**Оригинальная статья**

УДК 577.113.083:582.736
https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.124-138

# Содержание фотосинтетических пигментов, фенольных антиоксидантов и тестирование ISSR-праймеров для *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin

**П.А. Кузьмин ✉, И.М. Романова**

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград, Россия*

✉*kuzmin-p@vfanc.ru*

**Аннотация**

*Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin – это кустарник или небольшое дерево, которое используется в агролесомелиорации и борьбе с опустыниванием засушливых территорий Юга России. На сегодняшний день слабо изученными остаются вопросы формирования адаптивных реакций на физиолого-биохимическом уровне, который представлен фотосинтетическим аппаратом и содержанием метаболитов в зеленых побегах, их связи с антиоксидантными свойствами. Также представляет интерес анализ генетической структуры различных популяций с помощью ДНК-маркеров. Работа посвящена оценке содержания хлорофиллов, каротиноидов и фенольных антиоксидантов в зеленых побегах и поиску наиболее информативных ISSR-праймеров для последующего их использования в анализе генетической структуры популяций *H. aphyllum*. Исследование проведено в 2024 г. с образцами *H. aphyllum*, собранными на территории Харабалинского района Астраханской области. Установлено, что ISSR-праймеры UBC809, UBC810, UBC811, UBC818, UBC826, UBC834, UBC840, UBC846, UBC855, UBC860, UBC887, UBC890 можно рекомендовать для ISSR-анализа генетического разнообразия популяций *H. aphyllum*. В работе представлен фактический материал по содержанию фотосинтетических пигментов, а также метаболитов с антиоксидантными свойствами в зеленых побегах исследуемого вида.

**Ключевые слова:** *Haloxylon aphyllum*, ISSR-праймеры, тестирование праймеров, молекулярно-генетический анализ, хлорофилл, каротиноиды, флавоноиды, фенолы.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственного задания «Генотипирование древесных и кустарниковых пород устойчивых к ограничивающим рост и развитие факторам внешней среды» (№ FNFE-2025-0007).

**Для цитирования:** *Кузьмин П.А., Романова И.М.* Содержание фотосинтетических пигментов, фенольных антиоксидантов и тестирование ISSR-праймеров для *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2026. Т. 168, кн. 1. С. 124–138. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.124-138.

**Original article**

https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.124-138

# Content of photosynthetic pigments and phenolic antioxidants and ISSR primer testing in *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin

**P.A. Kuzmin✉, I.M. Romanova**

*Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia*

✉*kuzmin-p@vfanc.ru*

**Abstract**

*Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin is a shrub or small tree commonly used in agroforestry and desertification control in arid territories of southern Russia. To date, adaptive reactions at the physiological and biochemical level, particularly those associated with the photosynthetic apparatus and the content of metabolites in green shoots, and their relation to antioxidant properties remain poorly studied. Analysis of the genetic structure of various populations using DNA markers is also of considerable interest. In this study, the content of chlorophylls, carotenoids, and phenolic antioxidants in the green shoots of *H. aphyllum* was assessed, and the most informative ISSR primers were identified to examine the genetic structure of *H. aphyllum* populations. The experiments were conducted in 2024 with *H. aphyllum* samples collected in the Kharabalinsky district of the Astrakhan region. The ISSR primers UBC809, UBC810, UBC811, UBC818, UBC826, UBC834, UBC840, UBC846, UBC855, UBC860, UBC887, and UBC890 were found to be suitable for ISSR analysis of the genetic diversity of *H. aphyllum* populations. The original data on the content of photosynthetic pigments and metabolites with antioxidant properties in the green shoots of *H. aphyllum* were presented.

**Keywords:** *Haloxylon aphyllum*, ISSR primers, primer testing, molecular genetic analysis, chlorophyll, carotenoids, flavonoids, phenols

**Acknowledgments.** This study was carried out as part of the state assignment "Genotyping of tree and shrub species resistant to environmental factors limiting growth and development" (FNFE-2025-0007).

**For citation:** Kuzmin P.A., Romanova I.M. Content of photosynthetic pigments and phenolic antioxidants and ISSR primer testing in *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2026, vol. 168, no. 1, pp. 124–138. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.124-138. (In Russian)

## Введение

Саксаул черный (*Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin) (синоним *Haloxylon ammodendron*) – псаммофитное растение, принадлежащее роду *Haloxylon* семейства *Amaranthaceae* [1]. Этот вид представляет собой кустарник или небольшое дерево с хорошо развитыми главными и боковыми корнями и дегенерированными листьями, который наиболее распространен в пустынных и полупустынных регионах [1, 2]. Благодаря особенностям корневой систе-

мы, способной эффективно поглощать воду, *H. aphyllum* является одним из основных видов пустынной растительности [3, 4] и надежным средством повышения урожайности естественных пастбищ в пустынной зоне [5, 6]. Он также интересен с позиций формирования устойчивости к засухе [7]. В связи с этим представляет интерес оценка метаболитного состава и генетического разнообразия различных популяций *H. aphyllum* [8]. В международных базах данных отсутствует отсеквенированный геном растения, что затрудняет изучение механизмов его адаптации на молекулярно-генетическом уровне и проведение оценки генетической структуры различных его биотипов.

На первоначальном этапе такие исследования можно провести с помощью неспецифических ISSR-маркеров, но для этого необходимо осуществить среди них поиск информативных представителей [9, 10]. Затем по совокупности выявленных ISSR-маркеров можно провести оценку генетической структуры популяции данного вида с целью выявления селекционно-ценных генотипов для дальнейшего использования в селекционном процессе [11–13].

Функционирование фотосинтетической системы является индикатором состояния растения и отражает его адаптацию к факторам среды произрастания. Для ее оценки можно использовать показатели содержания фотосинтетических пигментов и метаболитов с антиоксидантными свойствами [14]. Содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях растений позволяет получить представление об их физиологическом состоянии [15, 16]. Так, например, содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений позволяет судить об устойчивости к недостатку увлажнения [17]. Основным пигментом фотосинтеза является хлорофилл *a*, содержание которого выступает в качестве индикатора состояния растения, в частности, дает возможность определить ответную реакцию растения на воздействие условий внешней среды [18, 19]. Каротиноиды – изопреноиды, ответственные за красный, оранжевый и желтый цвет [20], вырабатываются в пластидах фотосинтезирующих организмов. Детоксифицируя свободные радикалы и рассеивая энергию светового излучения, каротиноиды защищают клетки от фотоокислительного повреждения [21]. В ответ на воздействие множества факторов окружающей среды, которые способны вызывать окислительный стресс, происходит синтез фенольных метаболитов, например, флавоноидов, роль которых заключается в нейтрализации свободных радикалов и предотвращении их разрушительного воздействия на клетки [22, 23]. Следовательно, каротиноиды и фенольные антиоксиданты, защищая мембраны от активных форм кислорода и перекисного окисления липидов, способны увеличивать устойчивость растений к световым и тепловым стрессам [24].

Цель исследования заключается в оценке содержания хлорофиллов, каротиноидов, фенольных антиоксидантов в листьях и поиске наиболее информативных ISSR-праймеров для *H. aphyllum*.

## 1. Материалы и методы

**1.1. Выделение и определение ДНК.** Сбор растительного материала (недоразвитые листья в виде бугорков и чешуек *H. aphyllum*) для исследования проводили в вегетационный период 2024 г. на участке «Придорожный» (47.24741 с.ш., 47.443745 в.д.). Выделение ДНК осуществляли из навески растительного материала массой 70 мг, гомогенизированной с помощью гомогенизатора Precellys 24 (Bertin Technologies, Франция). В работе использовали два метода выделения ДНК: с помощью набора для выделения ДНК из растений «D-Plants» (Biolabmix, Россия) согласно протоколу производителя (метод 1) или модифицированного

метода с применением бромида цетилтриметиламмония с 0.2 % β-меркаптоэтанолом [25] (метод 2). Осаждение ДНК проводили буферным раствором, содержащим 2 % бромида цетилтриметиламмония, 0.1 М Триса, 1.4 М NaCl, 20 мМ двунатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты и 0.2 % β-меркаптоэтанола. В каждую пробирку помещали навеску растительного материала, добавляли 600 мкл буферного раствора, гомогенизировали при комнатной температуре, а затем инкубировали 10 мин при 65 °С в твердотельном термостате, периодически помешивая содержимое. После центрифугирования при 13000 об/мин в течение 15 мин при 20 °С отбирали надосадочную жидкость, добавляли равный объем хлороформа и интенсивно перемешивали в течение 5 мин. Снова центрифугировали в указанных выше условиях, а затем отбирали надосадочную жидкость, добавляли равный объем ледяного изопропанола, помещали в морозильную камеру на 10 мин и центрифугировали при 13000 об/мин в течение 10 мин при 20 °С. Супернатант сливали без потерь осадка ДНК. Оставшийся осадок промывали 1000 мкл 70%-ного этанола, охлажденного до −10 °С, перемешивали в течение 5 мин и центрифугировали при 13000 об/мин в течение 10 мин при 20 °С, сливали этанол. Осадок повторно промывали и центрифугировали при 13000 об/мин в течение 5 мин при 20 °С, затем этанол отбрасывали, а осадок просушивали на термостате при 45 °С до полного испарения этанола (≈15 мин). Растворяли выделенную ДНК в 60 мкл деионизированной воды, нагревая в термостате 10 мин при 45 °С.

Качество и концентрацию ДНК оценивали с помощью спектрофотометра SpectrostarNano (BMG Labtech, Германия) и флуориметра Qubit 4.0. (Thermo Fisher Scientific, США). Установлено, что использование набора «D-Plants» обеспечивает более высокую концентрацию ДНК (табл. 1). Отношения интенсивностей светопоглощения при длинах волн 260 и 280 нм (260/280) и 260 и 230 нм (260/230) показывают чистоту препарата ДНК. Препарат считается чистым, если отношение 260/280 составляет 1.6–1.8, а 260/230 – 2.0–2.2. Для дальнейших экспериментов выделенную ДНК хранили при температуре –20 °С.

**Табл. 1.** Концентрация и спектральные характеристики выделенных образцов ДНК
**Table 1.** Concentration and spectral characteristics of the extracted DNA samples

| Характеристика | Спектрофотометрия | | Флуориметрия | |
|---|---|---|---|---|
| | Метод 1 | Метод 2 | Метод 1 | Метод 2 |
| Концентрация, нг/мкл | 62 ± 30 | 29 ± 4 | 15 ± 2 | 12 ± 3 |
| Соотношение 260/280 | 1.68 ± 0.02 | 1.92 ± 0.03 | — | — |
| Соотношение 260/230 | 2.1 ± 0.1 | 1.9 ± 0.3 | — | — |

**1.2. ПЦР-анализ.** Для проведения ПЦР использовали праймеры (АО «ГенТерра», Россия) (табл. 2), разведенные в соответствии с инструкцией производителя. В пробирку вносили 5 мкл готовой смеси реагентов для ПЦР с красителями qPCRmix-HS (Евроген, Россия), 16 мкл свободной от нуклеаз деионизированной воды (Евроген, Россия) и 2 мкл праймера. Образцы выделенной ДНК нагревали в термостате при 45 °С в течение 5 мин, а затем вносили в каждую опытную пробирку по 2 мкл. После предварительной денатурации при 95 °С в течение 10 мин проводили амплификацию с помощью системы Applied Biosystems QuantStudio 5 (Thermo Fisher Scientific, США), используя 40 циклов, включающих денатурацию при 95 °С в течение 30 с, отжиг (30 с при температуре, представленной в табл. 2), элонгацию при 72 °С в течение 60 с и финальную элонгацию при 72 °С в течение 10 мин.

**Табл. 2.** Последовательности нуклеотидов и температуры отжига тестируемых ISSR-праймеров
**Table 2.** Nucleotide sequences and annealing temperatures of the tested ISSR primers

| № | Название праймера | Последовательность нуклеотидов (5→3) | Температура отжига, °C |
|---|---|---|---|
| 1 | ISSR-1 | ACA CAC ACA CAC ACA CT | 49.9 |
| 2 | ISSR-3 | TGT GTG TGT GTG TGT GAA | 51.4 |
| 3 | AW77941 | GAG AGA GAG AGA GAG AAT | 51.4 |
| 4 | UBC807 | AGA GAG AGA GAG AGA GT | 50.0 |
| 5 | UBC808 | AGA GAG AGA GAG AGA GC | 52.4 |
| 6 | UBC809 | AGA GAG AGA GAG AGA GG | 52.4 |
| 7 | UBC810 | GAG AGA GAG AGA GAG AT | 50.0 |
| 8 | UBC811 | GAG AGA GAG AGA GAG AC | 52.4 |
| 9 | UBC812 | GAG AGA GAG AGA GAG AA | 50.0 |
| 10 | UBC814 | CTC TCT CTC TCT CTC TA | 50.0 |
| 11 | UBC815 | CTC TCT CTC TCT CTC TG | 52.4 |
| 12 | UBC816 | CAC ACA CAC ACA CAC AT | 50.0 |
| 13 | UBC818 | CAC ACA CAC ACA CAC AG | 52.4 |
| 14 | UBC822 | TCT CTC TCT CTC TCT CA | 50.0 |
| 15 | UBC823 | TCT CTC TCT CTC TCT CC | 52.4 |
| 16 | UBC826 | ACA CAC ACA CAC ACA CC | 52.4 |
| 17 | UBC827 | ACA CAC ACA CAC ACA CG | 52.4 |
| 18 | UBC834 | AGA GAG AGA GAG AGA GY | 51.4 |
| 19 | UBC836 | AGA GAG AGA GAG AGA GYA | 52.6 |
| 20 | UBC840 | GAG AGA GAG AGA GAG AYT | 52.6 |
| 21 | UBC843 | CTC TCT CTC TCT CTC TRA | 52.6 |
| 22 | UBC846 | CAC ACA CAC ACA CAC ART | 52.6 |
| 23 | UBC852 | TCT CTC TCT CTC TCT CRA | 52.6 |
| 24 | UBC855 | ACA CAC ACA CAC ACA CYT | 52.6 |
| 25 | UBC856 | ACA CAC ACA CAC ACA CYA | 52.6 |
| 26 | UBC860 | TGT GTG TGT GTG TGT GRA | 52.6 |
| 27 | UBC887 | DVD TCT CTC TCT CTC TC | 51.2 |
| 28 | UBC889 | DBD ACA CAC ACA CAC AC | 51.2 |
| 29 | UBC890 | VHV GTG TGT GTG TGT GT | 51.2 |
| 30 | UBC891 | HVH TGT GTG TGT GTG TG | 51.2 |

**1.3. Электрофоретические исследования.** Электрофорез ампликонов проводили в 1.8%-ном агарозном геле в 1× трис–ацетат–ЭДТА буферном растворе. Гель окрашивали с помощью 0.003%-ного бромистого этидия. Вносимая в ячейку смесь состояла из 7.5 мкл

пробы и 1.5 мкл 4× буфера для нанесения ДНК на гель «БиК» (кат. номер D-3002), содержащего бромфеноловый синий и ксиленцианол FF в качестве красителей (Биолабмикс, Россия). Визуализировали результаты с помощью гель-документирующей системы iBright CL1500 (Thermo Fisher Scientific, США).

**1.4. Анализ состояния фотосинтетического аппарата** проводили по содержанию хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, а также фенольных антиоксидантов. Для извлечения пигментов (хлорофиллы *a*, *b* и каротиноиды) взвешивали 0.3 г биообразца и выделяли согласно стандартной методике [26]. Спектрофотометрическое определение пигментов проводили при 662, 644 и 440.5 нм для хлорофиллов *a, b* и каротиноидов соответственно на приборе SpectrostarNano (BMG Labtech, Германия). Расчет концентрации пигментов (мг/дм$^3$) проводили по формулам, представленным в работе [26]. Содержание пигментов выражали в пересчете на 1 г сухого образца.

Определение флавоноидов и общего содержания фенольных соединений проводили спектрофотометрически [27, 28]. Для извлечения фенольных антиоксидантов использовали биообразец массой 0.06 г. Общее содержание фенольных соединений определяли с реактивом Фолина-Чокальтеу, а содержание флавоноидов — с использованием 5%-ного раствора $AlCl_3$ в 80%-ном этаноле. Измерение оптической плотности полученных растворов проводили при 750 и 415 нм для общего содержания фенольных соединений и флавоноидов соответственно. Результаты выражали в эквивалентах галловой кислоты (мг/г сухого веса) в случае общего содержания фенольных соединений и в эквивалентах кверцетина (мг/г сухого веса) для флавоноидов.

**1.5. Математическая обработка результатов.** Математическую обработку результатов измерений проводили с применением статистического пакета «Statistica 12.0» (StatSoft Inc., США). Оценку содержания фотосинтетических пигментов и фенольных антиоксидантов проводили в трехкратной повторности, результаты представляли в виде среднего значения (Mean), стандартной ошибки (SE) и стандартного отклонения (SD).

Взаимосвязи между показателями устанавливали с помощью линейного коэффициента корреляции Пирсона (*r*). Для оценки силы корреляционной связи использовали шкалу Чеддока (значение *r* до 0.3 – слабая корреляция, от 0.31 до 0.5 – умеренная, от 0.51 до 0.7 – заметная, от 0.71 до 0.9 – высокая и выше 0.9 – весьма высокая) [29].

## 2. Результаты и их обсуждение

**2.1. Отбор наиболее информативных праймеров для *H. aphyllum*.** В ходе исследования проанализированы тридцать ISSR-праймеров. После проведения ПЦР для разделения продуктов использован горизонтальный электрофорез. Соответствующие электрофореграммы представлены на рис.1.

На основе числа, четкости разделения границ амплифицированных фрагментов и их вариабельности отобраны двенадцать ISSR-праймеров, являющихся перспективными для молекулярно-генетического анализа популяций *H. aphyllum* (табл. 3). Остальные восемнадцать праймеров не демонстрируют четкие и воспроизводимые результаты или вариабельность амплифицированных полос и поэтому исключены из дальнейших исследований. В зависимости от праймера размер идентифицированных фрагментов составляет от 280 до 1450 п. н., а число амплифицированных фрагментов – от 4 до 9. Максимальное число определенных фрагментов достигается при использовании праймера UBC855. С учетом высокого числа определяемых фрагментов, рекомендованы праймеры UBC811, UBC834, UBC846, UBC855 и UBC890, характеризующиеся полиморфностью от 57 до 100 %.

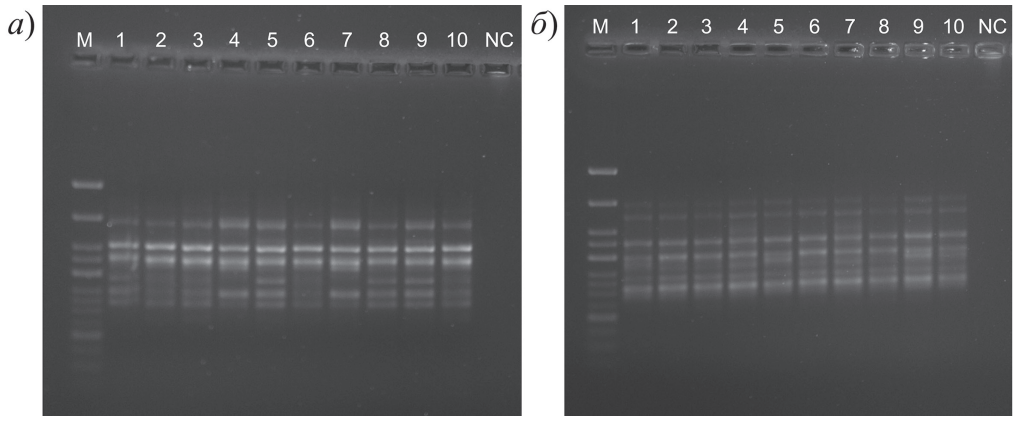



**Рис. 1.** Электрофореграммы продуктов ПЦР – UBC855 (*а*) и UBC890 (*б*). Лунка М – ДНК маркер Step50 plus (Биолабмикс, Россия), лунки 1–10 – пробы ДНК, лунка NC – отрицательный контроль

**Fig. 1.** Electropherograms of the PCR products – UBC855 (*a*) and UBC890 (*b*). Well M – DNA marker Step50 plus (Biolabmix, Russia), wells 1–10 – DNA samples, well NC – negative control

**Табл. 3.** Отобранные ISSR-праймеры

**Table 3.** Selected ISSR primers

| № | ISSR-праймеры | Нуклеотидная последовательность (5→3) | Длина фрагментов, п. н. | Число локусов в спектре | Число полиморфных локусов | Степень полиморфности, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | UBC810 | (GA)8T | 450–1450 | 5 | 3 | 60 |
| 2 | UBC834 | (AG)8Y | 280–750 | 7 | 4 | 57 |
| 3 | UBC887 | DVD(TC)7 | 480–800 | 5 | 2 | 40 |
| 4 | UBC890 | VHV(GT)7 | 370–1000 | 8 | 4 | 50 |
| 5 | UBC809 | (AG)8G | 350–950 | 5 | 1 | 20 |
| 6 | UBC811 | (GA)8C | 450–1300 | 7 | 6 | 86 |
| 7 | UBC818 | (CA)8G | 600–1000 | 4 | 3 | 75 |
| 8 | UBC826 | (AC)8C | 320–950 | 6 | 2 | 33 |
| 9 | UBC840 | (GA)8AYT | 350–720 | 5 | 2 | 40 |
| 10 | UBC846 | (CA)8RT | 400–1400 | 7 | 7 | 100 |
| 11 | UBC855 | (AC)8YT | 350–970 | 9 | 7 | 78 |
| 12 | UBC860 | (TG)8RA | 370–900 | 6 | 4 | 67 |

**2.2. Оценка фотосинтетического аппарата *H. aphyllum*.** Фотосинтетические пигменты в зеленых побегах растений представлены хлорофиллами *a* и *b*, а также каротиноидами. Основным пигментом фотосинтеза выступает хлорофилл *a*, вспомогательным пигментом является хлорофилл *b*, а каротиноиды осуществляют защиту хлорофиллов от фотоокисления. В ходе исследования установлено содержание фотосинтетических пигментов в зеленых побегах *H. aphyllum* для каждой особи в исследуемой группе (рис. 2, *а–г*). В пределах группы содержание хлорофилла *a* варьируется в диапазоне 0.42–0.53 мг/г сухого образца при среднем значении 0.47 ± 0.04 мг/г. Содержание хлорофилла *b* изменяется в диапазоне от 0.03 до 0.05 мг/г, а среднее значение равно 0.04 ± 0.01 мг/г. Содержание каротиноидов

составляет от 0.17 до 0.24 мг/г со средним значением 0.20 ± 0.03 мг/г. При этом максимальное содержание хлорофилла *a* наблюдается у 3, 6, 7 и 8 особей.

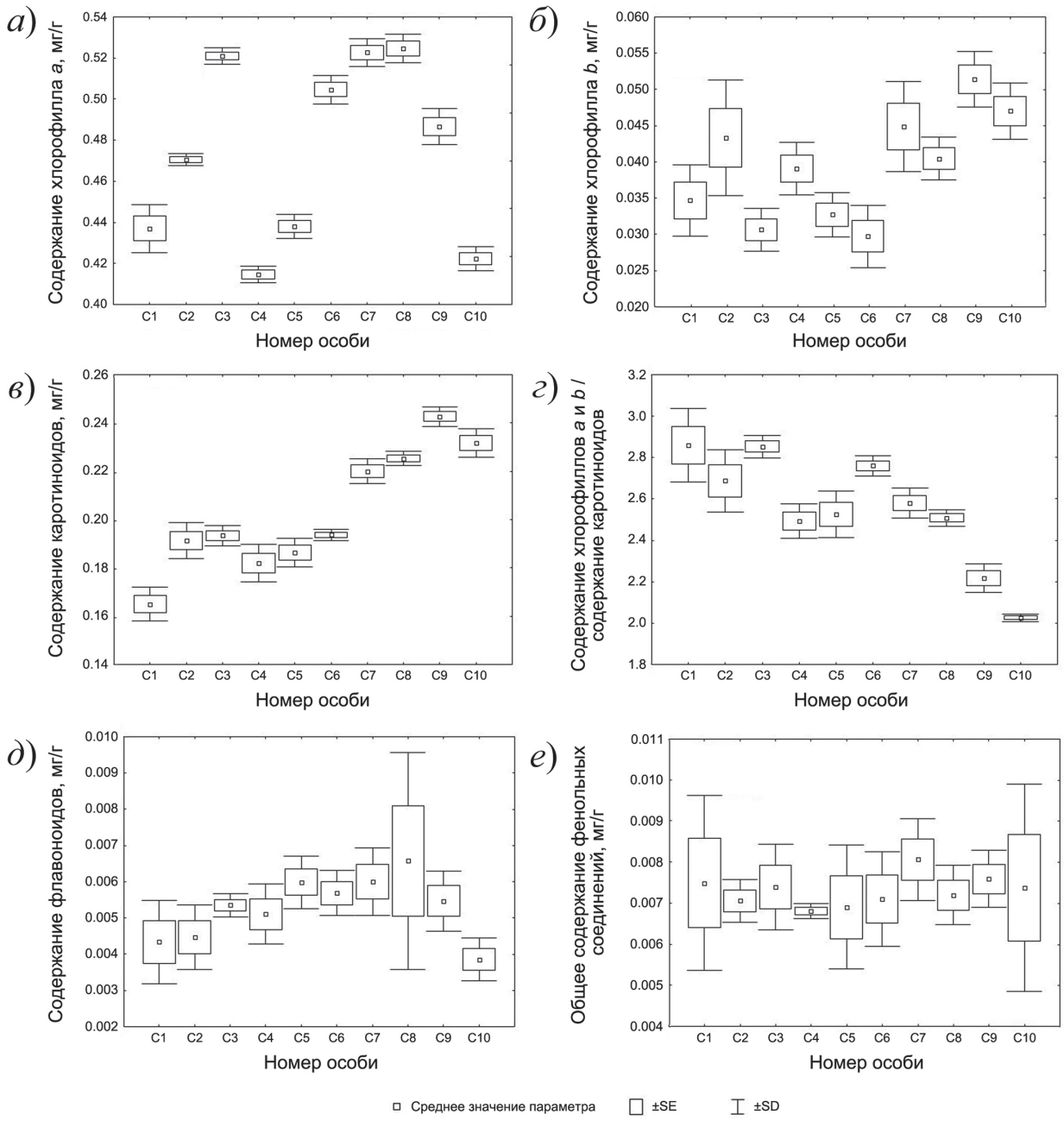



**Рис. 2.** Содержание фотосинтетических пигментов и фенольных антиоксидантов в зеленых побегах *H. aphyllum* в пересчете на 1 г сухого образца: хлорофилл *a*, мг/г (*а*); хлорофилл *b*, мг/г (*б*); каротиноиды, мг/г (*в*); (хлорофилл *a* + хлорофилл *b*)/каротиноиды (*г*); *ф*лавоноиды, мг кверцетина/г (*д*); общее содержание фенольных соединений, мг галловой кислоты/г (*е*)

**Fig. 2.** Content of photosynthetic pigments and phenolic antioxidants in the green shoots of *H. aphyllum* calculated per 1 g of dry weight: chlorophyll *a*, mg/g (*a*); chlorophyll *b*, mg/g (*b*); carotenoids, mg/g (*c*); (chlorophyll *a* + chlorophyll *b*)/carotenoids ratio (*d*); flavonoids, mg quercetin/g (*e*); total phenolics, mg gallic acid/g (*f*)

Важным индикационным параметром физиологического состояния растений является отношение суммарного содержания хлорофиллов *a* и *b* к содержанию каротиноидов. Более высокое значение этого параметра указывает на благоприятное физиологическое состоя-

ние вида и отдельной особи. Для *H. aphyllum* он варьируется в пределах 2.04–2.86, а среднее значение составляет 2.55 (рис. 2, *г*). Эти величины являются высокими и указывают на видоспецифичность исследуемого *H. aphyllum* и его высокий адаптационный потенциал к экологическим условиям произрастания.

Содержание флавоноидов в группе (рис. 2, *д*) находится в пределах от 0.004 до 0.007 мг/г сухого образца при среднем значении 0.005 мг/г. Наибольшие значения зарегистрированы для 5, 6, 7 и 8 особей. Общее содержание фенольных соединений, составляет 0.007–0.008 мг/г сухого образца со средним значением 0.007 мг/г.

Корреляционный анализ демонстрирует наличие взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами. Значения коэффициента корреляции Пирсона ($r$) свидетельствуют об умеренных корреляциях между содержаниями хлорофилла *a* и фенольных соединений ($r = 0.465$), хлорофилла *a* и каротиноидов ($r = 0.359$), каротиноидов и фенольных соединений ($r = 0.453$), а также хлорофилла *b* и фенольных соединений ($r = 0.418$). Установлены заметная корреляция между содержаниями хлорофилла *a* и флавоноидов ($r = 0.644$) и высокая корреляция между содержаниями хлорофилла *b* и каротиноидов ($r = 0.746$).

У *H. aphyllum* выявлена специфическая ответная реакция в содержании фотосинтетических пигментов и метаболитов с антиоксидантными свойствами в условиях засухи, которая заключалась в заметной и умеренной положительных корреляциях содержания фотосинтетических пигментов с содержанием флавоноидов, а также с общим содержанием фенольных соединений. Однако по литературным данным у растений в засушливых условиях наблюдается пониженное содержание хлорофиллов и более высокий уровень флавоноидов и антоцианов [30]. В исследовании по изучению накопления флавоноидов в листьях чайного дерева установлено более высокое содержание флавоноидов у растений, произраставших на открытых хорошо освещенных местах, по сравнению с растениями, выращенными в тени [31]. У разных подвидов облепихи при воздействии засухи зарегистрированы отличающиеся эффекты в синтезе флавоноидов, в частности, снижение содержания флавоноидов (флавонов, флавонолов, изофлавонов и флаванонов) у *H. rhamnoides* ssp. *Mongolica* и увеличение содержания флавонов и абсцизовой кислоты у *H. rhamnoides* ssp. *sinensis* [32]. В эксперименте по влиянию двухлетней засухи на различные виды деревьев показано, что устойчивые к засухе виды характеризуются более высокими содержаниями флавоноидов и полифенолов, массой листьев на единицу площади и скоростью фотосинтеза [33]. В работе [34] на примере *Picea crassifolia* установлено, что в растениях, произрастающих на возвышенности, синтезируется большее количество флавоноидов и меньшее количество фотосинтетических пигментов по сравнению с растениями, растущими в низине. Таким образом, фенольные антиоксиданты могут играть ключевую роль в выживании деревьев в различных стрессовых условиях.

## Заключение

В результате исследования из тридцати ISSR-праймеров отобрано двенадцать (UBC809, UBC810, UBC818, UBC826, UBC840, UBC860, UBC887, особенно UBC811, UBC834, UBC846, UBC855, UBC890), характеризующихся высоким числом определяемых локусов и являющихся перспективными для углубленного генетического анализа различных популяций *H. aphyllum.* Содержание фотосинтетических пигментов в зеленых побегах соответствует видоспецифичному уровню. В исследуемой группе *H. aphyllum* выделены особи

с наибольшим содержанием хлорофилла *a*. Установлена умеренная и заметная корреляции между содержанием фотосинтетических пигментов и метаболитов с антиоксидантными свойствами (флавоноиды и фенольные соединения).

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

**Conflicts of Interest.** The authors declare no conflicts of interest.

## Литература

1. *Suo Z., Jia Z., Lu Q., Pan B., Jin X., Xu G., Peng X., Sun H., Tao Y.* Distinguishing *Haloxylon persicum* and *H. ammodendron* (*Haloxylon* Bunge, Amaranthaceae) using DNA marker // AASRI Procedia. 2012. V. 1. P. 305–310. https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.06.047.
2. *Yang F., Lv G.* Metabolomic analysis of the response of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to drought // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24, No 10. Art. 9099. https://doi.org/10.3390/ijms24109099.
3. *Chen M., Zuo X.-A.* Effect of pollen limitation and pollinator visitation on pollination success of *Haloxylon ammodendron* (CA Mey.) bunge in fragmented habitats // Front. Plant Sci. 2019. V. 10. Art. 327. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00327.
4. *Shi J., Hao X., Wang Z., Jiang M., Peng M., Bai J., Zhuang L.* Effects of great gerbil disturbance on photosynthetic characteristics and nutrient status of *Haloxylon ammodendron* // Plants. 2024. V. 13, No 11. Art. 1457. https://doi.org/10.3390/plants13111457.
5. *Шагаипов М.М., Булахтина Г.К.* Саксаул черный – надежное средство повышения урожайности естественных пастбищ в пустынной зоне // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2011. №. 2. С. 67–70.
6. *Новицкий З.Б., Хамзаев А.Х., Бакиров Н.Ж., Атаджанова Г.Х.* Создание постоянных лесосеменных участков саксаула (*Haloxylon aphyllum* (Minkw.)) на осушенном дне Аральского моря // Russ. J. Ecosyst. Ecol. 2022. V. 7, No 2. Art. 1. https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-2-1.
7. *Wang P., Man L., Ma L., Qi J., Ren Y., Yao Z., Wang B., Cheng C., Zhang H. In vitro* regeneration of *Haloxylon ammodendron* // Not. Sci. Biol. 2023. V. 15, No 2. Art. 11585. https://doi.org/10.55779/nsb15211585.
8. *Liu Y., Zeng Y., Yang Y., Wang N., Liang Y.* Competition, spatial pattern, and regeneration of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* communities in the Gurbantunggut Desert, Northwest China // J. Arid Land. 2022. V. 14, No 10. P. 1138–1158. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0105-x.
9. *Peng Y., Nafee-Ul A., Liu M., He Q., Liang Z.* Assessment of genetic diversity in *Bupleurum* spp. basing agronomic traits, medicinal components and ISSR markers // Genes. 2023. V. 14, No 4. Art. 951. https://doi.org/10.3390/genes14040951.
10. *Saghir K., Abdelwahd R., Iraqi D., Lebkiri N., Gaboun F., El Goumi Y., Ibrahimi M., Abbas Y., Diria G.* Assessment of genetic diversity among wild rose in Morocco using ISSR and DAMD markers // J. Genet. Eng. Biotechnol. 2022. V. 20, No 1. Art. 150. https://doi.org/10.1186/s43141-022-00425-1.
11. *Sharma A., Dutta P., Doggalli G., Nageshvar* Chapter 5: Genome mapping using ISSR markers // Heisnam P., Ansari Z.G., Khurshid N., Kumaresan P.R., Yadav D., Majumder J. (Eds.) Emerging Trends in Climate Action for Sustainable Development. Srinagar: Res. Floor, 2024. P. 47–56.
12. *Jabari M., Golparvar A., Sorkhilalehloo B., Shams M.* Investigation of genetic diversity of Iranian wild relatives of bread wheat using ISSR and SSR markers // J. Genet. Eng. Biotechnol. 2023. V. 21, No 1. Art. 73. https://doi.org/10.1186/s43141-023-00526-5.
13. *Shayan S., Vahed M.M., Mohammadi S.A., Ghassemi-Golezani K., Sadeghpour F., Youssefi A.* Genetic diversity and grouping of winter barley genotypes for root characteristics and ISSR markers // Plant Prod. 2020. V. 43, No 3. P. 323–336. https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27840.1684.

14. *He X.-h., Si J.-h., Zhou D.-m., Wang C.-l., Zhao C.-y., Jia B., Qin J., Zhu X.-l.* Leaf chlorophyll parameters and photosynthetic characteristic variations with stand age in a typical desert species (*Haloxylon ammodendron*) // Front. Plant Sci. 2022. V. 13. Art. 967849. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.967849.

15. *Krzemińska B., Borkowska I., Malm M., Tchórzewska D., Vangronsveld J., Vassilev A., Dos Santos Szewczyk K., Wójcik M.* Comparative study of the photosynthetic efficiency and leaf structure of four *Cotoneaster* species // Sci. Rep. 2024. V. 14, No 1. Art. 25113. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75434-w.

16. *Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sens. Environ. 2002. V. 81, Nos 2–3. P. 337–354. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X.

17. *González-Espíndola L.Á., Pedroza-Sandoval A., Trejo-Calzada R., Jacobo-Salcedo M.d.R., García de los Santos G., Quezada-Rivera J.J.* Relative water content, chlorophyll index, and photosynthetic pigments on *Lotus corniculatus* L. in response to water deficit // Plants. 2024. V. 13, No 7. Art. 961. https://doi.org/10.3390/plants13070961.

18. *Swoczyna T., Kalaji H.M., Bussotti F., Mojski J., Pollastrini M.* Environmental stress - what can we learn from chlorophyll *a* fluorescence analysis in woody plants? A review // Front. Plant Sci. 2022. V. 13. Art. 1048582. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1048582.

19. *Wang N., Chen H., Tian Y.* Effects of nickel, lead, and copper stress on the growth and biochemical responses of *Aegilops tauschii* seedlings // Sci. Rep. 2024. V. 14, No 1. Art. 24832. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77143-w.

20. *Rosas-Saavedra C., Stange C.* Biosynthesis of carotenoids in plants: Enzymes and color // Stange C. (Ed.) Carotenoids in Nature: Biosynthesis, Regulation and Function. Ser.: Subcellular Biochemistry. V. 79. Cham: Springer, 2016. P. 35–69. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7_2.

21. *Nisar N., Li L., Lu S., Khin N.C., Pogson B.J.* Carotenoid metabolism in plants // Mol. Plant. 2015. V. 8, No 1. P. 68–82. https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007.

22. *Ainsworth E.A., Gillespie K.M.* Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent // Nat. Protoc. 2007. V. 2, No 4. P. 875–877. https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102.

23. *Habyarimana E., Dall'Agata M., De Franceschi P., Baloch F.S.* Genome-wide association mapping of total antioxidant capacity, phenols, tannins, and flavonoids in a panel of *Sorghum bicolor* and *S. bicolor* × *S. halepense* populations using multi-locus models // PLoS One. 2019. V. 14, No 12. Art. e0225979. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225979.

24. *Макаркина М.А., Ветрова О.А., Богомолова Н.И.* Изучение содержания каротиноидов в плодах ягодных культур // Садоводство и виноградарство. 2023. № 5. С. 49–55. https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-49-55.

25. *Shestibratov K.A., Baranov O.Yu., Mescherova E.N., Kiryanov P.S., Panteleev S.V., Mozharovskaya L.V., Krutovsky K.V., Padutov V.E.* Structure and phylogeny of the curly birch chloroplast genome // Front. Genet. 2021. V. 12. Art. 625764. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.625764.

26. *Lichtenthaler H.K., Babani F.* Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll *a*/*b* and chlorophylls to carotenoids (*a*+*b*)/(*x*+*c*) in $C_4$ plants as compared to $C_3$ plants // Photosynthetica. 2022. V. 60, No 1. P. 3–9. https://doi.org/10.32615/ps.2021.041.

27. *Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Загоскина Н.В.* Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реактивом Фолина-Дениса и реактивом Фолина-Чокальтеу: модификация и сравнение // Химия растит. сырья. 2021. № 2. С. 291–299. https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028250.

28. *Ramos R.T.M., Bezerra I.C.F., Ferreira M.R.A., Soares L.A.L.* Spectrophotometric quantification of flavonoids in herbal material, crude extract, and fractions from leaves of *Eugenia uniflora* Linn. // Pharmacogn. Res. 2017. V. 9, No 3. P. 253–260. https://doi.org/10.4103/pr.pr_143_16.

29. *Schober P., Boer C., Schwarte LA.* Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation // Anesth. Analg. 2018. V. 126, No 5. P. 1763–1768. https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864.

30. *Семенютина В.А., Беляев А.И., Свинцов И.П.* Анализ содержания биологических пигментов в листьях древесных растений при стрессовых воздействиях // Успехи современ. естествозн. 2020. № 7. С. 43–48. https://doi.org/10.17513/use.37430.

31. *Lorini A., Damin F.M., de Oliveira D.N., Crizel R.L., Godoy H.T., Galli V., Meinhart A.D.* Characterization and quantification of bioactive compounds from *Ilex paraguariensis* residue by HPLC-ESI-QTOF-MS from plants cultivated under different cultivation systems // J. Food Sci. 2021. V. 86, No 5. P. 1599–1619. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15694.

32. *Gao G., Lv Z., Zhang G., Li J., Zhang J., He C.* An ABA-flavonoid relationship contributes to the differences in drought resistance between different sea buckthorn subspecies // Tree Physiol. 2021. V. 41, No 5. P. 744–755. https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa155.

33. *Bhusal N., Lee M., Lee H., Adhikari A., Han A.R., Han A., Kim H.S.* Evaluation of morphological, physiological, and biochemical traits for assessing drought resistance in eleven tree species // Sci. Total Environ. 2021. V. 779. Art. 146466. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146466.

34. *Shi Z., Deng X., Bai D., Lei J., Li M., Zeng L., Xiao W.* Transcriptomic analysis reveals the mechanism of *Picea crassifolia* survival for alpine treeline condition // Forests. 2020. V. 11, No 2. Art. 156. https://doi.org/10.3390/f11020156.

## References

1. Suo Z., Jia Z., Lu Q., Pan B., Jin X., Xu G., Peng X., Sun H., Tao Y. Distinguishing *Haloxylon persicum* and *H. ammodendron* (*Haloxylon* Bunge, Amaranthaceae) using DNA marker. *AASRI Procedia*, 2012, vol. 1, pp. 305–310. https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.06.047.

2. Yang F., Lv G. Metabolomic analysis of the response of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to drought. *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, vol. 24, no. 10, art. 9099. https://doi.org/10.3390/ijms24109099.

3. Chen M., Zuo X.-A. Effect of pollen limitation and pollinator visitation on pollination success of *Haloxylon ammodendron* (CA Mey.) Bunge in fragmented habitats. *Front. Plant Sci.*, 2019, vol. 10, art. 327. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00327.

4. Shi J., Hao X., Wang Z., Jiang M., Peng M., Bai J., Zhuang L. Effects of great gerbil disturbance on photosynthetic characteristics and nutrient status of *Haloxylon ammodendron*. *Plants*, 2024, vol. 13, no. 11, art. 1457. https://doi.org/10.3390/plants13111457.

5. Shagaipov M.M., Bulakhtina G.K. Black saxaul is a reliable way to increase the productivity of natural pastures in desert areas. *Izv. Lower Volga Agro-Univ. Complex*, 2011, no. 2, pp. 67–70. (In Russian)

6. Novitskiy Z.B., Khamzaev A.Kh., Bakirov N.Zh., Atadjanova G.H. Creation of permanent forest-seed plots of saxaul (*Haloxylon aphyllum* (Minkw.)) on the drained bottom of the Aral Sea. *Russ. J. Ecosyst. Ecol.*, 2022, vol. 7, no. 2, art. 1. https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-2-1. (In Russian)

7. Wang P., Man L., Ma L., Qi J., Ren Y., Yao Z., Wang B., Cheng C., Zhang H. *In vitro* regeneration of *Haloxylon ammodendron*. *Not. Sci. Biol.*, 2023, vol. 15, no. 2, art. 11585. https://doi.org/10.55779/nsb15211585.

8. Liu Y., Zeng Y., Yang Y., Wang N., Liang Y. Competition, spatial pattern, and regeneration of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* communities in the Gurbantunggut Desert, Northwest China. *J. Arid Land*, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 1138–1158. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0105-x.

9. Peng Y., Nafee-Ul A., Liu M., He Q., Liang Z. Assessment of genetic diversity in *Bupleurum* spp. basing agronomic traits, medicinal components and ISSR markers. *Genes*, 2023, vol. 14, no. 4, art. 951. https://doi.org/10.3390/genes14040951.

10. Saghir K., Abdelwahd R., Iraqi D., Lebkiri N., Gaboun F., El Goumi Y., Ibrahimi M., Abbas Y., Diria G. Assessment of genetic diversity among wild rose in Morocco using ISSR and DAMD markers. *J. Genet. Eng. Biotechnol.*, 2022, vol. 20, no. 1, art. 150. https://doi.org/10.1186/s43141-022-00425-1.
11. Sharma A., Dutta P., Doggalli G., Nageshvar Chapter 5: Genome mapping using ISSR markers. In: Heisnam P., Ansari Z.G., Khurshid N., Kumaresan P.R., Yadav D., Majumder J. (Eds.) *Emerging Trends in Climate Action for Sustainable Development*. Srinagar, Res. Floor, 2024, pp. 47–56.
12. Jabari M., Golparvar A., Sorkhilalehloo B., Shams M. Investigation of genetic diversity of Iranian wild relatives of bread wheat using ISSR and SSR markers. *J. Genet. Eng. Biotechnol.*, 2023, vol. 21, no. 1, art. 73. https://doi.org/10.1186/s43141-023-00526-5.
13. Shayan S., Vahed M.M., Mohammadi S.A., Ghassemi-Golezani K., Sadeghpour F., Youssefi A. Genetic diversity and grouping of winter barley genotypes for root characteristics and ISSR markers. *Plant Prod.*, 2020, vol. 43, no. 3, pp. 323–336. https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27840.1684.
14. He X.-h., Si J.-h., Zhou D.-m., Wang C.-l., Zhao C.-y., Jia B., Qin J., Zhu X.-l. Leaf chlorophyll parameters and photosynthetic characteristic variations with stand age in a typical desert species (*Haloxylon ammodendron*). *Front. Plant Sci.*, 2022, vol. 13, art. 967849. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.967849.
15. Krzemińska B., Borkowska I., Malm M., Tchórzewska D., Vangronsveld J., Vassilev A., Dos Santos Szewczyk K., Wójcik M. Comparative study of the photosynthetic efficiency and leaf structure of four *Cotoneaster* species. *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, no. 1, art. 25113. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75434-w.
16. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 81, nos. 2–3, pp. 337–354. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
17. González-Espíndola L.Á., Pedroza-Sandoval A., Trejo-Calzada R., Jacobo-Salcedo M.d.R., García de los Santos G., Quezada-Rivera J.J. Relative water content, chlorophyll index, and photosynthetic pigments on *Lotus corniculatus* L. in response to water deficit. *Plants*, 2024, vol. 13, no. 7, art. 961. https://doi.org/10.3390/plants13070961.
18. Swoczyna T., Kalaji H.M., Bussotti F., Mojski J., Pollastrini M. Environmental stress - what can we learn from chlorophyll *a* fluorescence analysis in woody plants? A review. *Front. Plant Sci.*, 2022, vol. 13, art. 1048582. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1048582.
19. Wang N., Chen H., Tian Y. Effects of nickel, lead, and copper stress on the growth and biochemical responses of *Aegilops tauschii* seedlings. *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, no. 1, art. 24832. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77143-w.
20. Rosas-Saavedra C., Stange C. Biosynthesis of carotenoids in plants: Enzymes and color. In: Stange C. (Ed.) *Carotenoids in Nature: Biosynthesis, Regulation and Function*. Ser.: Subcellular Biochemistry. Vol. 79. Cham, Springer, 2016, pp. 35–69. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7_2.
21. Nisar N., Li L., Lu S., Khin N.C., Pogson B.J. Carotenoid metabolism in plants. *Mol. Plant*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 68–82. https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007.
22. Ainsworth E.A., Gillespie K.M. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. *Nat. Protoc.*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 875–877. https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102.
23. Habyarimana E., Dall'Agata M., De Franceschi P., Baloch F.S. Genome-wide association mapping of total antioxidant capacity, phenols, tannins, and flavonoids in a panel of *Sorghum bicolor* and *S. bicolor* × *S. halepense* populations using multi-locus models. *PLoS One*, 2019, vol. 14, no. 12, art. e0225979. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225979.
24. Makarkina M.A., Vetrova O.A., Bogomolova N.I. Study on carotenoid content in berry fruits. *Hortic. Vitic.*, 2023, no. 5, pp. 49–55. https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-49-55. (In Russian)

25. Shestibratov K.A., Baranov O.Yu., Mescherova E.N., Kiryanov P.S., Panteleev S.V., Mozharovskaya L.V., Krutovsky K.V., Padutov V.E. Structure and phylogeny of the curly birch chloroplast genome. *Front. Genet.*, 2021, vol. 12, art. 625764. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.625764.
26. Lichtenthaler H.K., Babani F. Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll *a*/*b* and chlorophylls to carotenoids (*a*+*b*)/(*x*+*c*) in $C_4$ plants as compared to $C_3$ plants. *Photosynthetica*, 2022, vol. 60, no. 1, pp. 3–9. https://doi.org/10.32615/ps.2021.041.
27. Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Zagoskina N.V. Method for determining the total content of phenolic compounds in plant extracts with Folin–Denis reagent and Folin–Chocalteu reagent: Modification and comparison. *Khim. Rastit. Syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 291–299. https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028250. (In Russian)
28. Ramos R.T.M., Bezerra I.C.F., Ferreira M.R.A., Soares L.A.L. Spectrophotometric quantification of flavonoids in herbal material, crude extract, and fractions from leaves of *Eugenia uniflora* Linn. *Pharmacogn. Res.*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 253–260. https://doi.org/10.4103/pr.pr_143_16.
29. Schober P., Boer C., Schwarte LA. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesth. Analg.*, 2018, vol. 126, no. 5, pp. 1763–1768. https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864.
30. Semenyutina V.A., Belyaev A.I., Svintsov I.P. Analysis of the content of biological pigments in leaves of wood plants under stress. *Adv. Curr. Nat. Sci.*, 2020, no. 7, pp. 43–48. https://doi.org/10.17513/use.37430. (In Russian)
31. Lorini A., Damin F.M., de Oliveira D.N., Crizel R.L., Godoy H.T., Galli V., Meinhart A.D. Characterization and quantification of bioactive compounds from *Ilex paraguariensis* residue by HPLC-ESI-QTOF-MS from plants cultivated under different cultivation systems. *J. Food Sci.*, 2021, vol. 86, no. 5, pp. 1599–1619. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15694.
32. Gao G., Lv Z., Zhang G., Li J., Zhang J., He C. An ABA-flavonoid relationship contributes to the differences in drought resistance between different sea buckthorn subspecies. *Tree Physiol.*, 2021, vol. 41, no. 5, pp. 744–755. https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa155.
33. Bhusal N., Lee M., Lee H., Adhikari A., Han A.R., Han A., Kim H.S. Evaluation of morphological, physiological, and biochemical traits for assessing drought resistance in eleven tree species. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 779, art. 146466. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146466.
34. Shi Z., Deng X., Bai D., Lei J., Li M., Zeng L., Xiao W. Transcriptomic analysis reveals the mechanism of *Picea crassifolia* survival for alpine treeline condition. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 2, art. 156. https://doi.org/10.3390/f11020156.

## Информация об авторах

**Петр Анатольевич Кузьмин**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией молекулярной селекции, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук

E-mail: *kuzmin-p@vfanc.ru*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1303-765X

**Ирина Михайловна Романова,** инженер-исследователь лаборатории молекулярной селекции, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук

E-mail: *romanova-i@vfanc.ru*
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8635-8529

## Author Information

**Petr A. Kuzmin**, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of Laboratory of Molecular Breeding, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences

E-mail: *kuzmin-p@vfanc.ru*

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1303-765X

**Irina M. Romanova**, Research Engineer, Laboratory of Molecular Breeding, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences

E-mail: *romanova-i@vfanc.ru*

ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8635-8529

Поступила в редакцию 30.01.2025 Received January 30, 2025

Принята к публикации 11.07.2025 Accepted July 11, 2025