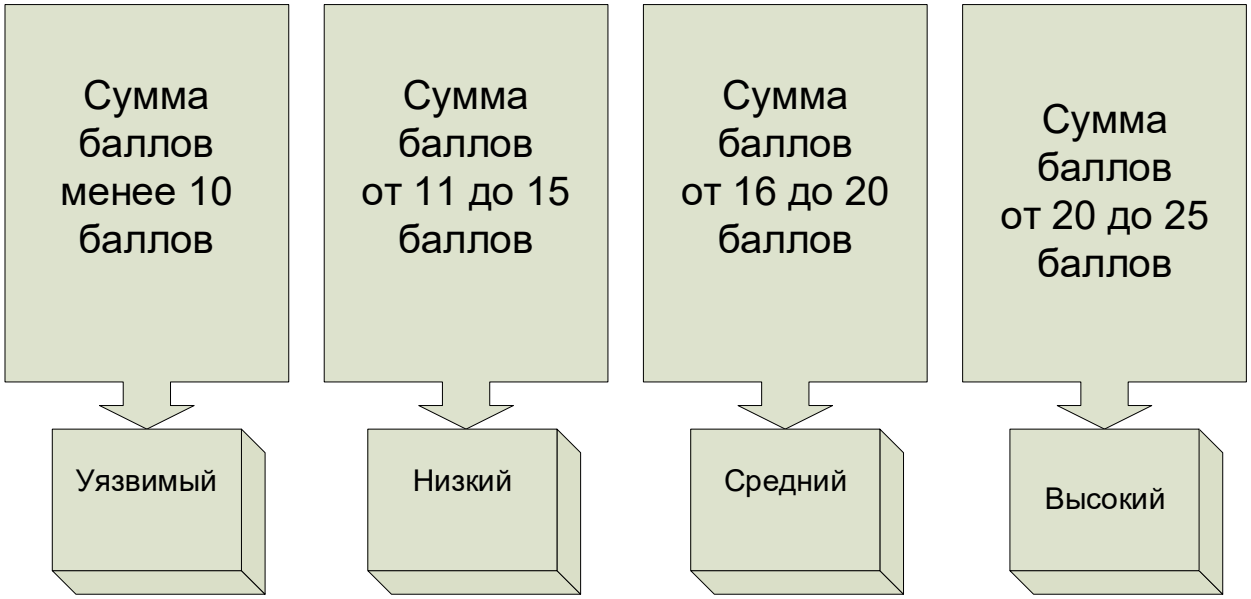


Рис. 2. Шкала оценки уровня устойчивости дендроколлекций

Диагностику жизненного состояния древесных растений проводили по методике В. А. Алексеева (Алексеев, 1989) (рис. 3).

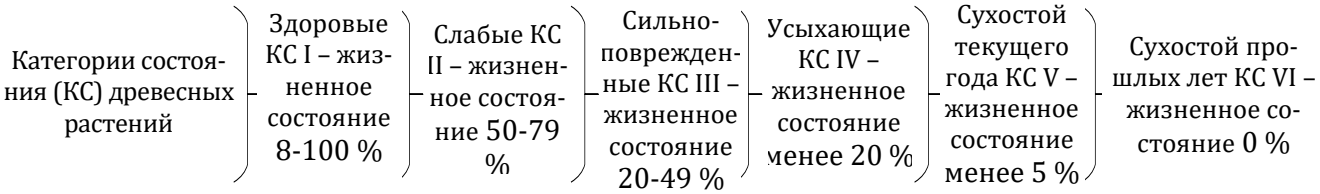


Рис. 3. Категории жизненного состояния (КС) древесных растений

Статистическая обработка результатов исследований выполнялась по методике Б. А. Доспехова (Доспехов, 2014).

Результаты. В составе коллекции дендрария выявлено 31 семейство, 66 родов и 103 вида (Вишнякова, 2024). По результатам инвентаризации проведена оценка встречаемости видов на территории дендрологического кластера (рис. 4).

В настоящее время на территории дендрария преобладающей породой является робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.). Представленность вида – 18,91 % от общего количества видов коллекции на территории дендрария. Категория жизненного состояния (КС) данного вида отмечается как здоровые – КС I. В условиях региона исследований *R. pseudoacacia* L. – быстрорастущее лесообразующее засухоустойчивое дерево, отличается высокой декоративностью, активно используется в агролесомелиорации. На изучаемой территории ранее проводились мероприятия по удалению данного вида в рамках ухода за насаждениями, что спровоци-

ровало усиленную побегообразовательную способность и повысило интенсивность естественного возобновления. Для рационального использования территории и расширения ассортимента ценных насаждений, придания им многообразного и выразительного внешнего облика необходимо проводить рубки ухода и контролировать количество экземпляров в коллекции.

Единичными экземплярами деревьев и кустарников представлены 6 видов: боярышник круглолистный (*Crataegus rotundifolia* Moench.), бузина черная (*Sambucus nigra* L.), ель колючая голубая (*Picea pungens* Engelm.), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), спирея Вангутта (*Spiraea×vanhouttei* (Briot)), ясень узколистный *(Fraxinus angustifolia* Vahl). Жизненное состояние данной группы относим также к здоровым насаждениям – КС I. Причиной сложившейся ситуации является воздействие внешних факторов (пожары, механические повреждения насаждений, загрязнение дендрологических групп и т. д.).

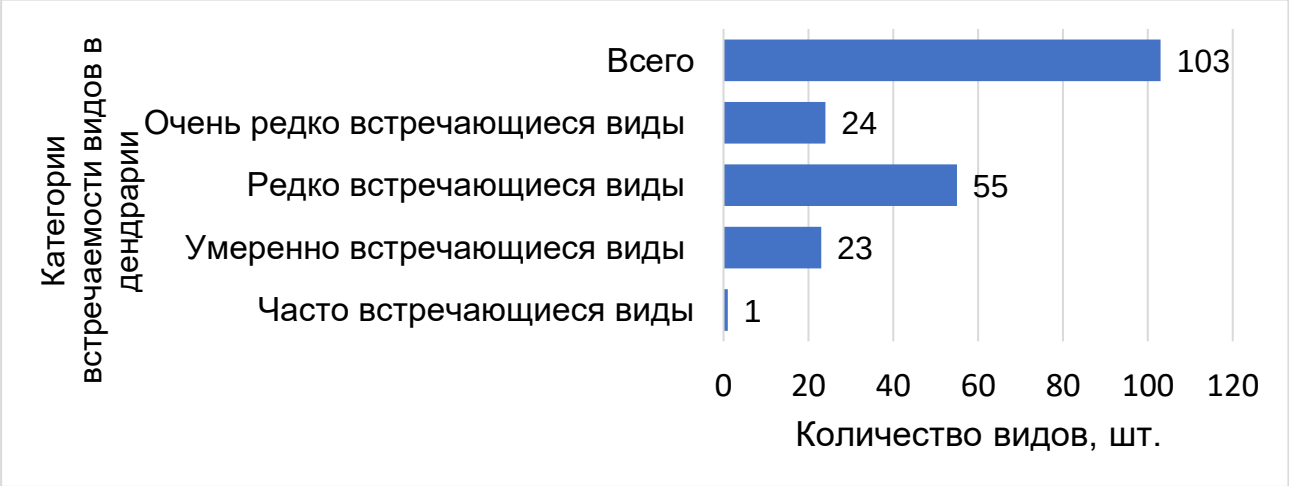


Рис. 4. Оценка встречаемости видов на территории дендрологического кластера

Категория «редко встречающиеся виды» самая обширная – насчитывает около 55 видов, что составляет 53,4 % от общей коллекции. Насаждения совершенно здоровые, хорошего роста, имеют подрост, по жизненному состоянию относится к первой категории, что говорит о перспективности представителей данной группы, виды заслуживают внимания для создания зеленых насаждений за счет своей декоративности и устойчивости в городских условиях (рис. 5). Широкое распространение получают в парках, в крупных скверах, в озеленении школ и детских садов.

22,3 и 23,3 % видов входят в категории «умеренно встречающиеся виды» и «очень редко встречающиеся виды» (рис. 6, 7). Согласно методическим разработкам В. А. Алексеева (1989), жизненное состояние представителей «умеренно встречающихся видов» и «очень редко встречающихся видов» относится ко второй категории – жизненное состояние 50-79 %, зафиксировано слабое повреждение древесных растений: присутствуют признаки ослабления, асимметричности кроны, усыхания ветвей до 28 % и т. д.

В результате оценки экологической устойчивости насаждений (табл. 2) определена доля интродуцированных видов из других регионов, которые составляют более 40 %, – 1 балл. На территории Нижневолжской станции по селекции древесных пород продолжается работа по интродукционным испытаниям новых видов и сортов древесных растений, а также процесс натурализации культивируемых видов.

Средний возраст насаждений в дендроколлекции 68,8 лет – 3 балла. Большая продолжительность роста древесной растительности обусловливает сочетание благоприятного температурного режима и удовлетворительной влагообеспеченности, что позволяет выработать жизненные ритмы, в основном совпадающих с климатом данной природной зоны. Однако следует проводить работу по омоложению коллекции, путем стимулирования образования молодых побегов, создания новых крон, а также посадки и подсадки деревьев и кустарников в уже существующие типы насаждений.

Доля видов, представленных единичными экземплярами в коллекции, составляет 6,8 %, в итоге по данному показателю фиксируем 5 баллов.

Обмерзают более 50 % однолетних побегов у айланта высочайшего, форестьеры новомексиканской, церцисса канадского, шелковицы белой и т. д.

Обмерзает не более 50 % однолетних побегов у 16,5 % видов, 77,7 % видов деревьев и кустарников не обмерзают в течение зимнего периода, что формирует количественную оценку экологической устойчивости в 4 балла (рис. 8).

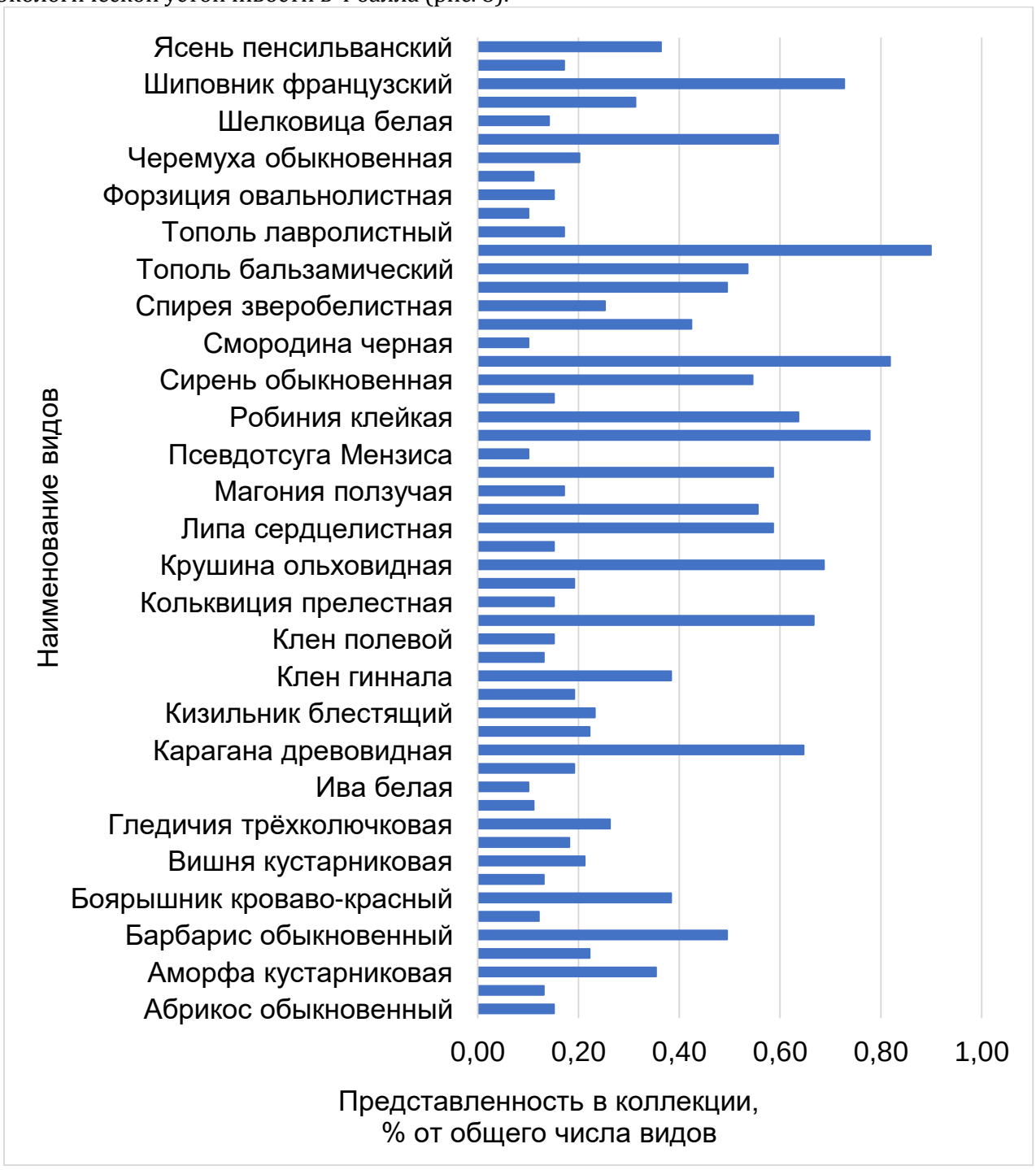


Рис. 5. Представленность видов в дендроколлекции, встречающиеся «редко» (от 0,1 до 0,9 %)

99 % растений коллекций не реагирует на засушливые условия – 5 баллов. У махалебки обыкновенной тургор листьев пониженный, растения заметно снижает прирост в данный или следующий за ним год.

Таким образом, в состав коллекции входят засухоустойчивые и зимостойкие виды, которые раскрыли свой адаптационный потенциал, выявлена прямая зависимость этих показателей на представленность коллекции, что позволяет решать вопросы подбора и использова-

ния биологически разнообразного ассортимента растений для создания экологически сбалансированных насаждений с многофункциональным действием: эстетическим, рекреационным, почвозащитным, почвоулучшающим, обеспечивающим улучшение природной среды и т. д.

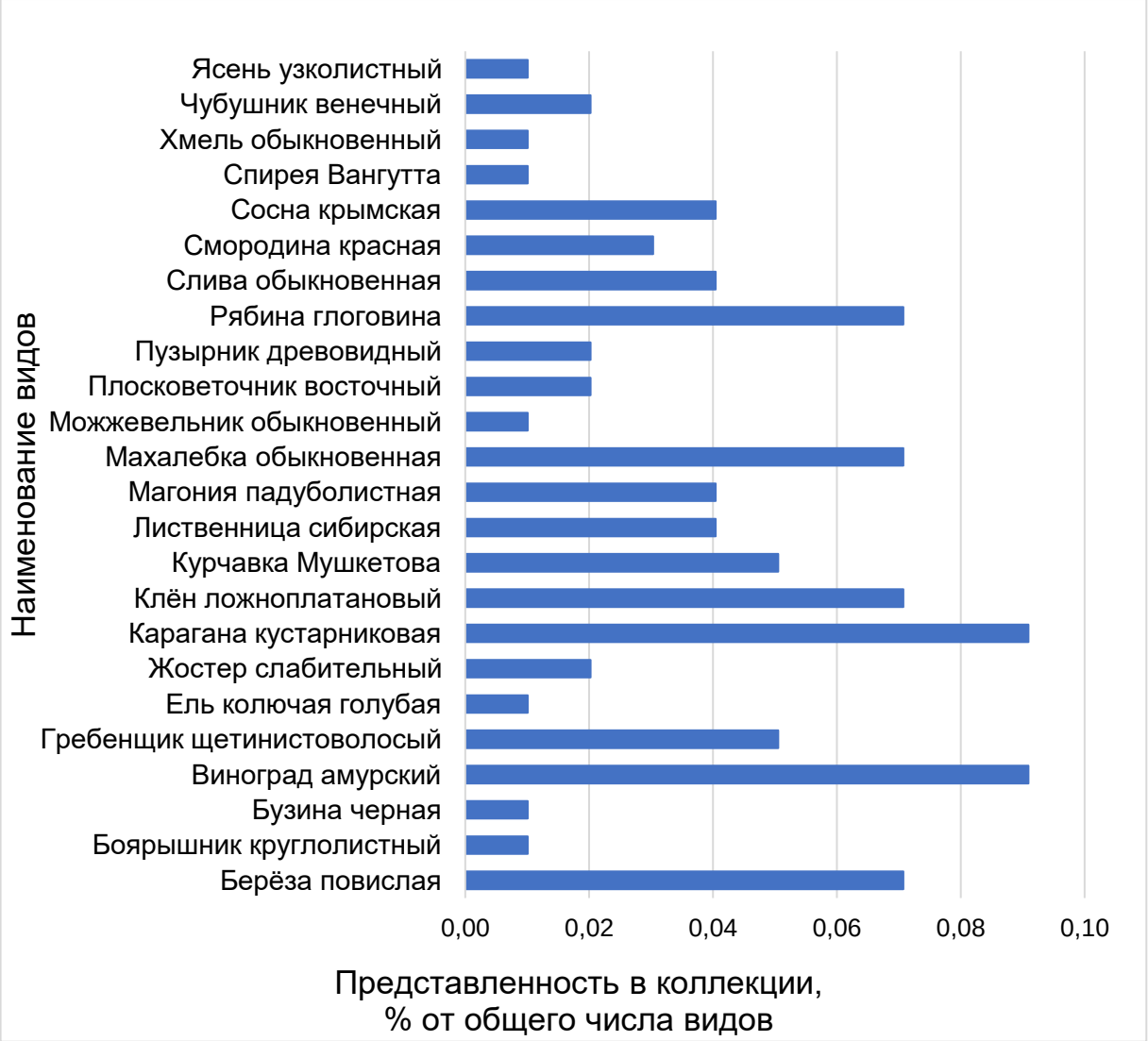


Рис. 6. Представленность видов в дендроколлекции, встречающихся «очень редко» (от 0,01 до 0,09 %)

Согласно оценке экологической устойчивости насаждений по таким биоэкологическим показателям как доля интродуцированных видов растений из других регионов, средний возраст насаждений в составе дендроколлекций, доля единичных таксонов, доля засухоустойчивых и зимостойких растений в составе коллекций получен средний уровень показателя интегральной устойчивости дендроколлекций (ЭУД) – 18 баллов (табл. 2).

Полученные результаты дают право рекомендовать повышение устойчивости дендроколлекции, в том числе: восстановление и омоложение зеленых насаждений, регулярный уход за коллекцией, увеличение числа видов интродуцентов, определение оптимального количества экземпляров различных жизненных форм растений в композиции с учетом особенностей конкретной коллекции, образовательная и просветительская деятельность на высоком уровне.

Все это позволяет в дальнейшем вести работу по моделированию прогнозируемого состояния дендроколлекций с высокой точностью, упрощению выбора моделей развития дендрологических коллекций по интегральному балльному показателю экологической устойчивости дендроколлекций.

Обсуждение: Многолетний накопленный опыт работы с зелеными насаждениями позволяет в настоящее время предоставить обоснованные оценочные сведения по перспективно-

му ассортименту деревьев и кустарников в отношении к тем или иным факторам окружающей среды природно-экологического каркаса урбо- и агроландшафтов Волгоградского региона (Кириллов и др., 2013; Семенютина и др., 2024).

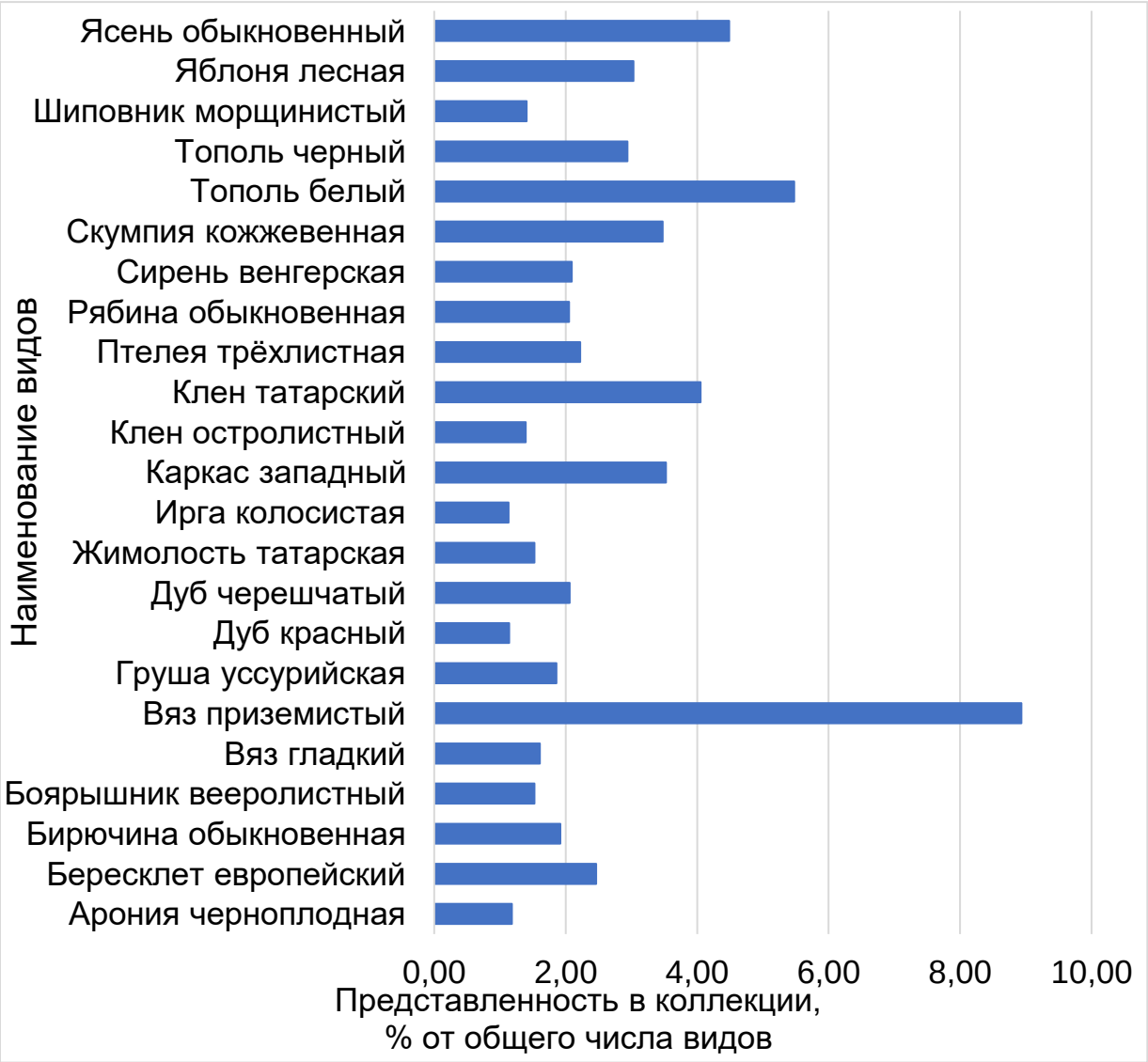


Рис. 7. Представленность видов в дендроколлекции, встречающиеся «часто» (от 1 до 10 %)

Таблица 2

Количественная оценка показателей экологической устойчивости

Показатель экологической устойчивости	Критерии показателей экологической устойчивости	Количественная оценка, балл	Общее количество баллов
Доля видов из других регионов	Более 50 %	1	18
Средний возраст насаждений в дендроколлекции	68,8 лет	3	
Доля видов, представленных единичными экземплярами	6,8 %	5	
Доля зимостойких видов в составе коллекции	77,7 %	4	
Доля засухоустойчивых видов в составе коллекции	99,0 %	5	

Подбор ассортимента растений осуществляется посредством комплекса показателей, которые основываются на оценке состояния в конкретных климатических условиях района произрастания, особое значение придают целевому назначению объекта озеленения, а также природным особенностям озеленяемой площади (Семенютина и др., 2024; Сперанская, 2006; Baiturina, 2023; Maas J. et al., 2009). От правильного подбора древесных пород в различных насаждениях зависит их эстетическая выразительность, экологическая функция, технологичность, эффективность и долговечность службы. Очень важен охват биоэкологических особенностей древесных растений по отношению к факторам окружающей среды (Шихова, 2023). Немаловажно также знать и реакцию древесного растения на ту или иную агротехнику выращивания (Сапронова и др., 2023).

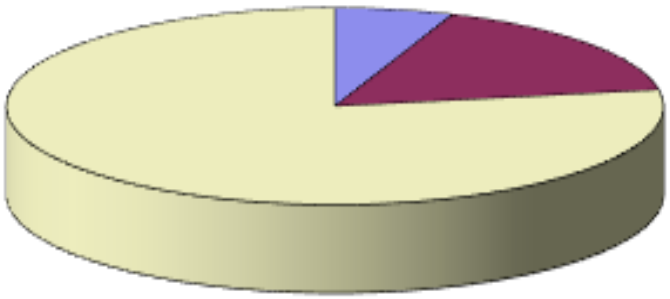


Рис. 8. Доля зимостойких видов в составе коллекции, % (– обмерзает более 50% однолетних побегов, обмерзает не более 50% однолетних побегов, растение не обмерзает)

Однако не только анализ и оценка существующего опыта выращивания того или иного ассортимента древесных пород должны стать критерием для рекомендации лучших, но и дальнейшее изучение поведения новых деревьев в новых для них условиях и подбор нового ассортимента пород, более декоративных, устойчивых и долговечных.

Заключение. Проведенная оценка распространения видов позволяет выделить древесные растения по категориям встречаемости на территории дендрологического кластера. 6 видов присутствуют в насаждениях в единичных экземплярах, в незначительном количестве – 22,3 и 23,3 % видов входят в категории «умеренно встречающиеся виды» и «очень редко встречающиеся виды», категория «редко встречающиеся виды» самая обширная – насчитывает около 53,4 % видов от общей коллекции. Преобладающей породой является Робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.) в результате интенсивного естественного возобновления и отсутствия регулярного ухода за коллекцией. Получен средний уровень показателя интегральной устойчивости дендроколлекции Нижневолжской станции по селекции древесных пород (ЭУД) – 18 баллов. Для поддержания на данном уровне и повышения устойчивости дендроколлекции необходимо проводить мероприятия по: омоложению зеленых насаждений, регулярному уходу за коллекцией, увеличению числа видов интродуцентов, определению оптимального количества экземпляров различных жизненных форм растений в композиции с учетом особенностей конкретной коллекции, образовательной и просветительской деятельности.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. *Лесоведение*. 1989 ;4: 51-57. [Alekseev V. A. Diagnostics of the vital state of trees and tree stands. *Forestry.* 1989; 4: 51-57].

Бебия С. М., Джакония Е. Ф., Титов И. Ю. Методика комплексной оценки декоративности и экологической устойчивости древесных растений на Черноморском побережье Кавказа. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2018;4(70),3:35-50. [Bebiya S. M., Dzhakonia E. F., Titov I. Yu. Methodology for a comprehensive assessment of the ornamental properties and environmental sustainability of woody plants on the Black Sea coast of the Caucasus. *Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry.* 2018; 4 (70), 3: 35-50].

Болышова О. Г., Бухарина И. Л. Проблемы и перспективы озеленения малых городов Липецкой области. *Аграрный вестник Урала*. 2012; 9(101):59-62. [Bolyshova O. G., Bukharina

I. L. Problems and prospects of greening small towns in the Lipetsk region. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2012; 9(101):59-62].

Вишнякова В. В. Инвентаризация биоресурсной дендрологической коллекции Камышинского дендрария ФНЦ агроэкологии РАН. *Научно-агрономический журнал*. 2024; 4(127):78-86. doi https://doi.org/10.34736/FNC.2024.127.4.011.78-86 [Vishnyakova V. V. Inventory of the bioresource dendrological collection of the Kamyshin Arboretum of the Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences. *Scientific and Agronomic Journal.* 2024; 4(127):78-86. doi https://doi.org/10.34736/FNC.2024.127.4.011.78-86].

Воронин А. А., Царалунга В. В. Методические рекомендации по применению технологии повышения экологической и биологической устойчивости биоценозов лесостепного ботанического сада: методические указания. Воронеж: Научная книга. 2018:30 с. ISBN 978-5-98222-972-4. [Voronin A. A., Tsaralunga V. V. Methodological recommendations for the application of technology for increasing the ecological and biological sustainability of biocenoses of the forest-steppe botanical garden: methodological instructions. Voronezh: Nauchnaya kniga. 2018: 30 p. ISBN 978-5-98222-972-4].

Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Учебник для высших сельскохозяйственных учебных заведений. Стереотипное издание. Перепечатка с 5-го изд. доп. и перераб. М.: Альянс. 2014:351 [Dospekhov B. A. Methodology of the field experiment. Textbook for higher agricultural educational institutions. Stereotype edition. Reprinted from the 5th ed. supplement. and revision. Moscow: Alliance. 2014:351]

Кириллов С. Н., Половинкина Ю. С. Оценка состояния зеленых насаждений общего пользования г. Волгограда. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки.* 2013; 1(5):29-34. [Kirillov S. N., Polovinkina Yu. S. Assessment of the condition of public green spaces in Volgograd. *Bulletin of Volgograd State University. Series 11: Natural Sciences.* 2013; 1(5):29-34].

Морозова С. В. Роль рекреационного пространства и стресс-факторов городской среды (на примере жителей мегаполиса и малых городов). *Архитектура, градостроительство и дизайн*. 2022;2(32):13-23. [Morozova S. V. The role of recreational space and stress factors in the urban environment (based on the example of residents of a metropolis and small towns). *Architecture, urban planning and design.* 2022; 2 (32): 13-23].

Морозова Г. Ю. Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2024;6(402):106-120. doi https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-106-120 [Morozova G. Yu. Plant viability in an urbanized environment. News of higher educational institutions. *Forestry journal.* 2024; 6 (402): 106-120. doi https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-106-120].

Сапронова Д. В., Беляев А. И., Семенютина А. В., Хужахметова А. Ш., Сапронов В. В. Усовершенствованные технологии выращивания сеянцев лесообразующих пород в Волгоградской области. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023; 15(5):228-245. doi https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-5-935 [Sapronova D. V., Belyaev A. I., Semenyutina A. V., Khuzhakhmetova A. SH., Sapronov V. V. Improved technologies for growing seedlings of forest-forming species in the Volgograd region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023; 15(5):228-245. doi https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-5-935].

Семенютина А. В., Хужахметова А. Ш., Сапронова Д. В., Долгих А. А., Сапронов В. В. Научные основы и методы мониторинга состояния и динамики дендрофлоры лесомелиоративных комплексов в целях предотвращения деградации и опустынивания территорий. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН. 2024;196. ISBN 978-5-6048368-8-0. [Semenyutina A. V., Khuzhakhmetova A.Sh., Sapronova D. V., Dolgikh A. A., Sapronov V. V. Scientific foundations and methods for monitoring the state and dynamics of dendroflora of forest reclamation complexes in order to prevent degradation and desertification of territories. Volgograd: Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences. 2024;196. ISBN 978-5-6048368-8-0].

Сперанская Н. Ю. Оценка жизненного состояния и пути оптимизации зеленых насаждений Барнаула. *Труды молодых ученых Алтайского государственного универ-ситета*.

2006;3:218-222. [Speranskaya N. Yu. Assessment of the vital state and ways of optimizing green spaces in Barnaul. *Works of young scientists of Altai State University*. 2006;3:218-222].

Федорова Д. Г., Назарова Н. М., Кухлевская Ю. Ф. Модификация методики оценки жизнеспособности интродуцентов в соответствии с условиями сухостепной зоны Оренбургского Предуралья. *Вестник Нижневартовского государственного университета*. 2021; 2(54): 57-62. doi https://doi.org/10.36906/2311-4444/21-2/07 [Fedorova D. G., Nazarova N. M., Kukhlevskaya Yu. F. Modification of the methodology for assessing the viability of introduced species in accordance with the conditions of the dry steppe zone of the Orenburg Cis-Urals. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2021; 2(54): 57-62. doi https://doi.org/10.36906/2311-4444/21-2/07].

Шихова Н. С. Оценка функциональной эффективности древесно-кустарниковых видов в городском озеленении на примере Владивостока. *Лесоведение*. 2023; 3:277-289. doi https://doi.org/10.31857/S0024114823030105 [Shikhova N. S. Evaluation of the functional efficiency of tree and shrub species in urban landscaping using Vladivostok as an example. *Forest Science.* 2023; 3:277–289. doi https://doi.org/10.31857/S0024114823030105].

Baiturina R. R. Dendro therapeutic effect of plantings on citizens. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023;8(36). doi https://doi.org/10.23649/JAE.2023.36.5

Kondo M.C., Fluehr J.M., McKeon T., Branas C.C. Urban Green Space and Its Impact on Human Health. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(3):445. doi https://doi.org/10.3390/ijerph15030445.

Maas J., Verheij R. A., S. de Vries, Spreeuwenberg P., Schellevis F. G., Groenewegen P. P. Morbidity is related to a green living environment. *Epidemiol Community Health*. 2009;63(12):967-73. doi https://doi.org/10.1136/jech.2008.079038.

Vishnyakova V. V., Belyaev A. I., Kalmykova E. V. Assessment of Recreational Potential Dendrological Collections of the Federal Scientific Centre of Agroecology of the Russian Academy of Sciences. *Indian Journal of Agricultural Research.* 2024. Vol. 58, No. 4. P. 648-656. doi https://doi.org/10.18805/IJARe.AF-830.

Информация об авторах

Калмыкова Елена Владимировна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, главный научный сотрудник-заведующая лабораторией биоэкологии древесных растений, ФГБНУ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук; 400062, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, 97; e-mail: kalmukova-ev@vfanc.ru; ORCID 0000-0001-8530-9995.

Information about authors

Kalmykova Elena Vladimirovna, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Chief Researcher and Head of the Laboratory of Woody Plant Bioecology, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences; 400062, Russia, Volgograd, Universitetsky Ave., 97; e-mail: kalmukova-ev@vfanc.ru; ORCID 0000-0001-8530-9995.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Author of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

УДК 631 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.013.123-131

Ретроспективный анализ структуры сельскохозяйственных земель на западе Алтайского края

Хованская А. А.✉, Болгов И. А.
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Россия

Аннотация. В 1954-1958 гг. происходило освоение целинных земель в Алтайском крае, в ходе которого площадь пахотных земель значительно возросла. Для устойчивого поддержания и сохранения плодородия почв и высокой урожайности пахотных земель важно их рациональное использование. Территорией исследования является Кулундинский р-н Алтайского края, который находится в сухостепной природной зоне с резко континентальным климатом, что в свою очередь является зоной рискового земледелия. Актуальность работы заключается в обновлении данных о пространственной структуре сельскохозяйственных земель. Цель исследования – дешифрирование актуальных границ и ретроспективный анализ пахотных и залежных земель Кулундинского р-на. Для этой цели в разрезе 40 лет (с 1985 по 2025 гг.) использовались данные дистанционного зондирования Земли спутников Landsat 4, 5, 7, 8 (снимки с пространственным разрешением 30 м) и Sentinel-2 (с разрешение 15 м) в период конца весны-начала лета, конца лета-начала осени за исследуемый год, а также данные на конец лета-начала осени за предыдущий год. В процессе дешифрирования было выделено 2425 объектов общей площадью 146,5 тыс. га с разделением на пашню и залежь. Территория имеет большой процент распаханности – более 96 %. Анализируя динамику пахотных земель, важно отметить, что их наибольшая площадь приходится на 1985 г. По истечению 40 лет она сократилась на 6,22 тыс. га, в это же время в 2 раза увеличилась площадь залежных земель, что обусловлено деградацией пашни.

Ключевые слова. Агроландшафты; пахотные земли; деградация земель; геоинформационные технологии; дистанционное зондирование; Кулундинский р-н; Алтайский край.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ФНЦ агроэкологии РАН НИР FNFE-2025-0001 «Научные основы функционирования агролесоландшафтов и пастбищных экосистем, пространственно-временные закономерности таких изменений и прогноз их состояния в условиях деградации земельных и растительных ресурсов на основе динамики спектральных характеристик, актуализации пространственных данных, геоинформационных технологий и аэрокосмических методов».

Цитирование. Хованская А. А., Болгов И. А. Ретроспективный анализ структуры сельскохозяйственных земель на западе Алтайского края // Научно-агрономический журнал. 2025;4(131):123-131. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.013.123-131.

Поступила в редакцию: 11.11. 2025 Принята к печати: 08.12.2025

UDC 631 DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.013.123-131

Retrospective analysis of the structure of agricultural land in the western Altai Krai

Khovanskaya A. A., Bolgov I. A.
Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", Volgograd, Russia

✉ – Для контактов/Corresponding author.

Abstract. During the 1954-1958 Virgin Lands Campaign in Altai Krai, the area of arable land increased significantly. For the long-term preservation of soil fertility and stable crop yields, the rational use of arable land is essential. The research area is the Kulundinsky District of Altai Krai, located in the dry steppe zone with a sharply continental climate, which makes it a zone of risky agriculture. The relevance of the research is associated with the need to update data on the spatial structure of agricultural lands. The goal of the research was to delineate current boundaries and to perform a retrospective analysis of arable and fallow lands in the Kulundinsky District. For this purpose, remote sensing data from Landsat 4, 5, 7, and 8 (30 m spatial resolution) and Sentinel-2 (15 m resolution) were used over a 40-year period (1985-2025). Images were selected for late spring–early summer and late summer–early autumn of the study year, as well as for late summer–early autumn of the previous year. Image interpretation identified 2,425 objects classified as arable or fallow land with a total area of 146.5 thousand hectares. The territory is characterized by an extremely high degree of plowing – more than 96 %. Analysis of the dynamics of arable land showed that the maximum area was observed in 1985. Over the following 40 years, arable lands decreased by 6.22 thousand hectares, while fallow land doubled due to land degradation.

Keywords. Agrolandscapes; arable land; land degradation; geoinformation technologies; remote sensing; Kulundinsky District; Altai Krai.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Scientific Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Research Project No. FNFE-2025-0001 “Scientific foundations, principles and methodology of functioning of agroforest landscapes and pasture ecosystems, spatial and temporal patterns of their changes, and forecasting their state under land and vegetation degradation based on spectral dynamics, spatial data updating, geoinformation technologies and aerospace methods”.

For citation. Khovanskaya A. A., Bolgov I. A. Retrospective analysis of the structure of agricultural land in the western Altai Krai // Scientific Agronomy Journal. 2025;4(131):123-131. DOI: 10.34736/FNC.2025.131.4.013.123-131.

Received: 11.11.2025 Accepted: 08.12.2025

Введение. В настоящее время с наличием геоинформационных технологий открываются возможности для предварительного дистанционного мониторинга и подготовки данных для будущих исследований. Ретроспективный анализ сельскохозяйственных угодий дает возможность оценить динамику, трансформацию земельных ресурсов, также выявить причину и следствия изменения. Изучение и оценка таких аспектов критически важна для устойчивого развития сельского хозяйства и экономики региона. Рациональное использование пахотных и залежных земель способствуют сохранению и улучшению земли в ходе ее эксплуатации, а также предотвращению рисков деградации – ветровой и водной эрозии.

Алтайский край находится на юго-востоке Западной Сибири и является одним из важнейших сельскохозяйственных субъектов страны. В данной работе рассматривается территория Кулундинского р-на, площадь которого составляет 198 тыс. га[1]. Территория исследования находится в сухостепной природной зоне, климат характеризуется как резко континентальный, умеренно-засушливый, с чертами аридности, для которого типична суровая продолжительная зима и сравнительно короткое, но жаркое лето. Для юго-западных районов Кулундинской степи характерно большое количество света и тепла в вегетационном периоде и недостаточное увлажнение: за год выпадает 230-350 мм осадков (Харламова, Казарцева, 2017). 80 % от общего количества атмосферных осадков выпадает в теплое время года (с апреля по октябрь), часто в виде ливней, что способствует поверхностному стоку и слабому промачиванию почвы. Отличительной особенностью климата является превышение испаряемости над количеством выпадающих осадков, которое в свою очередь приводит к недостаточному увлажнению территории (Симонова и др., 2024).

Для Кулундинской равнины характерно большое количество соленых и солено-горьких озер. Озера, как правило, мелководны (глубина 2-4 м), с плоскими котловинами, подвержены значительным колебаниям уровня и площади в многолетнем и сезонном цикле (Симонова и др., 2024). На территории исследования расположены озера с высокой минерализацией, кото-

[1]Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа: http://ssl.rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 30.11.2025)

рая обусловлена интенсивным испарением и выносом солей грунтовыми водами (Евграфова, 2014). Питание таких озер происходит с помощью атмосферных осадков (дожди, таяние снега) и грунтовых вод, которые залегают очень близко к поверхности земли (Леонова и др., 2007). Также характерны резкие колебания уровня и площади озер вплоть до полного пересыхания и превращения в соры (солончаки), что обусловлено засушливым климатом.

Перечисленные особенности физико-географических условий территории исследования являются факторами засоления и, как следствие, деградации сельскохозяйственных земель. Актуальность работы связана с отсутствием современных данных о пространственном положении сельскохозяйственных земель, отсутствием разновременной статистики по муниципальным районам в открытом доступе. Кроме того, в исследовании (Болгов, Берденгалиева, 2023) выявлено завышение данных официальной статистики и информационных продуктов, таких как ESRI Land Cover и ESA WorldCover, которые основаны на автоматической классификации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), такие продукты подходят для масштабных исследований регионального или глобального уровней. Локальная геоинформационная система агроландшафтов в масштабе муниципальных образований может быть полезна для мониторинга и контроля использования земельных ресурсов, а также при принятии решений, направленных на сохранение продуктивности почв.

Цель исследования заключается в определении актуальных границ полей в Кулундинском р-не и ретроспективном анализе пахотных и залежных земель с использованием данных ДЗЗ.

Материалы и методы. Методика катографирования сельскохозяйственных угодий основана на методе экспертного дешифрирования композитных изображений за период с 1985 по 2025 гг. с интервалом 10 лет, с классификацией полей на пахотные угодья и залежь за каждый исследуемый год. Предварительное выделение контуров полей и создание векторного слоя, не имеющего временной привязки, осуществлялось на основе спутниковых изображений сверхвысокого разрешения Maxar в сервисе Google Erath PRO.

Временной охват исследования обусловлен ограниченностью материалов дистанционного зондирования Земли в открытом доступе. Так, наиболее ранние доступные спутниковые снимки, полученные с помощью мультиспектрального сканера (MSS) спутника Landsat-2, датируются мартом 1977 г. Изображения MSS имеют низкое для целей исследования разрешение (80 м), а также множество артефактов в виде полос и точек, что затрудняет их дешифрирование, и подходят для исследований на региональном или глобальном уровне. Для исследования на локальном уровне наиболее значимыми являются изображения, полученные со сканеров Thematic Mapper (TM, Landsat 4, 5), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+, Landsat 7) и Operational Land Imager (OLI, Landsat 8), имеющих разрешение 30 м, а также спутниковые снимки Sentinel-2 с разрешением 15 м (Lillesand et al., 2015).

Поскольку залежи представляют собой пахотные земли, которые больше года не используются для посева культурных растений и не обрабатываются под пар, использовались снимки, полученные в конце весны – начале лета, в конце лета – начале осени за исследуемый год, а также снимок конца лета-начала осени за предыдущий год (табл. 1). Это позволило с высокой достоверность классифицировать поля, неиспользуемые более года. Наиболее ранние снимки со сканеров TM спутников Landsat 4 и 5 отсутствуют в открытом доступе, в связи с чем в качестве источника данных за 1985 г. использовалась мозаика снимков 1984-1987 гг. в искусственных цветах. Также на территорию исследования отсутствуют снимки за 1995 г., поэтому для дешифрирования использовались снимки 1994 и 1996 гг. Снимки Landsat были получены на сайте Геологической службы США[2], снимки Sentinel – на сайте сервиса ВЕГА-Science[3].

Использовались композиты в комбинации каналов видимого спектра, которые обеспечивают достаточную контрастность для дешифрирования большинства полей, а также композиты в комбинации зеленого, ближнего (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) каналов для достоверной классификации полей, занятых культурными растениями, которые в естественных цветах могут быть неотличимы от залежей (Васильченко, 2022; Дорошенко, 2024). Использование снимков в период начала и конца вегетационного периода также добавляет дешифровочных признаков для точно определения контуров полей.

[2] EarthExplorer. – Режим доступа: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения: 30.11.2025)
[3] ВЕГА-Science. – Режим доступа: http://sci-vega.ru/ (дата обращения: 30.11.2025)

Таблица 1

Даты съемки спутниковых изображений

Год исследования	Спутник/источник данных	Дата съемки	ID/номер тайла
1985	Landsat TM Mosaics (1984-1987)	16.08.1984-02.08.1987	MTN-44-50_LOC
1995	Landsat-5	05.05.1994 06.06.1994 13.06.1994 18.06.1996 17.10.1996	150023, 150024 150023 151023 151023 150023
2005	Landsat-7	28.08.2004 11.05.2005 16.09.2005	150023, 150024 150023, 150024 150023, 150024
2015	Landsat-8	24.09.2014 15.05.2015 23.06.2015 19.08.2015 10.08.2015	151023, 151024 150023 151024 150023 151024
2025	Sentinel-2A Sentinel-2B Sentinel-2C	19.09.2024 11.06.2025 20.08.2025	44UMD 44UMD 44UMD

В результате был получен векторный слой, в котором каждому объекту были присвоены атрибуты по годам: 2 – пашня; 1- залежь; 0 – целинный участок, который будет распахан в будущем, либо участок, ранее использовавшийся в качестве пашни и переведенный в другую категорию земель. Обработка спутниковых снимкой, дешифрирование сельскохозяйственных полей, расчет площадей, а также присвоение атрибутов проводились в геоинформационной системе QGIS 3.28. Расчет средних высот полей производился на основе цифровой модели рельефа SRTM 1 Arc-Second в геоинформационной системе Global Mapper Pro 24.0. Дальнейшая работа с табличными данными и статистическая обработка проводились в программе Microsoft Excel 2019.

Результаты. В результате дешифрирования спутниковых изображений выделено 2425 участков полей, когда-либо использовавшихся в качестве пашни за период с 1985 по 2025 гг., общей площадью 146,5 тыс. га.

В 1954-1958 гг. в Алтайском крае проводилось широкомасштабное освоение целинных и залежных земель. К 1957 г.в Кулундинском р-не посевная площадь составляла 152,5 тыс. га – 96,8 % всех пахотнопригодных земель (Забровская, 2007). Так как в 1964-1966 произошли изменения административных границ района, некорректно сравнивать площади сельскохозяйственных земель по материалам на 1950-е гг. с результатами дешифрирования 1985-2025 гг. При этом высокая доля распаханности к концу программы освоения целины свидетельствует о том, что возможность роста сельскохозяйственного производства за счет вовлечения новых земель исчерпана. Это подтверждается данными дешифрирования: за 40 лет исследования доля сельскохозяйственных угодий незначительно изменяется и составляет в среднем 73,6 % от общей площади района (табл. 2). Кроме того, в структуре целинных земель, которые распахивались в течение периода исследования, наблюдается значительное уменьшение среднего размера новых полей, что так же свидетельствует о дефиците пахотнопригодных земель.

В структуре сельскохозяйственных земель района наблюдается значительная динамика за период исследования. Проведение мелиоративных мероприятий на полях, в том числе широкомасштабные посадки ЗЛН в начале 1970-х гг. (Забровская, 2007), позволили сохранить высокий уровень использования угодий: доля пашни составляла 96,36 % от общей доли сельскохозяйственных земель (рис. 1).

В 1990-х гг. наблюдается резкое сокращение посевных площадей (рис. 2). Спад сельскохозяйственного производства в этот период обусловлен экономическим причинами: разрушение системы отношений на селе в новых рыночных условиях, сокращение или прекращение государственной поддержки сельхозтоваропроизводителей, отсутствие оборотных средств, в

связи с чем они не могли рассчитывать на кредиты, конкуренция с иностранными производителями и др. Кризисные явления достигли угрожающих масштабов в первой половине 2000-х гг. (Земцов, 2016). В этот период наблюдается самый низкий уровень сельскохозяйственного производства, что в свою очередь отразилось на структуре сельскохозяйственных земель: к 2005 г. доля залежей достигла 19 %.

Таблица 2

Структура сельскохозяйственных земель Кулундинского р-на Алтайского края за период исследования

	1985 г.	1995 г	2005 г.	2015 г.	2025 г.
Пашня, тыс. га	140,84	128,61	118,54	135,26	134,62
Залежь, тыс. га	5,33	17,46	27,64	10,86	11,56
Всего сельскохозяйственных земель	146,16	146,08	146,18	146,12	146,18
Доля пашни в сельскохозяйственных сельскохозяйственных землях, %	96,36	88,04	81,09	92,57	92,09
Доля сельскохозяйственных земель в районе, %	73,58	73,54	73,59	73,56	73,59
Распахано целины, га	-	125,82	104,85	43,21	89,05
Переведено в другие категории земель	-	214,05	0	104,69	5,01
Средний размер полей, распаханных на целине, га	-	25,16 ± 24,66	34,95 ± 30,75	14,4 ± 7,98	6,8 5± 4,84

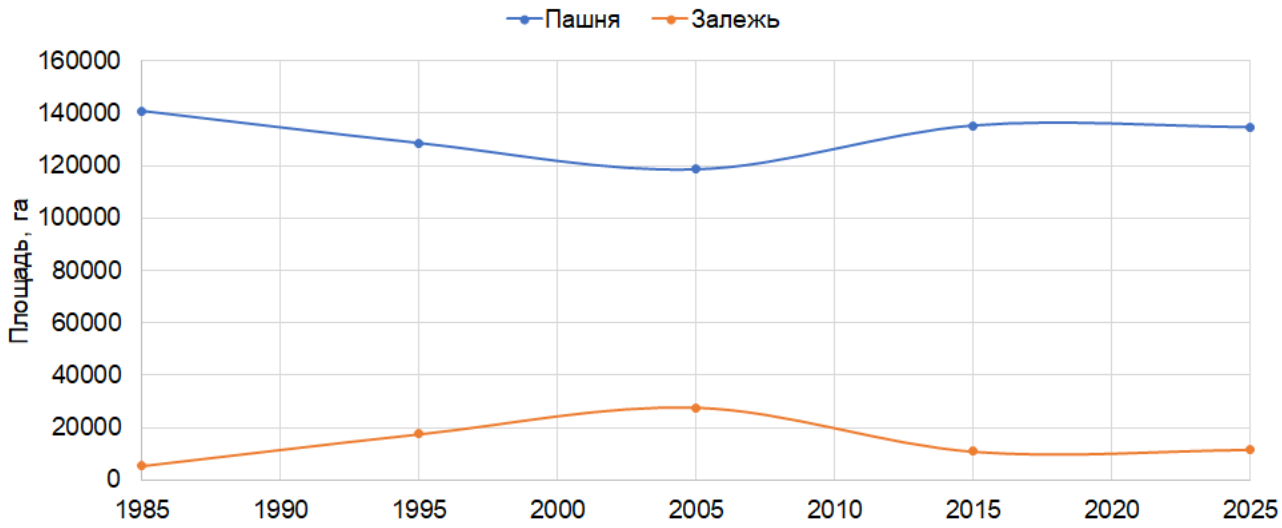


Рис. 1. Динамика площадей пашни и залежей в структуре сельскохозяйственных земель Кулундинского р-на

В 1990-х гг. наблюдается резкое сокращение посевных площадей (рис. 2). Спад сельскохозяйственного производства в этот период обусловлен экономическим причинами: разрушение системы отношений на селе в новых рыночных условиях, сокращение или прекращение государственной поддержки сельхозтоваропроизводителей, отсутствие оборотных средств, в связи с чем они не могли рассчитывать на кредиты, конкуренция с иностранными производителями и др. Кризисные явления достигли угрожающих масштабов в первой половине 2000-х гг. (Земцов, 2016). В этот период наблюдается самый низкий уровень сельскохозяйственного производства, что в свою очередь отразилось на структуре сельскохозяйственных земель: к 2005 г. доля залежей достигла 19 %.

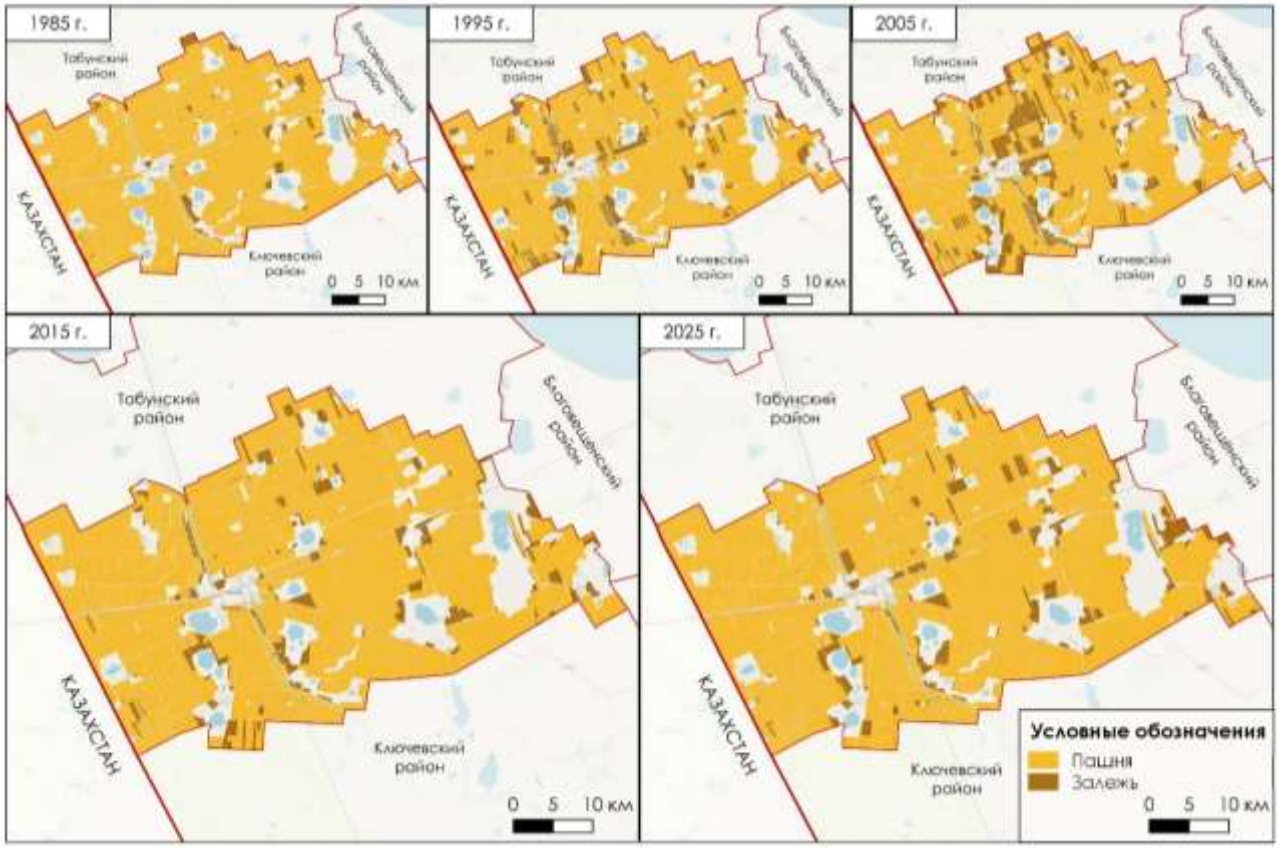


Рис. 2. Карта-схема пространственного положения сельскохозяйственных угодий Кулундинского района по годам

С началом более продуманной политики государства аграрный сектор стал адаптироваться к рыночной экономике, и показатели сельскохозяйственного производства начали расти. К 2015 г. в Кулундинском районе было распахано 19,8 тыс. га некогда заброшенных полей; доля пашни возросла до 92,57 %.

К 2025 г. значительных изменений в структуре сельскохозяйственных земель района не произошло: незначительно уменьшилась доля пашни, несколько увеличилась доля залежей. Доля посевных площадей к 2025 г. не достигла уровня 1985 г., площадь залежей увеличилась в 2 раза. Такое устойчивое снижение посевных площадей в течение 40 лет может свидетельствовать о деградации земель. Так, из 11563 га залежных земель к бессточным соленым озерам приурочено 6294 га. Вывод из сельскохозяйственного оборота этих земель связан с близким залеганием соленых грунтовых вод, так как бассейны озер приурочены к отрицательным формам рельефа (Леонова и др., 2007). Слабый промывной режим почвы приводит к засолению, поскольку недостаточное количество осадков не может вымывать соли из верхних горизонтов. В таких условиях грунтовые воды, богатые солями, поднимаются к поверхности, и при испарении воды соли остаются в верхнем слое почвы, накапливаясь до токсичных концентраций. Косвенно на это указывает высота над уровнем моря: залежные земли в среднем на 1 м ниже, чем пашня, соответственно, уровень залегания грунтовых вод выше.

Анализ возрастной структуры залежных земель (рис. 3), приуроченных к бассейнам соленых озер, показал высокую долю старых залежей, выведенных из использования более 40 лет назад: 1171 га или 28 %. С 1985 г. каждое десятилетие в окрестностях озер из сельскохозяйственного использования выводится в среднем 1130,7±49,4 пашни, что свидетельствует о развитии процессов деградации земель.

Обсуждение. Полученные результаты исследования согласуются с данными в работе З. А. Забровской, в которой описана история сельскохозяйственного освоения Кулундинского района в 1950-1980 гг., и дополняют их, в том числе данные об освоении целины, степени распаханности территории и статистические данные за период исследования (Забровская, 2007). С данными различных авторов (Евграфов, 2014; Клычков, Слажнева, 2020; Леонова и др., 2007;

Симонова и др., 2024) согласуются выводы о деградации сельскохозяйственных угодий, засолении почв близлежащих к озерам угодий, высокой минерализации грунтовых вод. Структура пашни и динамика посевов различных культур, охрана сельскохозяйственных угодий, эколого-географический анализ территории Кулунды были рассмотрены в работах отечественных исследователей (Важов и др., 2016; Боронина и др., 2018; Клычков, Слажнева, 2020) в первую очередь на основе официальных статистических данных.

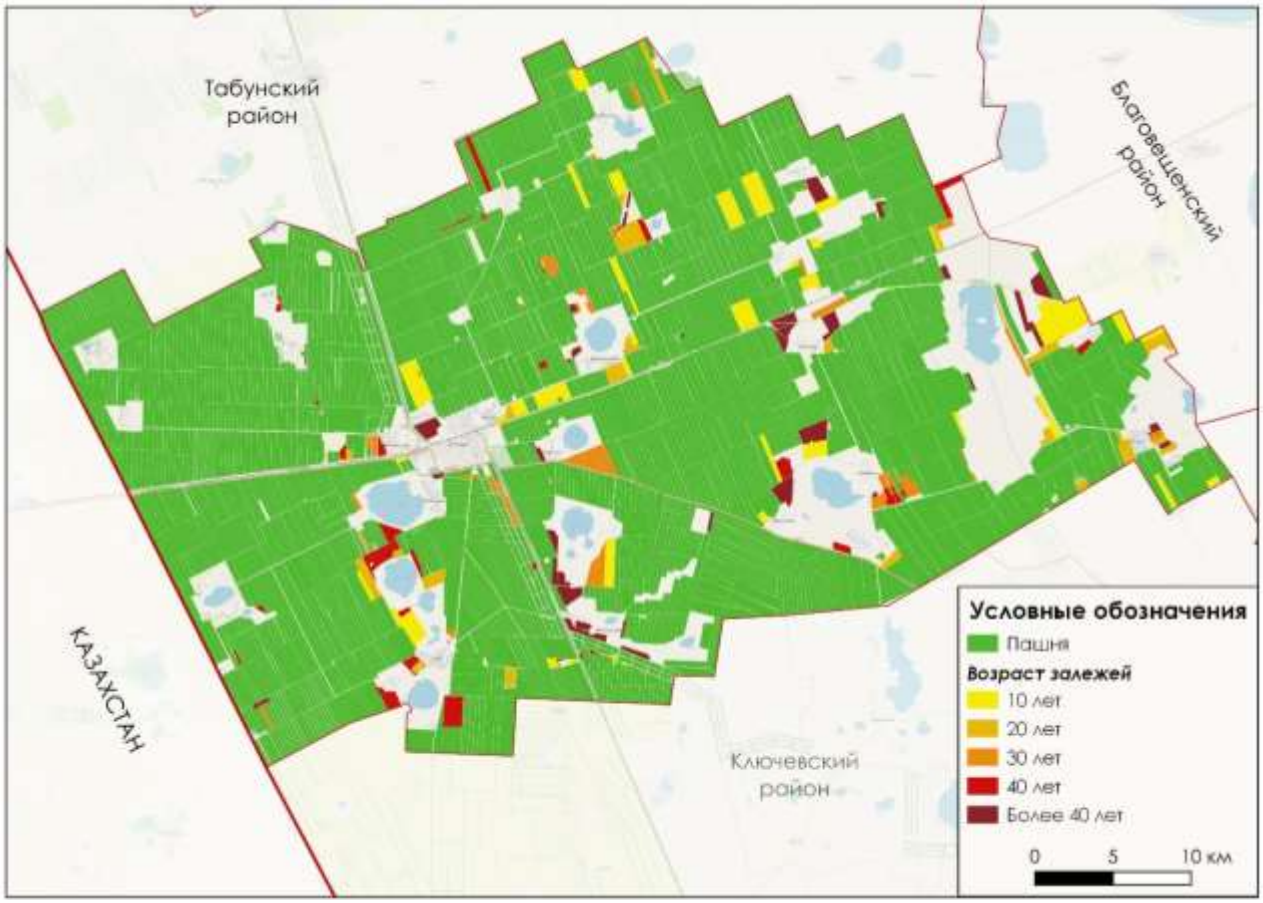


Рис. 3. Карта-схема классификации залежных земель Кулундинского р-на по возрасту

Важно отметить, что исследований сельскохозяйственных угодий Кулундинского района на основе данных ДЗЗ и определения их пространственной структуры не проводилось ранее, что имеет актуальность и значимость данной работы, так как полученные результаты дополняют и уточняют статистические данные, что было показано авторами в прошлых исследованиях (Болгов, Берденгалиева, 2023).

Заключение. В результате исследования на основе данных дистанционного зондирования Земли были определено пространственное положение сельскохозяйственных земель в период с 1985 по 2025 гг. с последующей классификацией на обрабатываемую пашню и залежные земли. Всего картографировано 2425 участков полей, хотя бы раз обрабатываемых за период исследования, общей площадью 146,5 тыс. га. Создана локальная геоинформационная система сельскохозяйственных угодий Кулундинского р-на Алтайского края.

Распаханность района составляет в среднем 96,36 %. Общая площадь сельскохозяйственных угодий практически не менялась за период исследования в силу того, что после масштабного освоения целинных и залежных земель в 1954-1958 гг. в регионе практически был исчерпан ресурс целинных пахотнопригодных земель, которые можно было бы обрабатывать, а площади полей, распаханных на целине – незначительны. В 1980-х гг. наблюдается высокая доля посевных площадей в структуре сельскохозяйственных земель. Неблагоприятная для аграрного сектора экономическая ситуация в 1990-х и начале 2000-х гг. привела к резкому сокращению обрабатываемой пашни. С развитием отрасли, обширные залежи стали вновь обра-

батываться. Однако доля посевных площадей так и не достигла уровня 1985 г., что связано с деградацией земель вследствие засоления, ростом доли старых залежей, приуроченных к бассейнам соленых озер, и экономической нерентабельностью их повторного использования под посев культур.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Болгов И. А., Берденгалиева А. Н. Анализ пространственной структуры сельскохозяйственных угодий юга Саратовского Заволжья. *Научно-агрономический журнал*. 2023;4(123): 60-67. doi: https://doi.org/10.34736/FNC.2023.123.4.009.60-67. [Bolgov I. A., Berdengalieva A. N. Analysis of the spatial structure of agricultural lands in the south of the Saratov Trans-Volga region. *Nauchno-agronomicheskiy zhurnal = Scientific and agronomic journal*. 2023;4(123): 60-67. doi: https://doi.org/10.34736/FNC.2023.123.4.009.60-67]

Боронина Н. Ю., Ещенко С. И., Татаринцев В. Л., Татаринцев Л. М. Охрана сельскохозяйственных угодий в сухостепной Кулунде. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2018;11(169): 42-49. [Boronina N. Yu., Yeshchenko S. I., Tatarintsev V. L., Tatarintsev L. M. Protection of agricultural lands in the dry steppe Kulunda. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Altai State Agrarian University.* 2018;11(169): 42-49]

Важов В. М., Важов С. В., Одинцев А. В. Структура пашни и посевы гречихи в Алтайском крае. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;4-6(46): 21-24. doi: https://10.18454/IRJ.2016.46.239. [Vazhov V. M., Vazhov S. V., Odintsovo A.V. The structure of arable land and buckwheat crops in the Altai Territory. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal= International Scientific Research Journal.* 2016;4-6(46): 21-24. doi: https://10.18454/IRJ.2016.46.239]

Васильченко А. А. Пространственный анализ инфраструктуры орошаемых полей Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области. *Научно-агрономический журнал*. 2022;4(119): 12-18. doi: https://doi.org/10.34736/FNC.2022.119.4.002.12-18 [Vasilchenko A. A. Spatial analysis of the infrastructure of irrigated areas of the Volga-Akhtuba floodplain in the Volgograd region. *Nauchno-agronomicheskiy zhurnal = Scientific and agronomic Journal.* 2022;4(119): 12-18. doi: https://doi.org/10.34736/FNC.2022.119.4.002.12-18]

Дорошенко В. В. Зависимость вегетации озимых культур от рельефа и почв на востоке Ставропольского края. *Исследование Земли из космоса*. 2023;5: 71-84. doi: https://doi.org/10.31857/S0205961423050044. [Doroshenko V. V. The dependence of the vegetation of winter crops on the relief and soils in the east of the Stavropol Territory. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*. 2023;5: 71-84. doi: https://doi.org/10.31857/S0205961423050044]

Евграфова В. И. Химический состав соленых озер Кулундинской равнины. В. Сб. материалов XVIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». Томск, 7-11 апр. 2014 г. Томск: Изд-во ТПУ, 2014;513-514.

Забровская З. А. Кулундинский район в 1950-1980-е годы. *Кулундинский район: страницы истории и современность. Азбука*. 2007;1: 117-153. [Zabrovskaya Z. A. Kulundinsky District in the 1950s-1980s. *Kulundinskiy rayon: stranitsy istorii i sovremennost'. Azbuka = Kulundinsky District: Pages of History and Modern Times. Azbuka.* 2007;1: 117-153]

Земцов А. Л. Сельское хозяйство Центрального Черноземья в годы реформ и реконструкции (1985-2015). *Наука, техника и образование*. 2016;6(24): 70-72. doi: https://doi.org/10.20861/2312-8267-2016-24-005. [Zemtsov A. L. Agriculture of the Central Chernozem Region during the Years of Reforms and Reconstruction (1985-2015). *Nauka, tekhnika i obrazovaniye = Science, Technology, and Education*. 2016;6(24): 70-72. doi: https://doi.org/10.20861/2312-8267-2016-24-005]

Клычков А. А., Слажнева С. С. Проблемы деградации почв Кулундинской степи, на примере приграничных районов. *Студенческий форум*. 2020;20-1(113): 33-38. [Klychkov A. A., Slazhneva S. S. Problems of soil degradation in the Kulunda steppe, using the example of border areas. *Studencheskiy forum = Student forum*. 2020;20-1(113): 33-38]

Симонова Ю. В., Жунусова О. Р., Чарыкова М. В., Касаткина Г. А. Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле.* 2024;1(69): 185-212. doi:

https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.110. [Simonova Yu. V., Zhunusova O. R., Charykova M. V., Kasatkina G. A. Soil-Geochemical Assessment of Salinity in the Territory Adjacent to the Kuchuk Salt Deposit (Altai Territory). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2024.1(69): 185-212. doi: https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.110]

Леонова Г. А., Богуш А. А., Бобров В. А., Бычинский Б. А., Трофимова Л. В., Маликов Ю. И. Эколого-геохимическая оценка соляных озер Алтайского края. *География и природные ресурсы*. 2007;1: 51-59 [Leonova G. A., Bogush A. A., Bobrov V. A., Bychinsky B. A., Trofimova L. V., Malikov Yu. I. Ecological and geochemical assessment of salt lakes of the Altai Territory. *Geografiâ i prirodnye resursy = Geography and natural resources.* 2007;1: 51-59].

Харламова Н. Ф., Казарцева. О. С. Оценка пространственной изменчивости максимальных снегозапасов на территории Алтайского края с применением ландшафтно-индикационных методов. *География и природопользование Сибири*. 2017;23: 206-220 [Kharlamova N. F., Kazartseva O. S. Assessment of spatial variability of maximum snow reserves in the Altai Territory using landscape-indication methods. *Geografiya i prirodopol'zovaniye Sibiri = Geography and environmental management of Siberia.* 2017;23: 206-220]

Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote sensing and image interpretation. *Seventh edition*. 2015.736.

Информация об авторах

Хованская Анастасия Александровна, лаборант-исследователь лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов, ФНЦ агроэкологии РАН, 400062, г. Волгоград, проспект Университетский, 97, hovanskaya-a@vfanc.ru, ORCID: 0009-0006-8957-241X.

Болгов Иван Александрович, младший научный сотрудник лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов, ФНЦ агроэкологии РАН, 400062, г. Волгоград, проспект Университетский, 97, bolgov-ia@vfanc.ru, ORCID: 0009-0003-3174-6382.

Information about the authors

Khovanskaya Anastasiya Aleksandrovna, Laboratory Researcher, Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes, Federal State Budget Scientific Institution " Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, Universitetsky Avenue, 97, e-mail: hovanskaya-a@vfanc.ru, ORCID: 0009-0006-8957-241X.

Bolgov Ivan Aleksandrovich, Junior Researcher, Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes, Federal State Budget Scientific Institution " Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences", 400062, Volgograd, Universitetsky Avenue, 97, e-mail: bolgov-ia@vfanc.ru, ORCID: 0009-0003-3174-6382.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования, ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. Authors of this research paper have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. Author of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Ведущий мелиоратор сельскохозяйственных земель России Кружилин Иван Пантелеевич отметил 95-летний юбилей

В 2025 г. ведущий мелиоратор сельскохозяйственных земель России, Академик Российской академии сельскохозяйственных наук, академик Нью-Йоркской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации Кружилин Иван Пантелеевич отметил свой 95-летний юбилей!

Иван Пантелеевич Кружилин родился 9 октября 1930 г. в хуторе Максаевский Шолоховского р-на Ростовской обл. После окончания Новочеркасского инженерно-мелиоративного института с отличием в 1954 г. он начал свою трудовую деятельность ассистентом кафедры сельхозмелиораций в НИМИ. После завершения учебы в очной аспирантуре И. П. Кружилин с 1960 по 1964 гг. работает директором Персиановской ОМС. В 1962 г. он успешно защищает диссертацию на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук.

Начиная с 1964 г., после избрания по конкурсу Ивана Пантелеевича доцентом кафедры сельскохозяйственных мелиораций Волгоградского сельскохозяйственного института, его судьба неразрывно связана с Волгоградской обл. В 1971 г. он работает проректором, а с 1977 по 1982 гг. руководит кафедрой сельскохозяйственной мелиорации и геодезии Волгоградского СХИ. Огромная роль принадлежит Ивану Пантелеевичу в организации и становлении гидромелиоративного факультета (1966). Им изданы методические указания по составлению курсовых и дипломных проектов по орошению, оросительным системам и их эксплуатации, подготовлены программы производственных практик по инженерно-мелиоративным изысканиям, эксплуатации гидромелиоративных систем и др. Первое учебное пособие «Оросительные системы и их эксплуатация» (М.: Колос, 1971), подготовленное им в соавторстве с М. Н. Багровым, в последующем выдержало 4-кратное издание с грифом учебника для сельскохозяйственных вузов страны и издано за рубежом. «Механизация и автоматизация полива» (1973); «Прогрессивная технология орошения сельскохозяйственных культур» (1980) и сегодня являются одними из основных учебников и учебных пособий для сельскохозяйственных вузов страны.

В 70-80-е годы интенсивного развития оросительных мелиораций в стране площадь орошаемых земель во многих экономических регионах, в т. ч. и в Поволжье, увеличилась в 10 раз. В этот период под руководством Ивана Пантелеевича были проведены научные исследования по агромелиоративной оценке, влагообеспеченности, природно-мелиоративному районированию перспективного орошения Поволжья, режимам орошения зерновых колосовых культур, многолетних трав, сои, риса, созданию долголетних культурных пастбищ при дождевании, элементам техники и рациональным схемам полива при дождевании, мелиорации засоленных земель. Особое внимание при этом было уделено программированному возделыванию сельскохозяйственных культур на орошаемых землях и теоретическим вопросам по созданию информационно-вычислительных систем управления водным режимом почвы с использованием микропроцессорной техники персональных и управляемых ЭВМ. Активное участие Иван Пантелеевич принял в обосновании строительства и реконструкции таких крупных гидромелиоративных систем Волгоградской обл. как Заволжская, Городищенская, Калачевская, Тажинская и многие другие.

Теоретические и экспериментальные разработки, а также их практическая реализация позволили Ивану Пантелеевичу подготовить и успешно защитить в 1982 г. диссертацию на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук.

С 1982 по 2002 гг. Иван Пантелеевич возглавил Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия и в настоящее время он является главным научным сотрудником института. Под его руководством и при непосредственном участии разрабатываются теория, методы и технологии комплексной мелиорации орошаемых земель, которые позволяют реализовать экологически безопасные, ресурсосберегающие технологии программированного возделывания сельскохозяйственных культур, обеспечивающие устойчивое и высокопродуктивное ведение сельскохозяйственного производства на орошаемых землях в засушливых зонах России. При этом теоретически и экспериментально обосновываются допустимые пределы насыщения агроландшафтов орошаемыми землями и режимы комплексной мелиорации их с осуществлением текущего контроля и оперативного управления почвенно-мелиоративным состоянием. Особое внимание уделяется обоснованию структуре посевных площадей и типам севооборотов в орошаемых агроландшафтах, обеспечивающих утилизацию до 3,5 % ФАР с набором высокорентабельных культур для хозяйств различных форм собственности и специализации, а также способам сохранения и расширенного воспроизводства плодородия почв, приемам восстановления деградированных земель, минимализации и утилизации дренажно-сбросных вод. Разрабатываются комплексные модели и алгоритмы, а также программы управления на ЭВМ водным и пищевым режимами почвы, интегрированной защитой посевов, способствующие экономии ресурсов и снижению пестицидной нагрузки в создаваемых высокоадаптивных технологиях программированного выращивания сельскохозяйственных культур с высоким качеством получаемой продукции.

Отличительной чертой научной деятельности Ивана Пантелеевича является не только теоретическая обоснованность, но и практическая направленность его работ. Так, он является автором многих рекомендаций по технологиям программированного возделывания сельскохозяйственных культур, методики оценки продуктивности орошаемых земель, научно обоснованной системы орошаемого земледелия Волгоградской обл. с программированным выращиванием урожаев сельскохозяйственных культур, научно обоснованных систем ведения агропромышленного производства. Внедрение этих разработок в сельскохозяйственное производство способствовало повышению продуктивности орошаемого гектара в Волгоградской обл. от 3,3 до 6,1, а в целом по стране от 3,2 до 3,8 тысяч кормовых единиц. Внедрение же научно обоснованных систем орошаемого земледелия в отдельных хозяйствах Николаевского, Михайловского, Среднеахтубинского и других районов Волгоградской обл. способствовало повышению продуктивности орошаемой пашни до 10-12 тысяч кормовых единиц.

Кружилин Иван Пантелеевич является автором более 700 опубликованных работ, в т. ч. 54 патентов на изобретения и селекционные достижения, 45 монографий, учебников и учебных пособий, брошюр и нормативных документов для проектных, строительных и эксплуатационных мелиоративных сельскохозяйственных организаций. Им создана научная школа, представленная учениками-мелиораторами различных регионов России и ближнего зарубежья, подготовлено 15 докторов и 33 кандидата наук. Об авторитете ученого свидетельствует его активное участие в конгрессах, симпозиумах в СССР, США, Словакии, Югославии, Германии,

Израиле, Кубе, Монголии, ЮАР, где он достойно представлял отечественную мелиоративную и сельскохозяйственную науку. Иван Пантелеевич является членом редколлегии журналов «Мелиорация и водное хозяйство», «Научный агрономический журнал», «Орошаемое земледелие».

За успешную научно-педагогическую работу в 1985 г. ему было присвоено ученое звание профессора по специальности мелиорация и орошаемое земледелие. В 1988 г. он был избран членом-корреспондентом Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина (ВАСХНИЛ), в 1990 г. действительным членом (академиком) Российской академии сельскохозяйственных наук (РАСХН).

Талант исследователя, трудолюбие и целеустремленность позволили Ивану Пантелеевичу войти в число ведущих ученых-мелиораторов не только в России, но и за рубежом. В 1994 г. он был избран действительным членом (академиком) Нью-Йоркской академии наук.

Заслуги Кружилина Ивана Пантелеевича отмечены многими государственными наградами, в числе которых Юбилейная медаль «За доблестный труд в ознаменовании 100-летия со дня рождения В. И. Ленина» (1970), медаль «За трудовую доблесть» (1971), орден «Знак Почета» (1976) и орден Почета (2001), в 1996 г. ему присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации. За время своей трудовой деятельности Иван Пантелеевич награжден почетной грамотой Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (2000, 2020), золотой медалью им. А. Н. Костякова, почетной грамотой Администрации Волгоградской обл. (2002), почетной грамотой главы Администрации Волгоградской обл., благодарственным письмом Волгоградской областной Думы, почетной грамотой Российской сельскохозяйственной академии (2007), почетной грамотой Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, почетной грамотой главы Администрации Волгоградской обл., почетной грамотой Администрации г. Волгограда, почетной грамотой Администрации Советского р-на г. Волгограда (2010), благодарственным письмом Российской академии сельскохозяйственных наук (2017), почетной грамотой главы Администрации Волгоградской обл., почетной грамотой Администрации г. Волгограда, благодарственным письмом Волгоградской областной Думы и почетной грамотой Российской академии наук (2020), медалью «За вклад в реализацию Государственной политики в области образования и научно-технологического развития» (2021), Юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук» (2024), золотой медалью «За вклад в развитие агропромышленного комплекса России» (2025).

Он награжден Международным Дипломом общественного признания и Медалью чести Американского биографического института за значительный вклад в профессиональную область и улучшение общественных отношений, а в 1997, 1998 и в 2001 гг. Американским биографическим институтом был признан Человеком года. В 2002 г. Международный биографический центр в Кембридже (Англия) включил Кружилина Ивана Пантелеевича в число 1000 крупнейших ученых мира. В том же 2002 г. Международной организацией «Кто есть кто в мире» США профессиональное эссе о Кружилине Иване Пантелеевиче включено в издание «500 выдающихся людей XXI столетия».

В ходе своей научной деятельности Иван Пантелеевич посвятил время совместной продуктивной работе с Всесоюзным научно-исследовательским институтом агролесомелиорации – ВНИАЛМИ и его приемником Федеральным научным центром агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук – ФНЦ агроэкологии РАН. Сотрудники ФНЦ агроэкологии РАН и Иван Пантелеевич совместно с ведущими учеными России разработали в 2001 г. «Методическое пособие и нормативные материалы для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия». В 2007 г. Иван Пантелеевич принял участие разработке новых подходов к изучению, многофакторной оценке и тематическому картографированию процессов опустынивания, фитоэкологии и лесопригодности земель совместно с Куликом К. Н. и другими видными учеными ВНИАЛМИ, а в 2008 г. провели оценку земельного фонда и сельскохозяйственных угодий Российской Федерации.

Коллектив ФНЦ агроэкологии РАН выражает глубокое уважение Кружилину Ивану Пантелеевичу за его вклад в развитие мелиорации на территории Волгоградкой обл. и России в целом и поздравляет его со светлым 95-летним юбилеем!

К. Н. Кулик, главный научный сотрудник, академик РАН,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор