

# ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья  
УДК 633.854.78:581.132  
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-014



## Содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях коллекционных генотипов кунжута (*Sesatum indicum* L.) в условиях Ташкентской области Республики Узбекистан

Е. Б. Пирназаров, Б. Х. Аманов

Чирчикский государственный педагогический университет, Чирчик, Узбекистан

Автор, ответственный за переписку: Ербол Бакирович Пирназаров, e.pirnazarov@cspu.uz

**Актуальность.** В условиях аридизации климата и нарастания водного дефицита в Республике Узбекистан кунжут (*Sesatum indicum* L.) рассматривается как перспективная масличная культура, способная адаптироваться к высоким температурам и ограниченной влагообеспеченности. Однако физиолого-биохимические особенности фотосинтетического аппарата различных генотипов кунжута остаются недостаточно изученными, что ограничивает возможности целенаправленного селекционного отбора устойчивых форм.

**Материалы и методы.** Исследованы 12 коллекционных генотипов кунжута различного эколого-географического происхождения, выращенных в условиях Кибрайского района Ташкентской области в 2025 г. Содержание хлорофиллов *a*, *b*, их суммы и каротиноидов в листьях определяли спектрофотометрически после экстракции 96-процентным этанолом в фазах бутонизации, цветения и начала формирования коробочек по формулам Лихтеналера.

**Результаты.** Установлено, что концентрация хлорофилла *a* (Chl *a*) в течение генеративного периода оставалась относительно стабильной (1,06–1,18 мг/г), тогда как содержание Chl *b* проявляло выраженную фазовую динамику, снижаясь к цветению и возрастая на стадии формирования коробочек. Максимальные значения суммарного хлорофилла (1,97 мг/г) отмечены на поздней фазе. Отношение Chl *a/b* варьировало в пределах 1,6–2,4, достигая максимума в фазе цветения и минимума в фазе плодообразования. Индекс Car/Chl (*a+b*) возрастал до 0,195 в период цветения и снижался до 0,108 к началу формирования плодов. Среди генотипов наибольшие уровни хлорофиллов и каротиноидов выявлены у К66, К161 и К1396, что указывает на их повышенную фотозащитную способность и потенциальную стрессоустойчивость.

**Заключение.** Полученные данные подтверждают выраженную фазовую и генотипическую вариабельность пигментной системы кунжута. Генотипы К66, К161 и К1396 могут быть рекомендованы в качестве исходного материала для селекционной работы, направленной на повышение засухоустойчивости и продуктивности культуры в аридных условиях.

**Ключевые слова:** фотосинтетическая активность, пигментная система растений, физиология фотосинтеза, адаптация к засухе, аридный климат, селекция масличных культур

**Благодарности:** исследование выполнено без внешнего финансирования.

Авторы выражают признательность Научно-исследовательскому институту генетических ресурсов растений Республики Узбекистан за предоставление материалов и создание условий для проведения эксперимента.

**Для цитирования:** Пирназаров Е.Б., Аманов Б.Х. Содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях коллекционных генотипов кунжута (*Sesatum indicum* L.) в условиях Ташкентской области Республики Узбекистан. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):83-91. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-014

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

## STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o14

### Chlorophyll *a* and *b* and carotenoid content in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.) collection genotypes under the conditions of Tashkent Region, Republic of Uzbekistan

Erbol B. Pirnazarov, Bakhtiyar Kh. Amanov

Chirchik State Pedagogical University, Chirchik, Uzbekistan

**Corresponding author:** Erbol B. Pirnazarov, e.pirnazarov@cspu.uz

**Background.** Under the conditions of climate aridization and increasing water deficit in Uzbekistan, sesame (*Sesamum indicum* L.) is considered a promising oilseed crop, capable of adapting to high temperatures and limited water availability. However, physiological and biochemical features of the photosynthetic apparatus in different sesame genotypes remain insufficiently studied, which limits targeted breeding of stress-tolerant forms.

**Materials and methods.** Twelve sesame collection genotypes of diverse ecogeographic origin, grown in Qibray District, Tashkent Region, in 2025, were studied. The content of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, their total, and carotenoids in leaves was measured spectrophotometrically after extraction with 96% ethanol at the stages of budding, flowering, and the onset of capsule formation, using Lichtenthaler's formulas.

**Results.** The concentration of chlorophyll *a* (Chl *a*) was found to remain relatively stable during the generative period (1.06–1.18 mg/g), whereas the content of Chl *b* exhibited pronounced phase-dependent dynamics, decreasing toward flowering and increasing in the stage of capsule formation. The highest values of total chlorophyll (1.97 mg/g) were recorded in the late development stage. The Chl *a/b* ratio varied from 1.6 to 2.4, reaching its maximum during flowering, and minimum during fruit formation. The Car/Chl (*a+b*) index increased to 0.195 during flowering and declined to 0.108 at the onset of fruit development. Among the genotypes, K66, K161, and K1396 showed the highest levels of chlorophylls and carotenoids, which attest to their enhanced photoprotective capacity and potential stress tolerance.

**Conclusion.** The obtained data confirm pronounced phase-related and genotypic variability of the pigment system in sesame leaves. Genotypes K66, K161, and K1396 may be recommended as source material for breeding programs aimed at improving drought tolerance and productivity of the crop under arid conditions.

**Keywords:** photosynthetic activity, plant pigment system, photosynthesis physiology, adaptation to drought, arid climate, oilseed crop breeding

**Acknowledgments:** the study was conducted without external funding.

The authors express their gratitude to the Research Institute of Plant Genetic Resources of the Republic of Uzbekistan for providing plant material and creating favorable conditions for the experiment.

**For citation:** Pirnazarov E.B., Amanov B.Kh. Chlorophyll *a* and *b* and carotenoid content in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.) collection genotypes under the conditions of Tashkent Region, Republic of Uzbekistan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):83-91. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o14

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

## Введение

Кунжут (*Sesamum indicum* L.) – одна из древнейших масличных культур, отличающаяся высокой пищевой, фармакологической и агротехнической ценностью. Для нее характерны засухоустойчивость, короткий вегетационный период и способность расти в регионах с жарким климатом и дефицитом воды (<https://pfaf.org/user/Plant.aspx?LatinName=Sesamum+indicum>). В условиях глобального потепления и нестабильности осадков кунжут рассматривается как перспективная культура для адаптивного земледелия и диверсификации посевов (Berhe et al., 2024).

Главным параметром, определяющим эффективность фотосинтеза, является состояние пигментной системы. Хлорофилл *a* (Chl *a*) отвечает за первичное поглощение света и передачу энергии в реакционные центры, а хлорофилл *b* (Chl *b*) расширяет спектр поглощаемого света, входя в состав антенн фотосистемы II. Соотношение Chl *a/b* служит индикатором структурной организации фотосинтетического аппарата: высокие значения отражают относительно большую долю реакционных центров и уменьшение светособирающих антенн, тогда как низкие значения свидетельствуют об увеличении доли Chl *b* в антеннах фотосистемы II и усилении светособирающей функции (Lichtenthaler, Babani, 2021). Каротиноиды (лютеин,  $\beta$ -каротин, зеаксантин и др.) участвуют в передаче энергии хлорофиллам и выполняют фотозащитную функцию. Отношение Car/Chl (*a+b*) отражает антиоксидантный потенциал фотосинтетического аппарата: повышенные значения индекса (0,18–0,25) свидетельствуют об усилении фотозащитных механизмов и устойчивости растений к фотострессу (Chugh et al., 2024).

Фотосинтетические пигменты широко используются как физиологические маркеры устойчивости растений к абиотическим стрессам. Показано, что засоление, переувлажнение и дефицит влаги приводят к снижению содержания хлорофиллов и изменению их соотношения: как правило, наблюдается увеличение отношения Chl *a/b*, что связано с более быстрым снижением содержания Chl *b*, входящего в состав антенн фотосистемы II, и отражает перестройку фотосинтетического аппарата у кунжута и других культур. Каротиноиды играют ключевую роль в защите фотосистем от фотоокислительного повреждения, особенно в условиях температурного и водного стресса. В связи с этим анализ содержания хлорофиллов и каротиноидов, а также индексов Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*) является обоснованным инструментом оценки адаптивного потенциала генотипов кунжута (Bagheri et al., 2023; Kouighat et al., 2023).

Показано, что содержание фотосинтетических пигментов у кунжута чувствительно к условиям минерального питания и физиологической регуляции роста. Применение регуляторов роста и оптимизация элементов питания приводят к увеличению содержания хлорофиллов и усилению фотосинтетической активности. Это подчеркивает функциональную значимость пигментной системы как интегрального показателя физиологического состояния растений и их продукционного потенциала (Lichtenthaler, 1987; Lichtenthaler, Babani, 2021).

Несмотря на растущий интерес к кунжуту как к адаптивной культуре, физиолого-биохимические параметры его генотипов, особенно в условиях аридных регионов, остаются недостаточно изученными. В ряде исследований установлено, что устойчивые к стрессу генотипы

кунжута сохраняют более высокий уровень хлорофиллов и каротиноидов в стрессовых условиях, что может быть использовано при отборе в селекции (Yousefzadeh, Ehsanzadeh, 2017; Habibullah et al., 2021; Pandey et al., 2021).

*Цель настоящего исследования* – изучить динамику содержания хлорофиллов *a* и *b*, их суммы, каротиноидов и их соотношений у коллекционных генотипов кунжута в течение генеративного периода, а также оценить селекционную ценность генотипов на основе этих показателей.

## Материалы и методы

В исследование включили 12 коллекционных образцов кунжута (*Sesamum indicum* L.) из Национального генофонда сельскохозяйственных культур Научно-исследовательского института генетических ресурсов растений Республики Узбекистан. Генотипы происходили из Узбекистана (контрольный сорт 'Tashkent-skiy-122'), Афганистана (K66), Венесуэлы (K9428), Ирана (K119), Армении (K98), Турции (K161), Кении (K1396), Индии (K9549), Китая (K598), Таджикистана (K1185), Израиля (K221) и Сирии (K216). Разнообразие происхождения предполагало различия в адаптивных свойствах. Полевой опыт провели в 2025 г. в Кибрайском районе Ташкентской области (41°20' с. ш., 69°40' в. д., 350 м н. у. м.). Почва – серозем (2,0% гумуса, pH = 7,5) со средней обеспеченностью азотом и фосфором. Метеорологические условия 2025 г. в период проведения эксперимента характеризовались типичным для региона аридным климатом. Средняя температура воздуха в вегетационный период (май – август) составляла 27,4°C. Максимальные дневные температуры в июле достигали 38–40°C. Суммарное количество атмосферных осадков за период вегетации составило около 45–60 мм. Количество атмосферных осадков распределялось по месяцам следующим образом: в июне – около 18 мм, в июле – около 14 мм и в августе – около 13 мм. Относительная влажность воздуха в летние месяцы составляла 35–45%. Для всех генотипов применяли одинаковую агротехнологию: посев проводили в оптимальные для региона сроки, междурядья составляли 60 см, уход за посевами включал междурядную культивацию и ручную прополку. Опыт выращивали в условиях естественного увлажнения без дополнительного орошения.

Листовые пробы отбирали в трех фазах онтогенеза: начало бутонизации (25–30-й день после всходов), полное цветение (40–50-й день) и формирование коробочек (60–70-й день). В каждой фазе у 12 растений каждого генотипа срезали 3–4-й полностью развернутый лист главного стебля (три повторности на растение). Навеска листа составляла  $0,50 \pm 0,02$  г. Отбор проводили утром (до 09:00), чтобы уменьшить суточные колебания пигментного состава. Листовую ткань помещали в пробирки с 5 мл 96-процентного этанола и выдерживали при комнатной температуре в темноте. После экстракции суспензию фильтровали, фильтрат доводили до исходного объема. Основы спектрофотометрического определения фотосинтетических пигментов в листьях растений были заложены в классических работах по биохимии хлоропластов (Arnon, 1949) и впоследствии стандартизированы в методических руководствах по анализу хлорофиллов и каротиноидов (Lichtenthaler, Wellburn, 1983; Lichtenthaler, 1987).

Оптическую плотность экстрактов измеряли на спектрофотометре Metash UV-5100 при длинах волн 664, 649 и 470 нм. Содержание хлорофиллов и каротиноидов рассчитывали по формулам Лихтенталера для этанольных экстрактов (Lichtenthaler, Wellburn, 1983; Lichtenthaler, 1987; Lichtenthaler, Babani, 2021). Содержание хлорофиллов и каротиноидов рассчитывали по формулам (1–4) Лихтенталера для этанольных экстрактов:

$$\text{Chl } a = 13,36 A_{664} - 5,19 A_{649}, \quad (1)$$

$$\text{Chl } b = 27,43 A_{649} - 8,12 A_{664}, \quad (2)$$

$$\text{Chl } (a+b) = 5,24 A_{664} + 22,24 A_{649}, \quad (3)$$

$$\text{Car} = \frac{1000 A_{470} - 2,13 \text{Chl } a - 97,64 \text{Chl } b}{209}, \quad (4)$$

где  $A_{\lambda}$  – оптическая плотность экстракта при длине волны  $\lambda$  (нм);  $A_{470}$ ,  $A_{649}$  и  $A_{664}$  – оптическая плотность при длинах волн 470, 649 и 664 нм соответственно;

Chl *a* – содержание хлорофилла *a*;

Chl *b* – содержание хлорофилла *b*;

Chl (*a+b*) – суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b*;

Car – содержание каротиноидов.

Полученные значения выражали в миллиграммах на грамм сырой массы (мг/г). Для каждого растения вычисляли соотношения Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA). Для оценки достоверности различий между генотипами и фазами развития рассчитывали наименьшую существенную разницу (НСР) при уровне значимости  $P \leq 0,05$ . Для каждого показателя определяли среднее значение ( $M$ ), стандартное отклонение ( $SD$ ) и стандартную ошибку среднего ( $SE$ ).

## Результаты

В условиях Ташкентской области суммарный хлорофилл Chl (*a+b*) у исследованных генотипов варьировал в пределах 1,5–2,0 мг/г. В фазе бутонизации среднее по генотипам содержание Chl *a* составляло 1,065 мг/г, Chl *b* – 0,542 мг/г, Chl (*a+b*) – 1,607 мг/г, каротиноидов – 0,261 мг/г. К фазе цветения эти показатели достигли 1,156; 0,485; 1,641 и 0,318 мг/г соответственно. Фазовая динамика фотосинтетических пигментов представлена на рисунке 1.

К началу формирования коробочек наблюдался заметный рост Chl *b* (до 0,792 мг/г, +63% к фазе цветения) при умеренном увеличении Chl *a* (до 1,182 мг/г) и снижении содержания каротиноидов (до 0,206 мг/г). Благодаря этому суммарный хлорофилл достиг максимума (1,974 мг/г, рост +20% относительно фазы цветения), тогда как доля каротиноидов от суммы хлорофиллов снизилась до 0,108, что представлено в таблице 1.

Диапазон значений содержания фотосинтетических пигментов у отдельных генотипов свидетельствовал о выраженной внутривидовой вариабельности. Межгенотипические различия по уровню хлорофиллов и каротиноидов в различные фазы развития растений представлены в таблице 2, а их графическое распределение показано на рисунке 2.

Максимальные значения Chl *a* относительного фазовой средней отмечены у K161 (Турция) и K66 (Афганистан), а минимальные – у K98 (Армения). По содержанию каротиноидов лидировали контрольный сорт 'Tashkent-skiy-122' и K1396, тогда как наименьшие значения зафиксированы у K161 в фазе формирования коробочек (0,13 мг/г).

Диапазон значений у отдельных генотипов свидетельствовал о выраженной внутривидовой вариабель-

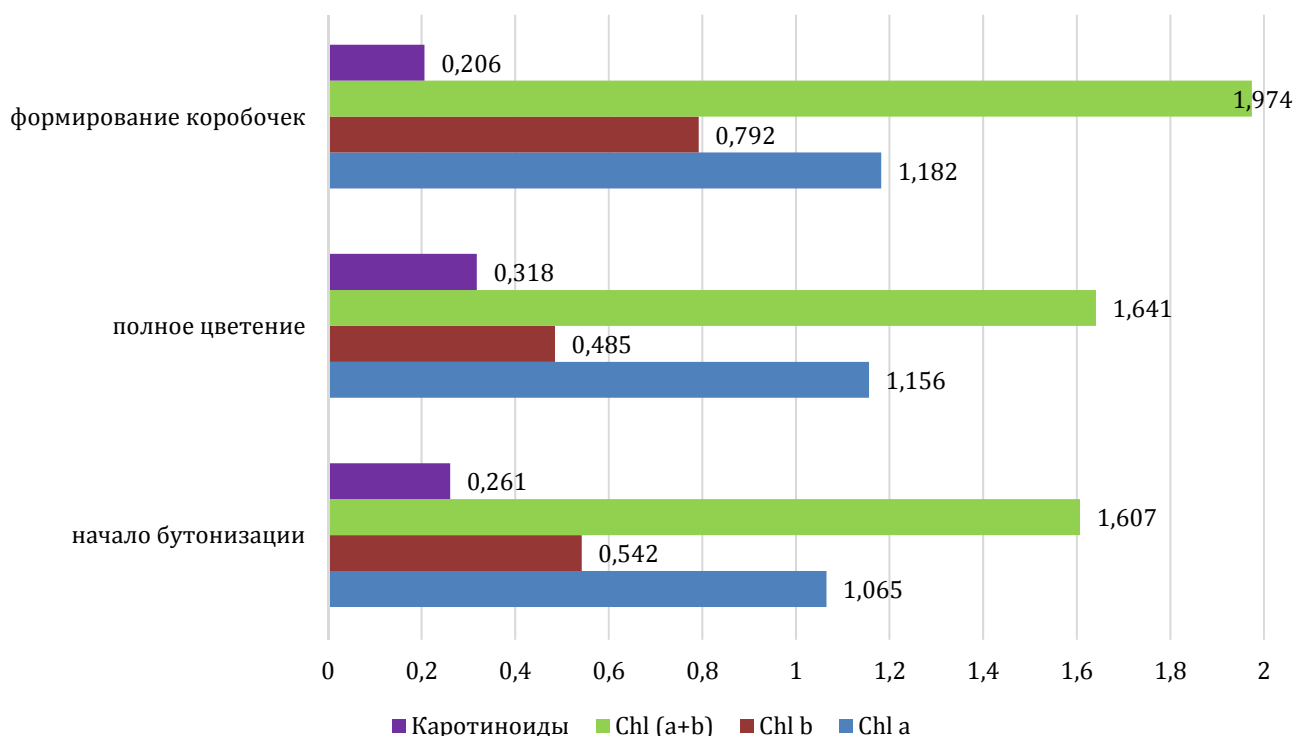


Рис. 1. Динамика фотосинтетических пигментов по фазам вегетации кунжута, мг/г

Fig. 1. Dynamics of photosynthetic pigments across sesame growth stages, mg/g

**Таблица 1.** Среднее ( $\pm$  SD) содержание пигментов (мг/г) в листьях кунжута на разных фазах вегетации (n = 12 генотипов)**Table 1.** Mean ( $\pm$  SD) pigment content (mg g<sup>-1</sup>) in sesame leaves at different growth stages (n = 12 genotypes)

Фаза / Stage	Chl a	Chl b	Chl (a+b)	Каротиноиды / Carotenoids
начало бутонизации / onset of budding	1,065 $\pm$ 0,109	0,542 $\pm$ 0,117	1,607 $\pm$ 0,193	0,261 $\pm$ 0,049
полное цветение / full flowering	1,156 $\pm$ 0,098	0,485 $\pm$ 0,074	1,641 $\pm$ 0,156	0,318 $\pm$ 0,039
формирование коробочек / capsule formation	1,182 $\pm$ 0,197	0,792 $\pm$ 0,257	1,974 $\pm$ 0,373	0,206 $\pm$ 0,067

**Таблица 2.** Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл a, хлорофилл b, их сумма и каротиноиды) в листьях генотипов кунжута (*Sesamum indicum* L.) в различные фазы развития растений (мг/г сырой массы)**Table 2.** Content of photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, and carotenoids) in the leaves of sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) at different development stages (mg/g fresh weight)

Генотип / Genotype	Chl a	Chl b	Chl (a+b)	Car	Chl a/b	Car/Chl (a+b)
<b>Начало бутонизации / Onset of budding</b>						
'Tashkentkiy-122', контроль	1,15 $\pm$ 0,06	0,55 $\pm$ 0,02	1,70 $\pm$ 0,06	0,30 $\pm$ 0,01	2,09	0,18
K66	1,19 $\pm$ 0,04	0,51 $\pm$ 0,01	1,71 $\pm$ 0,05	0,31 $\pm$ 0,01	2,33	0,18
K9428	1,19 $\pm$ 0,03	0,64 $\pm$ 0,03	1,84 $\pm$ 0,06	0,29 $\pm$ 0,01	1,85	0,16
K119	1,01 $\pm$ 0,04	0,79 $\pm$ 0,04	1,81 $\pm$ 0,08	0,16 $\pm$ 0,01	1,28	0,09
K98	1,00 $\pm$ 0,02	0,48 $\pm$ 0,01	1,49 $\pm$ 0,04	0,26 $\pm$ 0,01	2,08	0,17
K161	1,15 $\pm$ 0,05	0,58 $\pm$ 0,02	1,74 $\pm$ 0,04	0,28 $\pm$ 0,01	1,98	0,16
K1396	1,21 $\pm$ 0,04	0,67 $\pm$ 0,01	1,89 $\pm$ 0,05	0,18 $\pm$ 0,01	1,81	0,10
K9549	0,90 $\pm$ 0,03	0,49 $\pm$ 0,02	1,41 $\pm$ 0,04	0,22 $\pm$ 0,01	1,84	0,16
K598	0,99 $\pm$ 0,03	0,40 $\pm$ 0,01	1,41 $\pm$ 0,03	0,31 $\pm$ 0,02	2,48	0,22
K1185	1,04 $\pm$ 0,03	0,49 $\pm$ 0,02	1,54 $\pm$ 0,04	0,29 $\pm$ 0,00	2,13	0,19
K221	0,96 $\pm$ 0,02	0,39 $\pm$ 0,01	1,35 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,01	2,44	0,21
K216	0,96 $\pm$ 0,02	0,45 $\pm$ 0,02	1,42 $\pm$ 0,03	0,26 $\pm$ 0,01	2,13	0,18
НСР	0,11	0,05	0,14	0,03	0,37	0,04
<b>Полное цветение / Full flowering</b>						
'Tashkentkiy-122', контроль	1,13 $\pm$ 0,02	0,45 $\pm$ 0,01	1,58 $\pm$ 0,03	0,37 $\pm$ 0,02	2,51	0,23
K66	1,38 $\pm$ 0,01	0,62 $\pm$ 0,01	1,99 $\pm$ 0,01	0,35 $\pm$ 0,01	2,23	0,18
K9428	1,18 $\pm$ 0,01	0,44 $\pm$ 0,02	1,62 $\pm$ 0,03	0,35 $\pm$ 0,01	2,68	0,22
K119	1,05 $\pm$ 0,05	0,54 $\pm$ 0,02	1,60 $\pm$ 0,04	0,30 $\pm$ 0,02	1,94	0,19
K98	1,18 $\pm$ 0,01	0,53 $\pm$ 0,02	1,71 $\pm$ 0,01	0,32 $\pm$ 0,01	2,23	0,19
K161	1,16 $\pm$ 0,02	0,52 $\pm$ 0,00	1,68 $\pm$ 0,03	0,30 $\pm$ 0,00	2,23	0,18
K1396	1,03 $\pm$ 0,05	0,38 $\pm$ 0,01	1,41 $\pm$ 0,06	0,32 $\pm$ 0,02	2,71	0,23
K9549	1,28 $\pm$ 0,05	0,50 $\pm$ 0,01	1,78 $\pm$ 0,04	0,34 $\pm$ 0,01	2,56	0,19
K598	1,16 $\pm$ 0,03	0,42 $\pm$ 0,01	1,58 $\pm$ 0,04	0,34 $\pm$ 0,00	2,76	0,22
K1185	1,04 $\pm$ 0,02	0,37 $\pm$ 0,02	1,41 $\pm$ 0,04	0,33 $\pm$ 0,01	2,81	0,23
K221	1,13 $\pm$ 0,05	0,50 $\pm$ 0,02	1,63 $\pm$ 0,04	0,27 $\pm$ 0,02	2,26	0,17
K216	1,15 $\pm$ 0,05	0,55 $\pm$ 0,01	1,70 $\pm$ 0,06	0,23 $\pm$ 0,01	2,09	0,14
НСР	0,11	0,05	0,14	0,04	0,39	0,05

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Генотип / Genotype	Chl a	Chl b	Chl (a+b)	Car	Chl a/b	Car/Chl (a+b)
<b>Формирование коробочек / Capsule formation</b>						
'Tashkentkiy-122', контроль	1,00 ± 0,02	1,29 ± 0,02	2,29 ± 0,04	0,15 ± 0,00	0,78	0,07
K66	1,17 ± 0,04	0,98 ± 0,01	2,16 ± 0,05	0,17 ± 0,01	1,19	0,08
K9428	1,32 ± 0,03	0,85 ± 0,02	2,17 ± 0,05	0,22 ± 0,01	1,55	0,10
K119	1,31 ± 0,03	1,04 ± 0,05	2,35 ± 0,06	0,15 ± 0,01	1,58	0,11
K98	0,86 ± 0,01	0,38 ± 0,01	1,24 ± 0,02	0,16 ± 0,01	2,26	0,13
K161	1,59 ± 0,06	0,93 ± 0,05	2,52 ± 0,11	0,30 ± 0,01	1,71	0,12
K1396	1,37 ± 0,02	0,75 ± 0,03	2,13 ± 0,02	0,32 ± 0,01	1,88	0,15
K9549	1,14 ± 0,01	0,41 ± 0,02	1,55 ± 0,04	0,30 ± 0,02	2,78	0,19
K598	1,16 ± 0,03	0,75 ± 0,03	1,92 ± 0,03	0,16 ± 0,01	1,55	0,08
K1185	1,13 ± 0,02	0,72 ± 0,04	1,84 ± 0,04	0,22 ± 0,01	1,57	0,12
K221	1,13 ± 0,05	0,80 ± 0,01	1,93 ± 0,06	0,13 ± 0,01	1,41	0,07
K216	0,98 ± 0,00	0,59 ± 0,02	1,58 ± 0,02	0,19 ± 0,00	1,66	0,12
НСР	0,14	0,11	0,18	0,04	0,42	0,05
<b>Среднее по фазам / Mean across stages</b>						
'Tashkentkiy-122', контроль	1,09 ± 0,02	0,76 ± 0,01	1,86 ± 0,03	0,27 ± 0,01	1,79	0,16
K66	1,25 ± 0,02	0,70 ± 0,01	1,95 ± 0,02	0,28 ± 0,01	1,92	0,15
K9428	1,23 ± 0,02	0,64 ± 0,01	1,88 ± 0,03	0,29 ± 0,01	2,03	0,16
K119	1,12 ± 0,03	0,79 ± 0,02	1,92 ± 0,04	0,20 ± 0,01	1,60	0,13
K98	1,01 ± 0,01	0,46 ± 0,01	1,48 ± 0,02	0,25 ± 0,01	2,19	0,16
K161	1,30 ± 0,03	0,68 ± 0,02	1,98 ± 0,04	0,29 ± 0,01	1,97	0,15
K1396	1,20 ± 0,03	0,60 ± 0,01	1,81 ± 0,04	0,27 ± 0,01	2,13	0,16
K9549	1,11 ± 0,02	0,47 ± 0,01	1,58 ± 0,03	0,29 ± 0,01	2,39	0,18
K598	1,10 ± 0,02	0,52 ± 0,01	1,64 ± 0,03	0,27 ± 0,01	2,26	0,17
K1185	1,07 ± 0,02	0,53 ± 0,01	1,60 ± 0,03	0,28 ± 0,01	2,17	0,18
K221	1,07 ± 0,03	0,56 ± 0,01	1,64 ± 0,04	0,23 ± 0,01	2,04	0,15
K216	1,03 ± 0,02	0,53 ± 0,01	1,57 ± 0,03	0,23 ± 0,01	1,96	0,15
НСР	0,12	0,07	0,15	0,04	0,39	0,05

ности содержания фотосинтетических пигментов. В фазе начала бутонизации содержание Chl a изменялось от 0,90 мг/г у генотипа K9549 (Индия) до 1,21 мг/г у генотипа K1396 (Кения). Содержание Chl b варьировало от 0,39 мг/г у генотипа K221 до 0,79 мг/г у генотипа K119. Суммарное содержание хлорофиллов Chl (a+b) находилось в пределах 1,35–1,89 мг/г, минимальные значения отмечены у генотипа K221, максимальные – у K1396. Содержание каротиноидов составляло 0,16–0,31 мг/г.

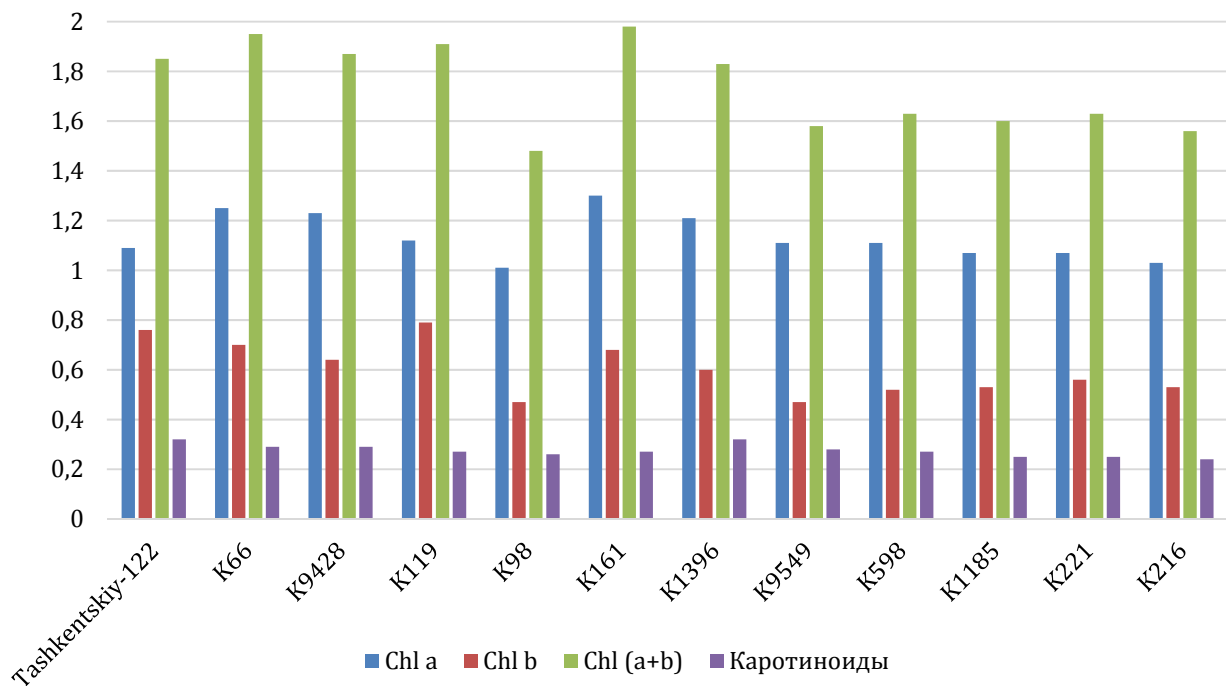
В фазе полного цветения содержание Chl a изменялось в пределах 1,03–1,38 мг/г, минимальные значения отмечены у генотипа K1396, максимальные – у K66. Содержание Chl b составляло 0,37–0,62 мг/г. Суммарное со-

держание хлорофиллов варьировало от 1,41 до 1,99 мг/г, тогда как содержание каротиноидов находилось в диапазоне 0,23–0,37 мг/г.

В фазе формирования коробочек содержание Chl a варьировало от 0,86 мг/г у генотипа K98 до 1,59 мг/г у генотипа K161. Содержание Chl b изменялось в пределах 0,38–1,29 мг/г, а суммарное содержание хлорофиллов – от 1,24 до 2,52 мг/г. Содержание каротиноидов составляло 0,13–0,32 мг/г.

Полные данные по содержанию фотосинтетических пигментов у всех генотипов и во всех фазах развития растений приведены в таблице 2.

Индексы Chl a/b и Car/Chl (a+b) отражали адаптивную перестройку фотосинтетического аппарата. Значе-



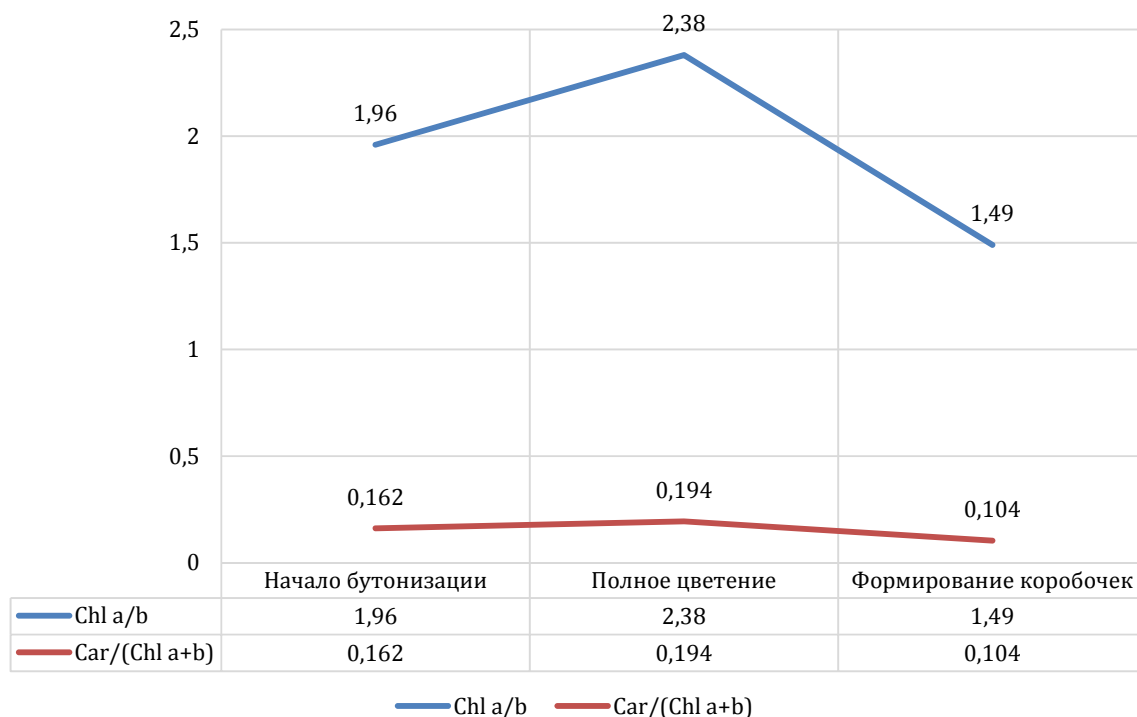
**Рис. 2. Среднее содержание пигментов у генотипов кунжута, мг/г**  
**Fig. 2. Mean pigment content in sesame genotypes, mg/g**

ния Chl *a/b* у кунжута (1,6–2,4) были ниже, чем характерные для многих  $C_3$ -культур, таких как пшеница (*Triticum aestivum* L.), рис (*Oryza sativa* L.) и соя (*Glycine max* L.) (2,6–3,3), что указывает на относительно большую долю Chl *b* в антеннах фотосистемы II и соответствует данным литературы. Минимальный индекс (1,6) отмечен в фазе формирования коробочек, максимальный (2,42) – в фазе цветения. Показатель Car/Chl (*a+b*) достигал 0,195 на цветении и снижался до 0,108 к плодообразованию, что

свидетельствует о фазовой динамике фотозащитных механизмов. Изменение индексов Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*) по фазам онтогенеза представлено на рисунке 3.

#### Обсуждение

Полученные значения индекса Chl *a/b* оказались ниже типичных для большинства  $C_3$ -культур. Это отражает анатомические особенности листьев кунжута: сравни-



**Рис. 3. Динамика соотношений Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*)**  
**Fig. 3. Dynamics of the Chl *a/b* and Car/Chl (*a+b*) ratios**

тельно небольшую толщину листовой пластинки, меньшее число клеток мезофилла и меньшее количество хлоропластов в них, что обеспечивает эффективное использование световой энергии без необходимости в высоком значении отношения  $Chl\ a/b$ . Подобные низкие значения для кунжута (2,0–2,4) приводятся и в гиперспектральных исследованиях (Berhe et al., 2024). Абсолютное содержание хлорофиллов у изученных генотипов кунжута (1,5–2,0 мг/г) также ниже, чем у многих злаковых и масличных культур, что связано с различиями в морфологии листьев, прежде всего их толщине, плотности мезофилла и содержании хлоропластов (Lichtenthaler, 1987; Lichtenthaler, Babani, 2021).

Ряд исследований сообщает о более высоком содержании хлорофиллов у отдельных генотипов кунжута. Так, в иранских опытах линии Hendi 9 и Karaj 1 характеризовались высоким содержанием суммарного хлорофилла, достигавшим до 182 мг/г сырой массы (Hassanzadeh et al., 2009; Bagheri et al., 2023). Такое расхождение объясняется использованием других экстрагентов (ацетон, метанол), отбором листьев другого возраста и выращиванием в других условиях. Наше исследование проводилось в полевых условиях при стандартной агротехнике, что обусловило более низкие абсолютные уровни пигментов.

В фазе цветения отмечался рост индекса  $Chl\ a/b$  и относительного содержания каротиноидов, что отражает адаптацию листьев к интенсивной инсоляции и повышенную потребность в фотозащите, аналогично данным для стрессовых условий у кунжута (Chugh et al., 2024). Снижение  $Car/Chl\ (a+b)$  на поздней стадии связано с перераспределением ресурсов в пользу генеративных органов и ослаблением фотозащитных механизмов.

Снижение содержания хлорофиллов и изменение их соотношений рассматриваются как универсальная реакция фотосинтетического аппарата на абиотический стресс, что подтверждается данными других исследований, где показана тесная связь физиолого-биохимических показателей с адаптацией растений к неблагоприятным условиям среды (Kodirova et al., 2024). У кунжута переувлажнение и засоление сопровождаются деградацией  $Chl\ b$  и ростом индекса  $Chl\ a/b$ . Каротиноиды, напротив, вовлекаются в механизмы фотозащиты и антиоксидантной стабилизации мембран, особенно в фазах повышенной метаболической нагрузки (Kouighat et al., 2023). Наблюдаемая в нашем исследовании динамика  $Car/Chl\ (a+b)$  соответствует этим закономерностям. Сходные закономерности наблюдались в исследованиях у генотипов с устойчивостью к водному стрессу (Bagheri et al., 2023), где такие генотипы имели меньшие повреждения фотосистем и активную антиоксидантную защиту.

Физиологическое состояние листового аппарата непосредственно связано с формированием хозяйственно ценных признаков. Для кунжута показано, что улучшение минерального питания и водного режима сопровождается ростом содержания хлорофиллов и, как следствие, повышением урожайности и масличности семян. Вариабельность фотосинтетического аппарата в конечном счете отражается и на качестве продукции, включая биохимический состав масла (Lichtenthaler, 1987; Bagheri et al., 2023). Таким образом, выявленные в настоящей работе различия пигментной системы между генотипами имеют не только физиологическое, но и прямое агрономическое значение.

У генотипов, чувствительных к водному дефициту, таких как K98 и K9549, пониженные уровни хлорофилла

могут быть связаны со стрессовыми нарушениями синтеза пигментов. Подобные изменения отмечены и в работе M. Yousefzadeh и P. Ehsanzadeh (2017), где при засухе наблюдалось снижение содержания хлорофиллов и увеличение доли каротиноидов как защитной реакции фотосинтетического аппарата.

В условиях переувлажнения аналогичное снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов у генотипов, чувствительных к водному затоплению (waterlogging), было показано T. I. Anee et al. (2019), что свидетельствует о высокой уязвимости фотосинтетического аппарата растений к анаэробным условиям. Примечательно, что в отдельных экспериментах засоление приводило к увеличению содержания хлорофилла, как показано у генотипа AS15 (Dangue et al., 2022), что может быть связано с адаптацией через ионную детоксикацию и фотозащиту.

Установленные нормативные диапазоны содержания  $Chl\ a$  (1,0–1,3 мг/г),  $Chl\ b$  (0,4–0,8 мг/г) и каротиноидов (0,2–0,3 мг/г) могут служить ориентирами для экспресс-диагностики состояния посевов кунжута. Существенное снижение  $Chl\ a$  или резкое уменьшение индекса  $Chl\ a/b$  на ранних этапах онтогенеза свидетельствует о действии стрессовых факторов (засуха, переувлажнение, дефицит азота). Высокие значения  $Car/Chl\ (a+b)$  на фазе цветения отражают эффективную фотозащиту и коррелируют с продуктивностью. Генотипы, сохраняющие высокий уровень пигментов и благоприятные соотношения на поздних стадиях (K66, K161, K1396), представляют интерес как доноры признаков устойчивости для селекции; образцы с низким содержанием пигментов (K98, K9549) целесообразно использовать лишь как носители отдельных хозяйственно ценных признаков. Полученные результаты позволяют рекомендовать генотипы с высоким содержанием хлорофиллов как потенциально устойчивые, что согласуется с выводами о селекционной ценности таких форм в ряде современных исследований (Habibullah et al., 2021; Pandey et al., 2021; Bagheri et al., 2023).

## Заключение

В условиях аридного климата Узбекистана суммарный хлорофилл  $Chl\ (a+b)$  у исследованных генотипов кунжута варьировал в пределах 1,5–2,0 мг/г, при этом содержание  $Chl\ a$  оставалось относительно постоянным (1,06–1,18 мг/г), а содержание  $Chl\ b$  снижалось к фазе цветения и увеличивалось к фазе формирования коробочек. Индекс  $Chl\ a/b$  изменялся от 1,6 до 2,4: минимальные значения отмечены на фазе плодообразования, максимальные – на фазе цветения. Отношение  $Car/Chl\ (a+b)$  достигало 0,195 в фазе цветения и снижалось до 0,108 к фазе коробочек, отражая перестройку фотозащитной системы. Наиболее перспективными по фотосинтетическому и фотозащитному потенциалу оказались генотипы K66, K161 и K1396; они поддерживали высокие уровни хлорофиллов и каротиноидов и умеренные значения индекса  $Chl\ a/b$ . Генотип K98, напротив, характеризовался минимальными уровнями пигментов и, вероятно, низкой продуктивностью. Вариабельность содержания пигментов обусловлена как фазой онтогенеза, так и генетической принадлежностью. Полученные данные и нормативные диапазоны могут использоваться для диагностики стрессов, мониторинга состояния посевов и отбора исходного материала в селекционных программах, направленных на повышение стрессоустойчивости и урожайности кунжута.

## References / Литературы

- Anee T.I., Nahar K., Rahman A., Al Mahmud J., Bhuiyan T.F., Ul Alam M. et al. Oxidative damage and antioxidant defense in *Sesamum indicum* after different waterlogging durations. *Plants (Basel)*. 2019;8(7):196. DOI: 10.3390/plants8070196
- Arnon D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 1949;24(1):1-15. DOI: 10.1104/pp.24.1.1
- Bagheri M.A., Kazemitabar S.K., Dehestani A., Khoshgoftarmansh A.H., Afshari R.T. Sesame (*Sesamum indicum* L.) response to drought stress: susceptible and tolerant genotypes exhibit different physiological, biochemical, and molecular response patterns. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2023;29(9):1353-1369. DOI: 10.1007/s12298-023-01372-y
- Berhe M., You J., Dossa K., Li D., Zhou R., Zhang Y. et al. Examining chlorophyll extraction methods in sesame genotypes: uncovering leaf coloration effects and anatomy variations. *Plants (Basel)*. 2024;13(12):1589. DOI: 10.3390/plants13121589
- Chugh V., Mishra V., Sharma V., Kumar M., Ghorbel M., Kumar H. et al. Deciphering physio-biochemical basis of tolerance mechanism for sesame genotypes under waterlogging stress at early vegetative stage. *Plants (Basel)*. 2024;13(4):501. DOI: 10.3390/plants13040501
- Dangue A., Ali O.Y., Diaw D., Ndiaye M.A.F., Diop T.A. Physiology and adaptation strategy of sesame (*Sesamum indicum* L.) to salinity. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2022;11(2):29-36. DOI: 10.30574/gscarr.2022.11.2.0117
- Habibullah M., Sarkar S., Islam M.M., Ahmed K.U., Rahman M.Z., Awad M.F. et al. Assessing the response of diverse sesame genotypes to waterlogging durations at different plant growth stages. *Plants (Basel)*. 2021;10(11):2294. DOI: 10.3390/plants10112294
- Hassanzadeh M., Ebadi A., Panahyan-e-Kivi M., Eshghi A.G., Jamaati-e-Somarin S., Saeidi M. et al. Evaluation of drought stress on relative water content and chlorophyll content of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes at early flowering stage. *Research Journal of Environmental Sciences*. 2009;3(3):345-350. DOI: 10.3923/rjes.2009.345.350
- Kodirova S., Amanov B., Muminov K.H., Abdiyev F., Buronov A., Tursunova N. et al. Physiological and biochemical parameters of the exotic species of grass pea (*Lathyrus sativus* L.). *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2024;56(4):1513-1523. DOI: 10.54910/sabrao2024.56.4.17
- Kouighat M., Nabloussi A., Kettani R., Fakhour S., El Feh-tali M., Hamdani A. Drought-tolerant sesame mutant lines assessed by physiological traits and stress indices under water deficit conditions. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;14:100842. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100842
- Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987;148:350-382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
- 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*. 2021;60(1):3-9. DOI: 10.32615/ps.2021.041
- Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 1983;11(5):591-592. DOI: 10.1042/bst0110591
- Pandey B.B., Ratnakumar P., Kiran B.U., Dudhe M.Y., Lakshmi G.S., Ramesh K. et al. Identifying traits associated with terminal drought tolerance in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:739896. DOI: 10.3389/fpls.2021.739896
- PFAP (Plants For A Future). *Sesamum indicum* L.: [website]. Available from: <https://pfaf.org/user/Plant.aspx?LatinName=Sesamum+indicum> [accessed Sep. 12, 2024].
- Yousefzadeh M., Ehsanzadeh P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. *Photosynthetica*. 2017;55(4):611-622. DOI: 10.1007/s11099-017-0673-8

## Информация об авторах

**Ербол Бакирович Пирназаров**, базовый докторант, преподаватель, Чирчикский государственный педагогический университет, 111720 Узбекистан, Чирчик, ул. Амира Темура, 104, e.pirnazarov@cspu.uz, <https://orcid.org/0009-0003-8076-6945>

**Бахтиёр Хушбакович Аманов**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой, Чирчикский государственный педагогический университет, 111720 Узбекистан, Чирчик, ул. Амира Темура, 104, amanov.81@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2215-0515>

## Information about the authors

**Erbol B. Pirnazarov**, Basic Doctoral Student, Lecturer, Chirchik State Pedagogical University, 104 Amir Temur St., Chirchik 111720, Uzbekistan, e.pirnazarov@cspu.uz, <https://orcid.org/0009-0003-8076-6945>

**Bakhtiyar Kh. Amanov**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of a Department, Chirchik State Pedagogical University, 104 Amir Temur St., Chirchik 111720, Uzbekistan, amanov.81@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2215-0515>

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

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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; одобрена после рецензирования 26.03.2026; принята к публикации 24.04.2026. The article was submitted on 27.01.2026; approved after reviewing on 26.03.2026; accepted for publication on 24.04.2026.