

## Видовые различия в содержании фотосинтетических пигментов у растений аридных территорий юга России

Е. В. Калмыкова<sup>1</sup>✉, К. А. Мельник<sup>1</sup>, П. А. Кузьмин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия

✉E-mail: kalmukova-ev@vfan.ru

**Аннотация.** Цель исследования – изучение особенностей приспособительных реакций пигментной системы растений в стресс-условиях Астраханской области. В роли диагностики состояния растений используют физиолого-биохимические показатели, которые отражают способность организма приспосабливаться к изменяющимся условиям среды. **Методы.** В исследованиях использовались методы наблюдения, описания объектов исследования, спектрофотометрического определения количественного содержания фотосинтетических пигментов, методы статистического анализа. **Результаты.** Выявлены особенности в количественном содержании хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов, а также соотношения значений хлорофилла *a* и *b*, суммы хлорофиллов *a + b* к содержанию каротиноидов. Проведен расчет линейного коэффициента корреляции Пирсона между содержанием хлорофиллов и каротиноидов в листьях и средней среднесуточной температурой и продолжительностью светового дня. Установлено, что максимальное содержание хлорофилла *a* наблюдалось у тамарикса, минимальное количество отмечено у саксаула. Наибольшее количество хлорофилла *b* отмечено в листьях терескена, а наименьшее – у саксаула. Наибольшее количество каротиноидов наблюдалось у тамарикса (0,59), немного меньше было отмечено у терескена – 0,54, минимальное его содержание у саксаула – 0,12 и джугуна – 0,29 мг/г сухой массы. У исследуемых видов соотношение хлорофиллов находилось в пределах от 2,9 до 6,5, максимальное у саксаула, минимальное у джугуна. Потенциал фотохимической активности снижается в ряду саксаул > тамарикс > терескен > джугун. Выявлено, что максимальное значение по соотношению между количеством хлорофиллов и каротиноидов у саксаула (2,9). **Научная новизна.** Получены новые знания по устойчивости древесных растений к неблагоприятным внешним факторам в стресс-условиях Астраханской области по соотношению физиолого-биохимических показателей – между хлорофиллом, каротиноидами в листьях и средней среднесуточной температурой и продолжительностью светового дня, что позволило оценить потенциал растений и составить следующий ряд исследуемых видов: саксаул > джугун > терескен > тамарикс.

**Ключевые слова:** хлорофилл, каротиноиды, *Calligonum aphyllum* L., *Haloxylon aphyllum*, *Tamarix ramosissima*, *Eurotia ceratodes*, адаптивный потенциал, фотохимическая активность.

**Для цитирования:** Калмыкова Е. В., Мельник К. А., Кузьмин П. А. Видовые различия в содержании фотосинтетических пигментов у растений аридных территорий юга России // Аграрный вестник Урала. 2023. № 03 (232). С. 32–42. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-232-03-32-42.

**Дата поступления статьи:** 22.12.2022, **дата рецензирования:** 20.01.2023, **дата принятия:** 02.02.2023.

### Постановка проблемы (Introduction)

Аридные условия произрастания растений в сухостепной, полупустынной и пустынной зонах характеризуется комплексом неблагоприятных факторов [1; 2]. Действие абиотического стресса, такого как высокие температуры, может привести к активации защитных и приспособительных реакций. Для диагностики текущего жизненного состояния растений целесообразно применять методы биоиндикации, основанные на показателях, характеризующих протекание процессов метаболизма. К

их числу относится определение содержания фотосинтетических пигментов, так как их количество определяет функциональное состояние растения и изменения, происходящие при росте, развитии и стрессовых нагрузках [3].

Компоненты фотосинтетического аппарата имеют ключевое значение в жизни растения в стрессовых условиях роста, развития, размножения, перенесения неблагоприятных условий и обеспечения органическим веществом живых организмов аридной экосистемы [4; 5].

Количественное содержание фотосинтетических пигментов напрямую влияет на биологическую продуктивность. Количественное содержание пигментов активно реагирует на изменения внешних условий. Многими авторами отмечается, что содержание фотосинтезирующих пигментов является видовым признаком и источником информации состояния растения. Хлорофиллы и каротиноиды играют ключевую роль в фундаментальном биологическом процессе – фотосинтезе [6; 7].

Пластичность и адаптивность пигментного аппарата – существенный фактор устойчивости растений, которые выработали в процессе эволюции несколько линий защиты от повреждения ФСА и нарушения баланса между световыми реакциями и фотосинтетическим метаболизмом углерода [4]. В растениях постоянно происходит распад и синтез молекул хлорофиллов и каротиноидов, что делает возможной акклиматизацию пигментного комплекса к текущим условиям произрастания [7].

Таким образом, содержание хлорофилла в эколого-физиологических исследованиях используется как один из показателей фотосинтетической способности листовой пластины, то есть пигменты выполняют следующие функции: фотосинтетическая, структурная, фотозащитная, экологическая, продукционная, функция биологической активности.

Ксеротермический режим климата определяет аридную направленность формирования растительности. Для условий пустыни и полупустыни Астраханской области характерна довольно скудная растительность. К наиболее применяемым и перспективным в практической деятельности по кормовым и мелиоративным достоинствам являются кустарники и полукустарники родов саксаул, тамарикс, джугун, терескен, чекез, чогон, изень, кейреук, комфоросма, имеющие разную биоэкологию в районе интродукции.

В связи с этим целью исследования являлось изучение особенностей приспособительных реакций

пигментной системы растений в стресс-условиях Астраханской области.

#### Методология и методы исследования (Methods)

Харабалинский район Астраханской области из-за преобладания сильных ветров восточного и юго-восточного направления подвержен развитию дефляции и физическому выветриванию, что, в конечном счете, образует пустынные геосистемы (таблица 1).

Самая низкая температура выпадает на январь ( $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), снежный покров не превышает  $0,15\text{ м}$ . Больше всего солнечных дней в районе исследований отмечается во второй декаде августа. Осадки выпадают в малом количестве до  $250\text{ мм}$ . Среднегодовая норма осадков –  $217\text{ мм}$ . Грунтовые воды залегают на глубине от  $5$  до  $25\text{ м}$ . Максимальная температура в летнее время составляет  $+42\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Испаряемость очень высокая ( $950-1100$ ) мм и превышает атмосферные осадки в  $5-7$  раз. Среднее число дней с суховеями по данным ГМС г. Харабали равно  $113$  с вероятностью  $100\%$ . Малая гумусированность и небольшая мощность гумусовых горизонтов является характерной особенностью бурых полупустынных почв.

С целью определения степени выраженности засухи в районе исследования проводили расчет индекса аридности де Мортон по формуле

$$I = P / (T + 10), \quad (1)$$

где  $P$  – среднегодовое количество осадков;

$T$  – среднегодовая температура.

Минимальное значение индекса аридности года и указывает на сухой с недостаточным увлажнением, континентальный климат территории региона исследований.

В 2021/2022 г. за осенне-зимне-весенний период выпало всего  $198\text{ мм}$  осадков, что послужило хорошей влагозарядкой почвы и способствовало оптимальному росту пастбищных трав, за теплый период (апрель – сентябрь) выпало  $97,2\text{ мм}$  осадков.

Таблица 1  
Метеорологические условия проведения исследований

Параметры Месяц	2021 год			2022 год									
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	за год
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	8,6	3,6	-0,2	-1,9	1,5	1,4	13,4	15,7	22,9	25,6	30,7	18,2	11,6
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ (многолетняя)	8,8	0,9	-6,1	-8,7	-7,6	-0,9	9,3	17,6	22,3	25	23,6	16,5	8,5
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ (максимальная)	22,8	16,2	10,6	10,1	14,4	20,1	28,5	32,8	34,7	36,8	39,9	37,5	39,9
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ (минимальная)	-4,5	-8,5	-15,5	-15,2	-7,4	-0,5	1,9	6,4	13,2	12,4	14,7	4,3	-15,5
Осадки, мм (многолетние)	20	20	21	17	15	22	15	18	23	22	17	17	227
Осадки, мм (за 2021–2022 гг.)	1,0	29,5	33,4	34,7	15,4	41,7	10,8	31,5	7	30,7	2	15,2	252,9
Относительная влажность воздуха, % (многолетняя)	70	80	85	84	83	78	58	52	49	50	52	53	66
Относительная влажность воздуха, % (средняя)	52	76	87	87	82	72	58	44	40	56	30	61	62
Относительная влажность воздуха, % (минимальная)	14	26	49	51	30	23	21	16	13	12	9	15	9
Индекс аридности													11,7

Table 1  
Meteorological conditions for conducting research

Parameters	2021			2022									
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	in a year
Air temperature, °C	8.6	3.6	-0.2	-1.9	1.5	1.4	13.4	15.7	22.9	25.6	30.7	18.2	11.6
Air temperature, °C (long-term)	8.8	0.9	-6.1	-8.7	-7.6	-0.9	9.3	17.6	22.3	25	23.6	16.5	8.5
Air temperature, °C (maximum)	22.8	16.2	10.6	10.1	14.4	20.1	28.5	32.8	34.7	36.8	39.9	37.5	39.9
Air temperature, °C (minimum)	-4.5	-8.5	-15.5	-15.2	-7.4	-0.5	1.9	6.4	13.2	12.4	14.7	4.3	-15.5
Precipitation, mm (perennial)	20	20	21	17	15	22	15	18	23	22	17	17	227
Precipitation, mm (for 2021–2022)	1.0	29.5	33.4	34.7	15.4	41.7	10.8	31.5	7	30.7	2	15.2	252.9
Relative air humidity, % (long-term)	70	80	85	84	83	78	58	52	49	50	52	53	66
Relative humidity, % (average)	52	76	87	87	82	72	58	44	40	56	30	61	62
Relative humidity, % (minimum)	14	26	49	51	30	23	21	16	13	12	9	15	9
Aridity index													11.7

Осадки теплого периода составили 38,4 % от суммы за год. Однако распределение атмосферных осадков теплого периода по летним месяцам, как правило, происходило очень неравномерно. Август 2022 г. оказался засушливым, выпало 2,0 мм осадков, что составляло 11,7 % от среднееголетних данных. Эти условия влияли как на ботанический состав растительных сообществ, так и на режим вегетации растений: начало, конец и длительность.

В целом по температурному режиму теплый период оказался немного теплее среднееголетних показателей (на 2,5–3,1 °C). Дефицит почвенной влаги осложнялся также и большим количеством дней с относительной влажностью воздуха ниже 30 % (с мая по август – 55 суток) при высокой испаряемости.

Объекты исследования – *Calligonum aphyllum* L., *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Pjijn, *Eurotia ceratodes* (L.) С.А.М., *Tamarix ramosissima* Ledeb.

Джугун безлистный (*Calligonum aphyllum* L.) может иметь высоту до 2,0 м. Ветвистый кустарник с обоеполовыми цветками, псаммофит. Ареал распространения: Прикаспийская низменность, Кавказ, Казахстан, Средняя Азия. Имеет ростовые, генеративные и ассимилирующие побеги. Ассимиляционные побеги растут одиночно или пучками в узловых утолщениях, в период засухи значительная часть их сбрасывается. Содержание протеина в фазе цветения колеблется от 11 до 13 %. На открытых песках представляет собой мощную корневую систему без использования грунтовых вод. *C. aphyllum* способен произрастать в диапазоне солевого режима почвогрунта и на подвижных песках. *C. Aphyllum* используется как пескоукрепляющая порода при создании лесопастбищ. Обладает высокой жизнеспособностью (более 60 лет) [8].

Саксаул безлистный (*Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Pjijn) – засухо- и солеустойчивый кустар-

ник или небольшое дерево, в особо благоприятных условиях достигает 12 м в высоту. Данный вид экономно расходует влагу на транспирацию, произрастает как на песчаных, так и на глинистых и щебнистых почвах разной степени засоления. Корневая система глубоко проникает в почву до 16 м. Саксаул черный формирует биосреду обитания в создаваемых сообществах, что связано с затенением, изменением микроклимата, особенно кронами деревьев. Его средообразующую способность широко используют в пустынных районах. При создании защитных насаждений в полупустынных и пустынных зонах может быть использован для выращивания пастбищезащитных полос и затишков на деструктивных областях (подах) очагов дефляции и на мелкобарханных песках [9; 10].

Терескен серый (*Eurotia ceratodes* (L.) С.А.М.) по жизненной форме – полукустарник, устойчивый к воздушной и почвенной засухам, толерантный к солевому стрессу. Терескен серый хорошо растет в посевах, что характеризует его как одно из перспективных растений для создания культурных пастбищ, дающее высококачественный корм во все периоды хозяйственного использования. В сочетании с другими видами широко используется при создании мелиоративно-кормовых насаждений на открытых песках и подах с плотными засоленными почвами [11].

Тамарикс (гребенщик) ветвистый (*Tamarix ramosissima* Ledeb.) – один из лучших галофитов, который может произрастать на средне- и сильнозасоленных почвах. Светолюбив, жаростоек, засухоустойчив и способен произрастать за счет влаги глубоколежащих грунтовых вод. Обладает хорошими адаптационными возможностями, имеет специальные железы-гидатоды, с помощью которых освобождается от избытка солей. Высокое осмотическое давление клеточного сока в тканях дает воз-

возможность поступления влаги из засоленной почвы. Используется при создании пастбищезащитных лесных полос на засоленных почвах и солонцах, малопродуктивных песчаных землях и в озеленении населенных пунктов. *T. ramosissima* широко распространен в Нижнем Поволжье [12].

Астраханская область обладает широким разнообразием экологических условий, которые согласуются с биологическими требованиями вышеуказанных видов растений и могут преодолевать высокую солнечную инсоляцию, температуру, дефицит влаги, засоленность почв (рис. 1).

Содержание пигментов в листьях определяли спектрофотометрическим методом. Пробоподготовка образцов осуществлялась с использованием ацетона и этанола. Для анализов использовали метод средней пробы. Каждое измерение проводили в трех биологических повторностях.

Навеску растительного сырья 0,2 г растирали в ступке до однородной массы. Затем добавляли последовательно кварцевый песок и 0,1 г кальция карбоната для нейтрализации органических кислот, так как каротиноиды неустойчивы в кислой среде. Потом вносили 1 мл диметилформамида для устойчивости пигментов и 2 г натрия сульфата безводного.

Экстракцию каротиноидов проводили ацетоном (40 мл – 1 раз и далее по 10 мл – 2 раза), после чего продолжали экстрагировать 96-процентным этанолом (по 5 мл – 3 раза) для извлечения ликопина.

Далее экстрагировали ацетоном до обесцвечивания. Затем проводили измерение объема объединенного извлечения (рис. 2).

Концентрацию пигментов рассчитывали для хлорофиллов **a** и **b** при длинах волн 662 и 644 нм, для каротиноидов – при 440,5 нм на спектрофотометре ПЭ-5400УФ. Расчет концентрации пигментов (мг/дм<sup>3</sup>) проводили по формулам:

$$C_a = 9,784 \times D662 - 0,99 \times D644, \quad (2)$$

$$C_b = 21,426 \times D644 - 4,65 \times D664, \quad (3)$$

$$C_{кар.} = 4,695 \times D440,5 - 0,268 \times (5,134 \times D662 - 20,436 \times D644), \quad (4)$$

где  $C_a$  – концентрация хлорофилла *a* (мг/дм<sup>3</sup>),

$C_b$  – концентрация хлорофилла *b* (мг/дм<sup>3</sup>),

$C_{кар.}$  – концентрация каротиноидов, мг/дм<sup>3</sup>,

$D$  – оптическая плотность извлечения.

Содержание пигментов (мг/г) определяли по формуле 4:

$$X = C \times V_1 \times V_3 / M \times V_2 \times 1000, \quad (5)$$

где  $C$  – концентрация пигмента, мг/дм<sup>3</sup>;

$V_1$  – объем исходной ацетоновой извлечения, мл;

$V_2$  – объем исходного извлечения, взятой для разбавления, мл;

$V_3$  – объем разбавленного извлечения, мл;

$M$  – масса абсолютно сухого сырья, г.

Для оценки соотношения количеств ССК и ФС I и ФС II хлоропластов использовали отношение  $X_{a}/X_{b}$ , а при изучении особенностей строения пигментного аппарата – отношение суммарного содержания хлорофиллов ( $X_{a+b}$ ) к каротиноидам ( $X_{a+b}/Кар$ ).

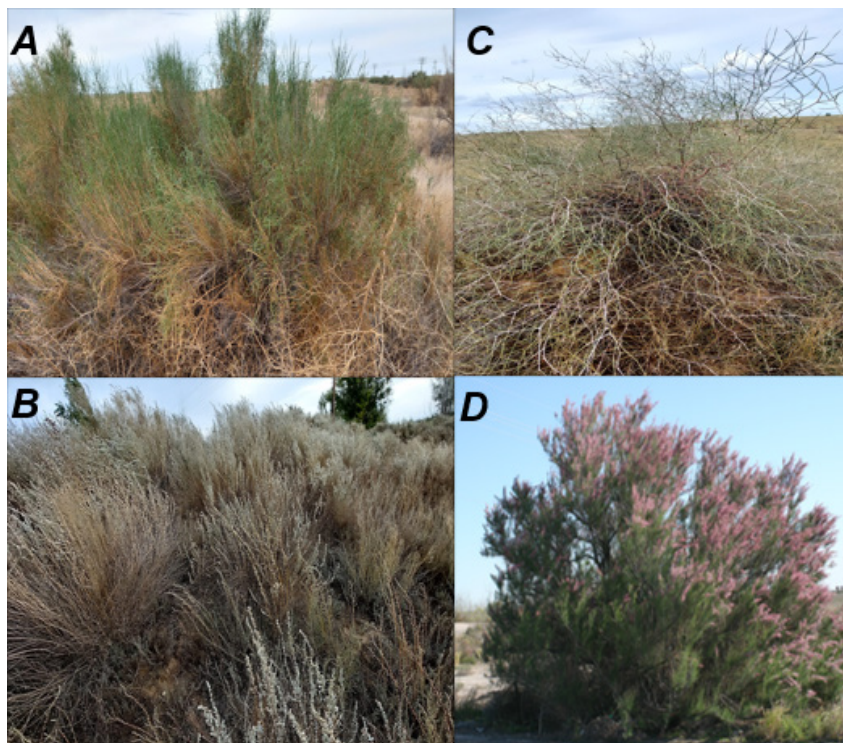


Рис. 1. Внешний вид *Haloxylon aphyllum* (A), *Eurotia ceratodes* (B), *Calligonum aphyllum* L. (C), *Tamarix ramosissima* Ledeb. (D) в Харабалинском районе Астраханской области

Fig. 1. Appearance of *Haloxylon aphyllum* (A), *Eurotia ceratoides* (B), *Calligonum aphyllum* L. (C), *Tamarix ramosissima* Ledeb. (D) in Kharabalinski district of Astrakhan region

Математическую обработку результатов измерений проводили с применением статистического пакета Statistica 6.0. Для интерпретации полученных данных использовали метод описательной статистики. По формуле Линейного коэффициента корреляции Пирсона сравнивались и анализировались результаты взаимосвязи между признаками (при  $P < 0,05$ ). Для оценки тесноты, или силы корреляционной связи, использовали следующие критерии: значения  $r_{xy} < 0,3$  свидетельствуют о слабой связи,  $r_{xy}$  от 0,3 до 0,7 – о связи средней тесноты,  $r_{xy} > 0,7$  – о сильной связи.

### Результаты (Results)

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях исследуемых растений и их соотношения представлены на рис. 3 и 4. Содержание хлорофилла *a* в растениях отмечалось в пределах от 0,31 до 0,69 мг/г сухой массы. Максимальное содержание хлорофилла *a* наблюдалось у тамарикса, минимальное – у саксаула. Содержание хлорофилла *a* в листьях терескена было на уровне 0,64 мг/г сухой массы, что по содержанию близко к тамариксу.

Хлорофилл *b* является одним из вспомогательных пигментов растений, основным регулятором процессов биосинтеза и деградации светособирающих антенных комплексов. Количественное содержание его влияет на скорость роста и уменьшения размера листьев и биомассы растений. Установлено, что низкое количество хлорофилла *b* вызывает задержку цветения и ускоряет процессы старения растения. Наибольшее количество хлорофилла *b* отмечено в листьях терескена и составляло 0,22, а наименьшее – у саксаула (0,05 мг/г сухой массы).

В результате исследований было отмечено, что содержание количества хлорофилла *a* превосходило полученные показатели хлорофилла *b* у всех изучаемых видов, что говорит об их высокой светлюбивости.

Наибольшее количество каротиноидов наблюдалось у тамарикса (0,59 мг/г сухой массы), немного меньше было отмечено у терескена (0,54), минимальное его содержание у саксаула (0,12) и джужгуна (0,29), что указывает на усиление антиоксидантной защиты растений в условиях термического стресса.

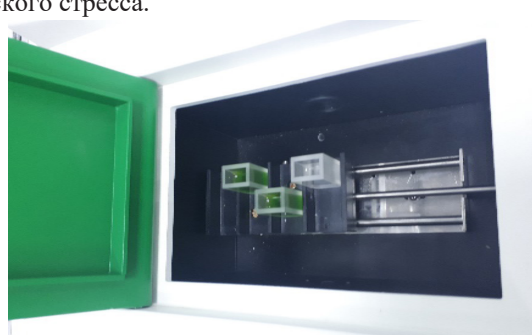
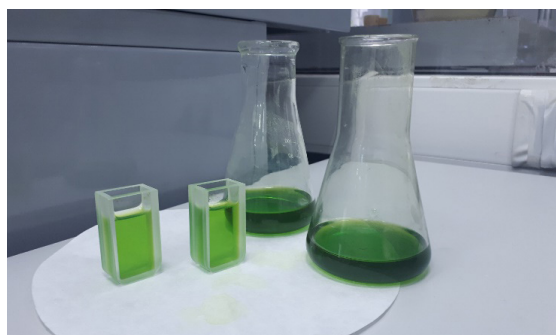


Рис. 2. Проведение спектрофотометрического анализа пигментных экстрактов в лабораторных условиях, ФНЦ агроэкологии РАН (на примере *Haloxylon aphyllum*)

Fig. 2. Carrying out spectrophotometric analysis of pigment extracts in laboratory conditions, Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences (using the example of *Haloxylon aphyllum*)

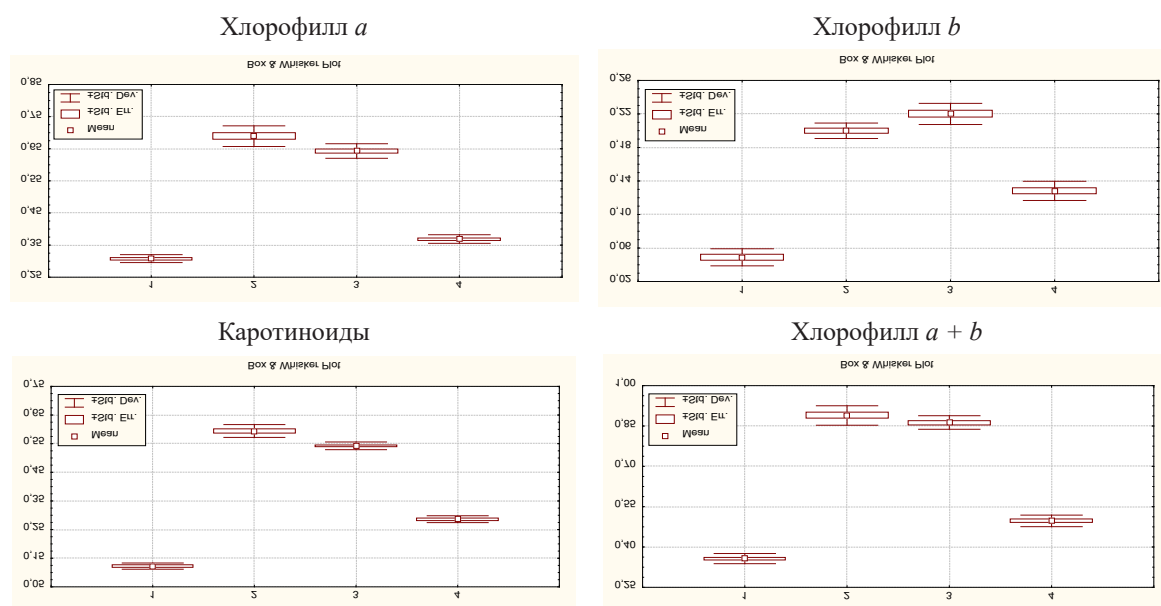


Рис. 3. Содержание фотосинтетических пигментов в листья растений, мг/г сухой массы: 1 – саксаул безлистный, 2 – тамарикс (гребенщик) ветвистый, 3 – терескен серый, 4 – джужгун безлистный

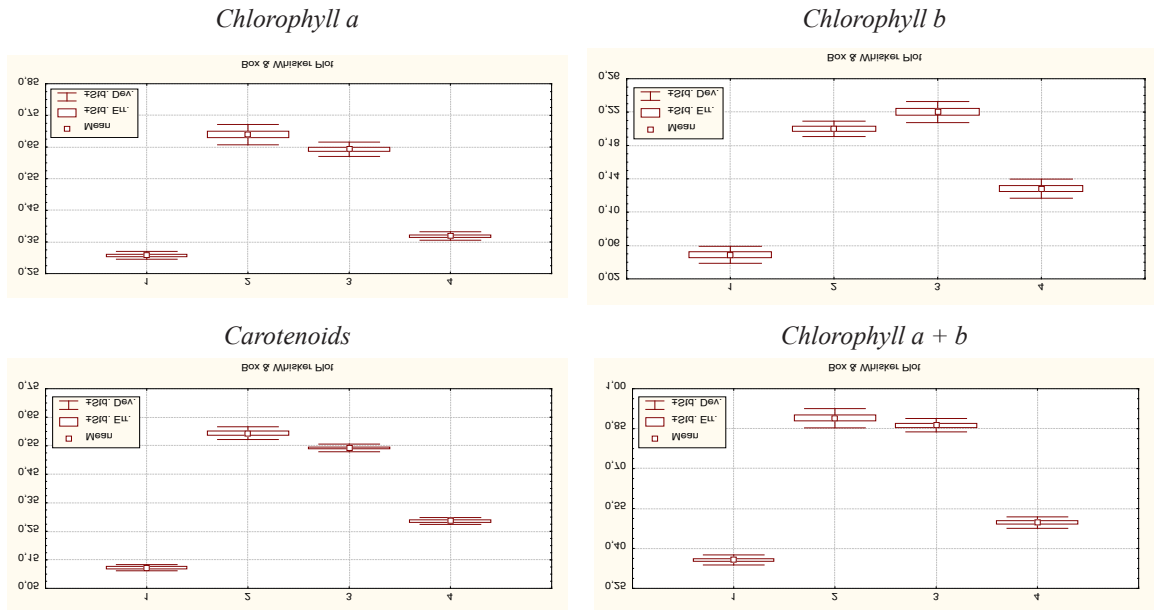


Fig. 3. The content of photosynthetic pigments in plant leaves, mg/g of dry masses: 1 – *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin, 2 – *Tamarix ramosissima* Ledeb., 3 – *Eurotia ceratodes* (L.) C.A.M., 4 – *Calligonum aphyllum* L.

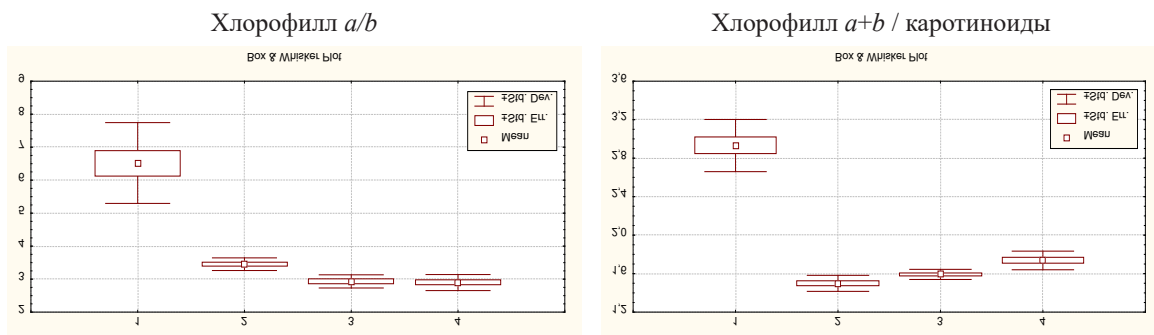


Рис. 4. Отношение хлорофиллов *a* и *b* и суммы хлорофиллов к каротиноидам: 1 – саксаул безлистный, 2 – тамарикс (гребенщик) ветвистый, 3 – терескен серый, 4 – джужгун безлистный

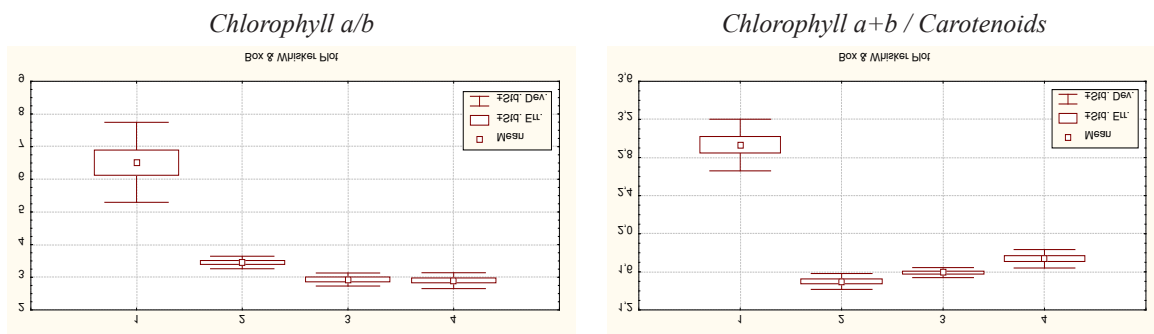


Fig. 4. Ratio of chlorophylls *a/b* and the sum of chlorophylls to carotenoids: 1 – *Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin, 2 – *Tamarix ramosissima* Ledeb., 3 – *Eurotia ceratodes* (L.) C.A.M., 4 – *Calligonum aphyllum* L.

Таким образом, полученные данные указывают на повышенную стрессоустойчивость изучаемых растений за счет отмеченных концентраций каротиноидов, которые осуществляют защитную функцию молекулы хлорофилла и других органических веществ от разрушения на свету в процессе фотоокисления от окисления.

Соотношение между хлорофиллами рассматривается авторами как потенциальная фотохимическая активность (рис. 4).

У исследуемых видов соотношение хлорофиллов находилось в пределах от 2,9 до 6,5, максимальное – у саксаула, минимальное – у джужгуна. В связи с этим потенциал фотохимической активности снижается в ряду саксаул > тамарикс > терескен > джужгун.

В результате исследования нами было установлено, что максимальное значение по соотношению между количеством хлорофиллов и каротиноидов у саксаула (2,9). По данному показателю можно составить следующий ряд исследуемых видов по их устойчивости к неблагоприятным внешним факторам: саксаул > джугун > терескен > тамарикс.

Свет играет особенно важную роль в жизнедеятельности растений и занимает центральное место в регуляции фотосинтеза. Именно энергия света является движущей силой фотосинтеза и запасается в продуктах его реакций. Свет обусловил появление и развитие царства растений, так как используется растительными организмами в процессе питания как источник энергии. Растения в ходе длительной эволюции максимально приспособились для поглощения света и его использования.

Соотношение хлорофиллов  $a/b$  при повышении интенсивности света увеличивается, а при понижении уменьшается. Эти сдвиги отражают адаптационные возможности пигментной системы при меняющихся световых условиях и дают возможность полагать, что в условиях различной освещенности образование отдельных пигментов идет с разной скоростью.

Нами был проведен расчет линейного коэффициента корреляции Пирсона между уровнями хлорофиллов и каротиноидов в листьях и средней среднесуточной температурой и продолжительностью светового дня (таблица 2). Фотосинтетическое использование солнечной энергии в экосистеме является одним из определяющих факторов формирования биологической и хозяйственной урожайности растений.

Изменение освещенности оказывало влияние на пигментный фонд изучаемых объектов. Результаты анализа показали сильную прямую корреляцию между содержанием хлорофилла  $a$  от 0,85 до 0,96, хлорофилла  $b$  – от 0,70 до 0,94, каротиноидов – от 0,94 до 0,97 и уровнем среднесуточной температуры воздуха, за исключением терескена, у которого отмечалась средняя прямая корреляция 0,67 между содержанием каротиноидов и среднесуточной температурой. В целом следует отметить сильную связь для фотосинтетических пигментов, поскольку они считаются максимально отзывчивыми на абиотические факторы среды обитания.

Продолжительность светового дня является отражением сезонного цикла. Содержание фотосинтетических пигментов в исследуемых растениях обратно коррелирует с продолжительностью светового дня.

Выявлена сильная обратная корреляция между содержанием хлорофилла  $a$  от  $-0,91$  до  $-0,98$ , хлорофилла  $b$  от  $-0,71$  до  $-0,99$  каротиноидов от  $-0,84$  до  $-0,98$  и продолжительностью светового дня.

#### **Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)**

Район исследований характеризуется сухим и жарким летом, недостатком осадков. Высокие тем-

пературы атмосферного воздуха, недостаток влаги, высокий уровень инсоляции оказывают негативное влияние на пигментный аппарат фотосинтетической системы растений. Он в первую очередь реагирует на негативные факторы среды обитания. У растений, произрастающих в условиях аридного стресса, выработались разнообразные механизмы защиты фотосинтетической системы [1; 3].

Хлорофилл и каротиноиды являются фоторецепторами клетки, отражающими степень адаптации растения к экологическим факторам окружающей среды [13–18]. Каротиноиды представляют собой большую группу оранжевых, желтых и красных пигментов, которые в разных концентрациях присутствуют у всех фотосинтезирующих организмов. Они тушат синглетное и триплетное состояние хлорофилла. Принимая избыток энергии на себя, каротиноиды дезактивируют ее в виде тепловой энергии. Выполняют функцию нефотохимического тушения флуоресценции, антиоксидантную функцию, осуществляя тушение активных форм кислорода. Каротиноиды способны поглощать избыточное количество синего и ближнего ультрафиолетового света, оказывая ингибирующее действие на активность фотосинтетического аппарата растений. Кроме этого, каротиноиды защищают мембранные липиды от фотодеструкции [4; 7].

Следующей важной характеристикой пигментного комплекса является соотношение между количеством хлорофиллов и каротиноидов. Оно зависит от особенностей вида растения и экологических условий произрастания, в том числе от световых условий произрастания. Данный показатель можно использовать для оценки устойчивости вида к внешним факторам среды, в том числе к засухе и высоким температурам атмосферного воздуха, а также его экологической пластичности. Более высокие значения данного показателя свидетельствуют о лучшем физиологическом состоянии [4; 7; 17; 18].

В исследованиях отмечена специфическая видовая реакция пигментного аппарата фотосинтетической системы у саксаула, тамарикса, терескена и джугуна в аридных условиях произрастания, то есть его структура адаптирована для процесса фотосинтеза в течение всего вегетационного периода.

Считается, что нормальное соотношение хлорофилла  $a$  к хлорофиллу  $b$  составляет 3:1 [3]. Изучено соотношение между различными группами фотосинтетических пигментов: максимальное – у саксаула, минимальное – у джугуна. Установлено, что потенциал фотохимической активности снижается в ряду растений саксаул > тамарикс > терескен > джугун.

По соотношению суммы хлорофиллов к каротиноидам составлен ряд исследуемых видов растений по их устойчивости к неблагоприятным внешним факторам среды обитания: саксаул > джугун > терескен > тамарикс.

Линейный коэффициент корреляции Пирсона между содержанием хлорофиллов и каротиноидов в листьях и средней среднесуточной температурой и продолжительностью светового дня

Пигмент	Вид растения	Линейный коэффициент корреляции Пирсона	
		Среднесуточная температура	Продолжительность светового дня
Хлорофилл <i>a</i>	Саксаул	0,96	-0,98
	Тамарикс	0,90	-0,92
	Терескен	0,85	-0,91
	Джузгун	0,93	-0,97
Хлорофилл <i>b</i>	Саксаул	0,94	-0,97
	Тамарикс	0,93	-0,99
	Терескен	0,70	-0,73
	Джузгун	0,87	-0,71
Каротиноиды	Саксаул	0,97	-0,98
	Тамарикс	0,94	-0,84
	Терескен	0,67	-0,86
	Джузгун	0,97	-0,98

Table 2  
Pearson linear correlation coefficient between the content of chlorophylls and carotenoids in leaves and the average daily temperature and daylight duration

Pigment	Type of plant	Pearson linear correlation coefficient	
		Mean daily temperature	Daylight hours
Chlorophyll <i>a</i>	<i>Haloxylon</i>	0.96	-0.98
	<i>Tamarix</i>	0.90	-0.92
	<i>Eurotia</i>	0.85	-0.91
	<i>Calligonum</i>	0.93	-0.97
Chlorophyll <i>b</i>	<i>Haloxylon</i>	0.94	-0.97
	<i>Tamarix</i>	0.93	-0.99
	<i>Eurotia</i>	0.70	-0.73
	<i>Calligonum</i>	0.87	-0.71
Carotenoids	<i>Haloxylon</i>	0.97	-0.98
	<i>Tamarix</i>	0.94	-0.84
	<i>Eurotia</i>	0.67	-0.86
	<i>Calligonum</i>	0.97	-0.98

Проведенные исследования и обобщение имеющегося опыта лесоразведения расширяют знания в области экологической физиологии и агролесомелиорации, также доказывают возможность выращивания защитных насаждений в устойчивых фитоценозах на почвах полупустыни и пустыни в условиях аридизации климата. Климатические экстремумы региона существенно ограничивают возможности при выборе ассортимента для озеленения и лесомелиорации. Наиболее приспособленным к жестким условиям произрастания является саксаул черный с высоким адаптационным потенциалом, что позволяет рекомендовать его как одну

из перспективных культур для использования при восстановлении пастбищезащитных полос и затишков на деструктивных областях (подах) очагов дефляции и на мелкобарханных песках.

#### Благодарности (Acknowledgements)

Работа выполнена по теме Государственного задания № FNFE-2021-0001 «Научные основы и технологии обогащения дендрофлоры лесомелиоративных комплексов хозяйственно ценными древесными и кустарниковыми растениями в целях предотвращения деградации и опустынивания территорий» (регистрационный номер 121041200197-8).

#### Библиографический список

1. Оконов М. М., Батыров В. А. Современная парадигма экологической устойчивости агроландшафтов и эффективного использования земель Прикаспийской низменности // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2022. № 4. С. 45–50. DOI: 10.32935/2221-7312-2022-54-4-45-50.
2. Рыбашлыкova Л. П. Динамика растительности фитомелиорированного очага дефляции на территории Республики Калмыкия // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 152–158. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-152-158.
3. Кунина В. А., Белоус О. Г. Состояние фотосинтетических пигментов листьев древесных растений в условиях городской среды // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. Т. 6 (72). № 2. С. 108–118. DOI: 10.37279/2413-1725-2020-6-2-108-118.



4. Дымова О. В. Пигментный комплекс растений в условиях таежной зоны европейского Северо-Востока (организация и функционирование): дис. ... д-ра биол. наук. Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. 219 с.
5. Сауткина М. Ю. Особенности содержания фотосинтетических пигментов дуба черешчатого лесных полос каменной степи // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2020. № 1 (60). С. 73–76.
6. Игнатова М. А., Козловский Б. Л., Дмитриев П. П. Сезонная динамика фотосинтетических пигментов у кленов *Acer campestre* L., *A. Negundo* L. и *A. saccharinum* L. в Ростове-на-Дону // Биосфера. 2022. Т. 14. № 2. С. 82–97. DOI: 10.24855/biosfera.v14i2.670.
7. Иванов Л. А., Ронжина Д. А., Юдина П. К. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях степных и лесных растений на уровне вида и сообщества // Физиология растений. 2020. Т. 67. № 3. С. 278–288. DOI: 10.31857/S0015330320030112.
8. Гамидов И. Р., Умаханов М. А., Теймуров С. А. Фитомелиорация Кизлярских пастбищ с использованием джугзуна безлистного (*Calligonum aphyllum*) // Горное сельское хозяйство. 2018. № 2. С. 29–32. DOI: 10.25691/GSH.2018.2.006.
9. Шамсутдинова Э. З., Шамсутдинов Н. З., Ибрагимов И. О. Пастбищезащитные Черносаксауловые полосы в среднеазиатской пустыне: средообразующая и продукционная функции // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 2 (79). С. 43–51.
10. Matsui K., Tetsuhiro W., Mahirap K., Shinya F. Soil properties that determine the mortality and growth of *Haloxydon aphyllum* in the Aral region, Kazakhstan // Arid Land Research and Management. 2019. Vol. 33. No. 1. Pp. 82–97. DOI: 10.1080/15324982.2018.1496187.
11. Ибрагимов К. М., Умаханов М. А., Гамидов И. Р. Сравнительная характеристика аридных кормовых полукустарников – терескена серого (*Ceratoides Eurotia*) и полыни Таврической (*Artemisia taurica*) // Горное сельское хозяйство. 2019. № 4. С. 63–69. DOI: 10.25691/GSH.2019.4.010.
12. Yuferev V. G., Tkachenko N. A Sinelnikova K. P. Spectral Characteristics of Desertified Black-Earth Pastures // Arid Ecosystems. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 54–60. DOI: 10.1134/S2079096122010152.
13. Маслова Т. Г., Марковская Е. Ф., Слемнев Н. Н. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81. № 4. С. 297–310. DOI: 10.31857/S0044459620040065.
14. Огородникова С. Ю., Пестов С. В., Зиновьев В. В., Софронов А. П. Влияние фитопатогенов на содержание пластидных пигментов и интенсивность процессов перекисного окисления липидов в листьях древесных растений // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 84–92. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-084-092.
15. Ghazghazi H., Leila R. Effect of Drought Stress on Physio-biochemical Traits and Secondary Metabolites Production in the Woody Species *Pinus Halepensis* Mill. At a Juvenile Development Stages // Journal of Sustainable Forestry. 2019. Vol. 41. No. 9. Pp. 878–894. DOI: 10.1080/10549811.2022.2048263.
16. Rustioni L., Bianchi D. Drought increases chlorophyll content in stems of *Vitis interspecific hybrids* // Theoretical and Experimental Plant Physiology. 2021. Vol. 33. No. 1. Pp. 69–78. DOI: 10.1007/s40626-021-00195-0.
17. Yuan Y., Ge L., Yang H., Wei Z. Meta-analysis of experimental warming effects on woody plant growth and photosynthesis in forests // Journal of Forestry Research. 2018. Vol. 29. No. 3. Pp. 727–733. DOI: 10.1007/s11676-017-0499-z.
18. Sadowska A., Sitarek P., Stelmakh J., Zajdel K. Plants as Modulators of Melanogenesis: Role of Extracts, Pure Compounds and Patented Compositions in Therapy of Pigmentation Disorders // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23. No. 23. Article number 14787. DOI: 10.3390/ijms232314787.

#### Об авторах:

Елена Владимировна Калмыкова<sup>1</sup>, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией биоэкологии древесных растений, ORCID 0000-0001-8530-9995, AuthorID 774929; +7 960 885-73-75, [kalmukova-ev@vfanc.ru](mailto:kalmukova-ev@vfanc.ru)

Кристина Андреевна Мельник<sup>1</sup>, младший научный сотрудник лаборатории биоэкологии древесных растений, ORCID 0000-0002-7103-6436, AuthorID 1086291; +7 905 433-56-31, [melnik-k@yandex.ru](mailto:melnik-k@yandex.ru)

Петр Анатольевич Кузьмин<sup>1</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории биоэкологии древесных растений, ORCID 0000-0002-1303-765X, AuthorID 680974; +7 917 390-78-27, [kuzmin-p@vfanc.ru](mailto:kuzmin-p@vfanc.ru)

<sup>1</sup> Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Россия

## Species differences in the content of photosynthetic pigments in plants of arid territories of the South of Russia

E. V. Kalmykova<sup>1✉</sup>, K. A. Melnik<sup>1</sup>, P. A. Kuzmin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

✉E-mail: kalmukova-ev@vfanc.ru

**Abstract.** The purpose is to study the features of adaptive reactions of the pigment system of plants in the stress conditions of the Astrakhan region. In the role of diagnosing the state of plants, physiological and biochemical indicators are used, which reflect the body's ability to adapt to changing environmental conditions. **Methods.** In the studies, methods of observation, description of the objects of study, spectrophotometric determination of the quantitative content of photosynthetic pigments, methods of statistical analysis were used. **Results.** Features in the quantitative content of chlorophyll *a* and *b*, carotenoids, as well as the ratio of the values of chlorophyll *a* and *b*, the amount of chlorophylls to carotenoids were revealed. The calculation of the linear Pearson correlation coefficient between the content of chlorophylls and carotenoids in leaves and the average daily temperature and daylight hours was carried out. It was established that the maximum content of chlorophyll *a* was observed in tamarix, the minimum amount was noted in saxaul. The largest amount of chlorophyll *b* was noted in the leaves of teresken, and the smallest in saxaul. The highest amount of carotenoids was observed in tamarix (0.59 mg/g dry weight), a little less was noted in teresken (0.54), its minimum content in saxaul (0.12) and juzgun (0.29). In the studied species, the ratio of chlorophylls ranged from 2.9 to 6.5, the maximum was in saxaul, and the minimum was in juzgun. The potential of photochemical activity decreases in the series saxaul > tamarix > teresken > juzgun. It was revealed that the maximum value for the ratio between the amount of chlorophylls and carotenoids in saxaul (2.9). **Scientific novelty.** New knowledge was obtained on resistance to adverse external factors in the stress conditions of the Astrakhan region in terms of the ratio of physiological and biochemical parameters – between chlorophyll, carotenoids in leaves and the average daily temperature and daylight hours, which made it possible to assess the potential of plants and compile the following series of studied species: saxaul > juzgun > teresken > tamarix.

**Keywords:** chlorophyll, carotenoids, *Calligonum aphyllum*, *Haloxylon aphyllum*, *Tamarix ramosissima*, *Eurotia ceratodes*, adaptive potential, photochemical activity.

**For citation:** Kalmykova E. V., Melnik K. A., Kuzmin P. A. Vidovye razlichiya v sodержanii fotosinteticheskikh pigmentov u rasteniy aridnykh territoriy yuga Rossii [Species differences in the content of photosynthetic pigments in plants of arid territories of the South of Russia] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. No. 03 (232). Pp. 32–42. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-232-03-32-42. (In Russian.)

**Date of paper submission:** 22.12.2022, **date of review:** 20.01.2023, **date of acceptance:** 02.02.2023.

### References

1. Okonov M. M., Batyrov V. A. Sovremennaya paradigma ekologicheskoy ustoychivosti agrolandshaftov i effektivnogo ispol'zovaniya zemel' Prikaspiyskoy nizmennosti [Modern paradigm of ecological sustainability of agricultural landscapes and rational use of lands of the Caspian lowland] // Theoretical and applied problems of agro-industry. 2022. No. 4. Pp. 45–50. DOI: 10.32935/2221-7312-2022-54-4-45-50. (In Russian.)
2. Rybashlykova L. P. Dinamika rastitel'nosti fitomeliorirovannogo ochaga deflyatsii na territorii Respubliki Kalmykiya [Dynamics of vegetation of the phytomeliorated deflation zone on the territory of the Republic of Kalmykia] // Theoretical and applied ecology. 2022. No. 2. Pp. 152–158. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-152-158. (In Russian.)
3. Kunina V. A., Belous O. G. Sostoyanie fotosinteticheskikh pigmentov list'ev drevesnykh rasteniy v usloviyakh gorodskoy sredy [The state of photosynthetic pigments of leaves of woody plants in the urban environment] // Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2020. Vol. 6 (72). No. 2. Pp. 108–118. DOI: 10.37279/2413-1725-2020-6-2-108-118. (In Russian.)
4. Dymova O. V. Pigmentnyy kompleks rasteniy v usloviyakh taezhnoy zony evropeyskogo Severo-Vostoka (organizatsiya i funktsionirovanie): dis. ... d-ra biol. nauk [Pigment complex of plants in the conditions of the taiga zone of the European Northeast (organization and functioning): dissertation ... doctor of biological sciences]. Ufa: Bashkirskiy gosudarstvennyy universitet, 2019. 219 p. (In Russian.)

5. Sautkina M. Yu. Osobennosti sodержaniya fotosinteticheskikh pigmentov duba chereschatogo lesnykh polos kamennykh stepi [Features of the content of photosynthetic pigments of oak petiolate forest strips of the stone steppe] // The bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2020. No. 1 (60). Pp. 73–76. (In Russian.)
6. Ignatova M. A., Kozlovskiy B. L., Dmitriev P. P. Sezonnaya dinamika fotosinteticheskikh pigmentov u klenov *Acer campestre* L., *A. Negundo* L. i *A. saccharinum* L. v Rostove-na-Donu [Seasonal dynamics of photosynthetic pigments in maples of *Acer campestre* L., biology of ash-leaved maple L. and *A. saccharinum* L. in Rostov-on-Don] // Biosfera. 2022. Vol. 14. No. 2. Pp. 82–97. DOI: 10.24855/biosfera.v14i2.670. (In Russian.)
7. Ivanov L. A., Ronzhina D. A., Yudina P. K. Sezonnaya dinamika sodержaniya khlorofillov i karotinoidov v list'yakh stepnykh i lesnykh rasteniy na urovne vida i soobshchestva [Seasonal dynamics of chlorophyll and carotenoid content in leaves of steppe and forest plants at the level of species and community] // Fiziologiya rasteniy. 2020. Vol. 67. No. 3. Pp. 278–288. DOI: 10.31857/S0015330320030112. (In Russian.)
8. Gamidov I. R., Umakhanov M. A., Teymurov S. A. Fitomelioratsiya Kizlyarskikh pastbishch s ispol'zovaniem dzhuzguna bezlistnogo (*Calligonum aphyllum*) [Phytomelioration of Kizlyar pastures using leafless juzgun (*Calligonum aphyllum*)] // Gornoe sel'skoe khozyaystvo. 2018. No. 2. Pp. 29–32. DOI: 10.25691/GSH.2018.2.006. (In Russian.)
9. Shamsutdinova E. Z., Shamsutdinov N. Z., Ibragimov I. O. Pastbishchezashchitnye Chernosaksaulovye polosy v sredneaziatskoy pustyne: sredobrazuyushchaya i produktsionnaya funktsii [Chernosaksaul bands in the Central Asian desert: environment-forming and productive functions] // Arid ecosystems. 2019. Vol. 25. No. 2 (79). Pp. 43–51. (In Russian.)
10. Matsui K., Tetsuhiro W., Mahirap K., Shinya F. Soil properties that determine the mortality and growth of *Haloxylon aphyllum* in the Aral region, Kazakhstan // Arid Land Research and Management. 2019. Vol. 33. No. 1. Pp. 82–97. DOI: 10.1080/15324982.2018.1496187.
11. Ibragimov K. M., Umakhanov M. A., Gamidov I. R. Sravnitel'naya kharakteristika aridnykh kormovykh polukustarnikov – tereskna serogo (*Ceratoides Eurotia*) i polyni Tavricheskoy (*Artemisia taurica*) [Comparative characteristics of arid forage semi-shrubs - gray teresken (*Ceratoides Eurotia*) and Tauric wormwood (*Artemisia taurica*)] // Gornoe sel'skoe khozyaystvo. 2019. No. 4. Pp. 63–69. DOI: 10.25691/GSH.2019.4.010. (In Russian.)
12. Yuferev V. G., Tkachenko N. A. Sinelnikova K. P. Spectral Characteristics of Desertified Black-Earth Pastures // Arid Ecosystems. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 54–60. DOI: 10.1134/S2079096122010152.
13. Maslova T. G., Markovskaya E. F., Slemnev N. N. Funktsii karotinoidov v list'yakh vysshikh rasteniy (obzor) [Functions of carotenoids in leaves of higher plants (review)] // Zhurnal obshchey biologii. 2020. Vol. 81. No. 4. Pp. 297–310. DOI: 10.31857/S0044459620040065. (In Russian.)
14. Ogorodnikova S. Yu., Pestov S. V., Zinov'ev V. V., Sofronov A. P. Vliyanie fitopatogenov na sodержanie plastidnykh pigmentov i intensivnost' protsessov perekisnogo okisleniya lipidov v list'yakh drevesnykh rasteniy [Influence of phytopathogens on the content of plastid pigments and the intensity of lipid peroxidation processes in the leaves of woody plants] // Theoretical and applied ecology. 2022. No. 2. Pp. 84–92. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-084-092. (In Russian.)
15. Ghazghazi H., Leila R. Effect of Drought Stress on Physio-biochemical Traits and Secondary Metabolites Production in the Woody Species *Pinus Halepensis* Mill. At a Juvenile Development Stages // Journal of Sustainable Forestry. 2019. Vol. 41. No. 9. Pp. 878–894. DOI: 10.1080/10549811.2022.2048263.
16. Rustioni L., Bianchi D. Drought increases chlorophyll content in stems of *Vitis* interspecific hybrids // Theoretical and Experimental Plant Physiology. 2021. Vol. 33. No. 1. Pp. 69–78. DOI: 10.1007/s40626-021-00195-0.
17. Yuan Y., Ge L., Yang H., Wei Z. Meta-analysis of experimental warming effects on woody plant growth and photosynthesis in forests // Journal of Forestry Research. 2018. Vol. 29. No. 3. Pp. 727–733. DOI: 10.1007/s11676-017-0499-z.
18. Sadowska A., Sitarek P., Stelmakh J., Zajdel K. Plants as Modulators of Melanogenesis: Role of Extracts, Pure Compounds and Patented Compositions in Therapy of Pigmentation Disorders // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23. No. 23. Article number 14787. DOI: 10.3390/ijms232314787.

#### Authors' information:

Elena V. Kalmykova<sup>1</sup>, doctor of agricultural sciences, chief researcher, head of the laboratory of bioecology of woody plants, ORCID 0000-0001-8530-9995, AuthorID 774929; +7 960 885-73-75, [kalmukova-ev@vfanc.ru](mailto:kalmukova-ev@vfanc.ru)  
 Kristina A. Melnik<sup>1</sup>, junior researcher at the laboratory of bioecology of woody plants, ORCID 0000-0002-7103-6436, AuthorID 1086291; +7 905 433-56-31, [melnik-k@yandex.ru](mailto:melnik-k@yandex.ru)  
 Petr A. Kuzmin<sup>1</sup>, candidate of agricultural sciences, senior researcher at the laboratory of bioecology of woody plants, ORCID 0000-0002-1303-765X, AuthorID 680974; +7 917 390-78-27, [kuzmin-p@vfanc.ru](mailto:kuzmin-p@vfanc.ru)

<sup>1</sup> Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia