

## Влияние биологических регуляторов роста на содержание фотосинтетических пигментов *Campanula alliariifolia*

А. А. Реут<sup>1</sup>✉, И. Н. Аллаярова<sup>1</sup>, А. Р. Биглова<sup>1</sup>, О. В. Ласточкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

<sup>2</sup> Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

✉ E-mail: [cvetok.79@mail.ru](mailto:cvetok.79@mail.ru)

**Аннотация.** Цель – изучение эффективности действия природной сигнальной молекулы салициловой кислоты (СК) и *Bacillus subtilis* (Bs) на содержание фотосинтетических пигментов (ФСП) в листьях колокольчика чесночницелистного (*Campanula alliariifolia* Willd.) и его декоративность. **Методы.** В исследовании использовали спектрофотометрические методы для анализа динамики содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов под воздействием штамма бактерии *Bacillus subtilis*, полученного из пахотного слоя почв Башкортостана в Башкирском научно-исследовательском институте сельского хозяйства УФИЦ РАН (Уфа), и ее комбинации с салициловой кислотой за вегетационный период. **Научная новизна.** Впервые в условиях Башкирского Предуралья изучено влияние салициловой кислоты в композиции с новым штаммом *B. subtilis* на физиологические параметры и декоративность *Campanula alliariifolia*. **Результаты.** Проанализированы содержание и соотношение ФСП в динамике (фазы бутонизации, цветения и плодоношения). Выявлено, что инокуляция *Bacillus subtilis* растений *C. alliariifolia* приводит к увеличению каротиноидов в фазу цветения. В фазу плодоношения максимальное содержание ФСП отмечали в варианте опыта Bs + СК. При двухфакторном дисперсионном анализе показано, что существенное влияние фактора А (фаза вегетации), фактора В (разные варианты опыта) и степень суммарного воздействия двух факторов (А × В) на содержание ФСП в образцах листьев колокольчика статистически значимо для изученных показателей. Установлено, что инокуляция *B. subtilis* положительно повлияла на такие показатели, как обилие цветения и плотность соцветий, тем самым улучшая декоративность *C. alliariifolia* в условиях Башкирского Предуралья.

**Ключевые слова:** *Campanula alliariifolia*, салициловая кислота, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды, *Bacillus subtilis*

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания № 122033100041-9 по программе «Биоразнообразие природных систем и растительные ресурсы России: оценка состояния и мониторинг динамики, проблемы сохранения, воспроизводства, увеличения и рационального использования».

**Для цитирования:** Реут А. А., Аллаярова И. Н., Биглова А. Р., Ласточкина О. В. Влияние биологических регуляторов роста на содержание фотосинтетических пигментов *Campanula alliariifolia* // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 06. С. 802–812. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-06-802-812>.

**Дата поступления статьи:** 08.02.2024, **дата рецензирования:** 22.03.2024, **дата принятия:** 16.04.2024.

# Impact of biological growth regulators on the ratio of photosynthetic pigments of *Campanula alliariifolia*

A. A. Reut<sup>1</sup>✉, I. N. Allayarova<sup>1</sup>, A. R. Biglova<sup>1</sup>, O. V. Lastochkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

<sup>2</sup>Institute of Biochemistry and Genetics of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

✉E-mail: [cvetok.79@mail.ru](mailto:cvetok.79@mail.ru)

**Abstract.** The purpose is to study the effectiveness of the action of the natural signaling molecule salicylic acid (SA) and *Bacillus subtilis* (Bs) on the ratio of photosynthetic pigments (PhSP) in plant materials (leaves) of *Campanula alliariifolia* Willd. and its decorativeness. **Methods.** Using spectrophotometric techniques, an analysis was carried out of the dynamics of the content of pigments (chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and carotenoids) under the influence of a strain of the bacterium *Bacillus subtilis*, isolated at the Bashkir Scientific Research Institute of Agriculture of the Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (Ufa) from the arable soil layer of the Republic of Bashkortostan, and its combination with salicylic acid during the growing season. **Scientific novelty.** The influence of the *B. subtilis* strain separately and together with salicylic acid on the physiological parameters and decorative properties of *Campanula alliariifolia* in the conditions of the Bashkir Cis-Ural was studied. **Results.** The content and ratio of PhSP in dynamics (phases of budding, flowering and fruiting) were analyzed. It was revealed that inoculation of *C. alliariifolia* plants with *Bacillus subtilis* significantly increases the amount of carotenoids during the flowering phase. During the fruiting phase, the maximum content of PhSP was noted in the Bs + SA variant of the experiment. Two-factor analysis of variance showed that the significant influence of factor A (vegetation phase), factor B (different experimental options), and the degree of total influence of two factors (A × B) on the content of PhSP in samples of campanula leaves is statistically significant for the studied indicators. It was found that inoculation with the *B. subtilis* strain maximized indicators such as the abundance of flowering and the density of bellflower inflorescences, thereby improving the decorativeness of *C. alliariifolia* in the conditions of the Bashkir Cis-Ural.

**Keywords:** *Campanula alliariifolia*, salicylic acid, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids, *Bacillus subtilis*

**Acknowledgements.** The study was carried out within the framework of state assignment No. 122033100041-9 under the program “Biodiversity of natural systems and plant resources of Russia: assessment of the state and monitoring of dynamics, problems of conservation, reproduction, increase and rational use.”

**For citation:** Reut A. A., Allayarova I. N., Biglova A. R., Lastochkina O. V. The influence of biological growth regulators on the content of photosynthetic pigments of *Campanula alliariifolia*. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (06): 802–812. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-06-802-812>. (In Russ.)

**Date of paper submission:** 08.02.2024, **date of review:** 22.03.2024, **date of acceptance:** 16.04.2024.

## Постановка проблемы (Introduction)

Применение регуляторов роста – перспективное направление в физиологии растений. Салициловая кислота (СК) – важный фитогормон регуляции запусков сигнала в генетический аппарат для приспособления растений к воздействию стресса.

СК активирует ключевые протекторные системы растений – синтез специальных стрессовых белков, повышение уровня антиоксидантной реактивности, аккумуляции разнообразных мультифункциональных низкомолекулярных компонентов, выполняющих защитные функции на уровне клетки [1; 2]. Учитывая экологическую безопасность и доступную стоимость, СК может быть использована как

регулятор роста растений и имеет все возможности для дальнейшего практического использования в растениеводстве [3].

В литературных источниках указывается положительное воздействие СК на поступление элементов минерального питания в растения [4, с. 12]. Продемонстрирована роль СК в смягчении абиотического стресса, такого как дефицит железа (Fe) [5] и калия (K) [6], токсичность алюминия (Al) [7], и дефиците некоторых элементов. При этом показано, что эффективность СК зависит от целого ряда факторов, в том числе и концентрации, способа и продолжительности обработки, а также вида растения и фазы его развития [8, с. 255].

Учитывая, что в последние годы складываются неблагоприятные климатические условия в виде недостатка влаги и засухи, необходимо применение специальных микроорганизмов, позволяющих помочь растениям в данных условиях [9]. К настоящему времени защитный эффект *Bacillus subtilis* (Bs) выявлен для многих видов культур, но достоверных исследований, подтверждающих механизм антистрессового и ростостимулирующего воздействия бактерий на растения, на данный момент недостаточно. Предполагается, что, во-первых, положительные микроорганизмы вступают в конкурентные отношения с фитопатогенами за общее ризосферное пространство и питательные элементы, а также способствуют поглощению большего количества микро- и макроэлементов корневой системой растений. Во-вторых, бактерии способны продуцировать биологически активные вещества, которые могут обладать широким спектром действия и защитных комплексов. В-третьих, они индуцируют системную резистентность стрессоустойчивости у растений. Одновременно с этими положительными эффектами результативность использования одинакового штамма Bs может зависеть от большого количества условий, таких как биологические особенности вида или сорта растения, его эколого-географическое распространение и факторы произрастания, разные варианты неблагоприятных воздействий, которым подвергаются культуры в течение вегетационного сезона и так далее.

Молекулы фотосинтетических пигментов растений одними из первых откликаются к действию неблагоприятных факторов среды. Кроме того, состояние светособирающего комплекса определяет оптимальность фотоассимиляции CO<sub>2</sub>.

В работах О. О. Вронской и Л. Л. Седельниковой [10], Реут и др. [11] представлены результаты индикаторной функции пигментных систем (хлорофилла *a* и *b* и каротиноидов) в листьях за вегетационный период. Концентрация пигментов фотосинтетического аппарата в растениях не характеризуется постоянным показателем, а представляет собой параметр, зависящий от климатических условий.

В течение вегетационного сезона на Южном Урале наблюдаются резкие изменения климатических условий. Это, в свою очередь, воздействует на формирование пигментных систем изучаемых объектов, что в особенности характерно для травянистых форм растений [12]. Тем не менее данных по сезонной динамике содержания хлорофилла *a* и *b* и каротиноидов травянистых растений недостаточно, и необходимы дальнейшие исследования. Поэтому детальное изучение физиологии устойчивости растений к резко континентальным условиям Башкирского Предуралья под влиянием биологических регуляторов роста является особенно актуальным.

Одним из путей рационального использования природных ресурсов, обогащения ассортимента декоративных травянистых растений и сохранения всего многообразия видов является использование дикорастущих растений в ландшафтном дизайне. В этой связи особый интерес представляет вид колокольчик чесночницелистный (*Campanula alliariifolia* Willd., сем. колокольчиковые Campanulaceae) – кавказско-малоазиатское травянистое растение. Занесен в Красную книгу Волгоградской области [13]. Издавна применяется в цветоводстве как декоративная культура. На территории Российской Федерации и ближайших соседних странах встречается на Кавказе, Балканах, в Малой Азии. Растет на известняковых скалистых склонах, как правило, в среднем горно-лесном поясе [14]. *C. Alliariifolia* – многолетнее густоопушенное короткокорневищное растение высотой до 70 см. Куст цилиндрический. Прикорневые листья длинночерешковые, треугольно-сердцевидные; стеблевые листья более мелкие, с короткими черешками; верхние листья сидячие, сильно редуцированные. Белые цветки крупные, собраны в длинную однобокую кисть или метелку. Цветки раскрываются по очереди, начиная с нижней трети соцветия, т. е. с базального цветка. Так как соцветие многоцветковое, то последующее направление распускания цветков дивергентное. Продлить срок цветения можно, если своевременно обрезать увядающие и засыхающие соцветия, тем самым вызывая вторичное цветение.

Цветки *C. alliariifolia* правильные, состоят из чашечки и венчика, есть тычинки и пестик, причем тычинки созревают раньше пестика, преподношение пыльцы вторичное, завязь нижняя. Венчик по форме бокальчато-колокольчатый, состоит из пяти сросшихся лепестков. В строении чашечки принимают участие пять лопастей и трубка, в выемках зубцов чашечки имеются отогнутые придатки. Андроцей представляет собой совокупность из пяти свободных тычинок, с расширением у основания. Пять сросшихся плодолистиков образуют ценокарпный гинецей. Размножение семенное, дает обильный самосев. Плод формируется из нижней завязи и представляет собой сухую ценокарпную пятигнездную многосеменную коробочку, которая вскрывается подковообразно у основания. Распространение семян осуществляется путем баллисто-анемохории. Семена серо-коричневые, узкояйцевидной формы, с длинноячеистой структурой поверхности, со специфическим блеском, также имеются «носики» и «крылья».

По жизненной форме объект изучения – многолетний травянистый летне-зеленый симподиально нарастающий поликарпик со стержне-кистекорневыми шнуровидными придаточными корнями и полурозеточным прямостоячим побегом. Продолжительность жизни в культуре – более 10 лет. При-

меняются в альпинариях, одиночных и групповых посадках [14].

Согласно системе элементов флор, разработанной Ю. Д. Клеоповым [15], *C. alliarifolia* можно рассматривать как светолюбивую и термофильную культуру, так как данный вид произрастает в кварцетальном флористическом комплексе.

Известно, что очень детальное описание жизненной формы колокольчика чесночницелистного в культуре было сделано Т. В. Шулькиной [13], онтоморфогенез данного вида подробно представлен в работах Е. А. Судаковой [13]. На Южном Урале (г. Уфа) И. Н. Аллаяровой полноценно изучены особенности сезонного ритма развития и роста, фенология цветения и плодоношения, начальный онтоморфогенез, рассмотрена жизненная форма, а также воздействие регуляторов роста растений на всхожесть семян *C. alliarifolia* в культуре [14].

В настоящий момент биологические особенности и характеристики *C. alliarifolia* в естественных условиях произрастания изучены недостаточно.

Целью данной работы было изучение влияния природной сигнальной молекулы салициловой кислоты в композиции с *Bacillus subtilis* ВКПМ и в отдельности на содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Campanula alliarifolia* и его декоративность в условиях Башкирского Предуралья.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи исследований:

1. Анализ динамики содержания основных фотосинтетических пигментов (C1 a; C1 b; Car) за вегетационный период (бутонизация, цветение, плодоношение).

2. Определение устойчивости пигментных систем листьев *C. alliarifolia* к неблагоприятным факторам (соотношение хлорофиллов (C1 a/C1 b) и суммы хлорофиллов (C1 a+C1 b/Car) и каротиноидов).

3. Оценка изменчивости количества фотосинтетических пигментов (ФСП) методом двухфакторного дисперсионного анализа.

4. Анализ существенности разности содержания ФСП в листьях *C. alliarifolia* согласно точному тесту Фишера.

5. Определение декоративности колокольчика по стобальной шкале для выявления степени воздействия салициловой кислоты в композиции с *Bacillus subtilis*.

#### Методология и методы исследования (Methods)

В Южно-Уральском ботаническом саду-институте Уфимского федерального исследовательского центра РАН (далее ЮУБСИ УФИЦ РАН) *C. alliarifolia* изучали с 2003 года. Образцы были получены семенами по делектусу из Германии.

Погодные условия г. Уфы (Башкирское Предуралье): среднегодовая температура приземного воздуха на поверхности почвы равна +3,7 °С; количество осадков – 590 мм; средняя месячная тем-

пература поверхности почвы имеет отрицательные значения 5 месяцев в году; средняя температура в январе – около –14,5 °С; абсолютный годовой минимум равен –55 °С; средняя температура воздуха в июле составляет +19 °С; абсолютный максимум достигает +40 °С; безморозный период длится около 135 суток. Город находится в переходных условиях: от зоны умеренного увлажнения к зоне недостаточного увлажнения, наибольший объем осадков в Уфе выпадает в первой декаде июля, наименьшее количество осадков чаще всего наблюдается в марте. В ноябре устанавливается постоянный снежный покров и лежит в среднем 155 суток в году [14].

В целом в 2021 году среднесуточная температура и днем, и ночью выше на 1°, чем в 2022; ясных дней больше на 19; облачных – на 9; осадков меньше на 28 дней. В частности, температура в мае 2021 года была выше на 11 °С днем и на 5 °С ночью, чем в 2022; в июне – на 6 °С днем и 2 °С ночью; в августе – на 3 °С днем и 2 °С ночью. В 2021 году в мае и июне осадков было меньше, чем в 2022 году, на 16 %, в июле – на 7 %, в августе – на 15 % [16; 17].

Для выявления воздействия бактерий *Bacillus subtilis* ВКПМ (10<sup>5</sup> КОЕ/мл) (далее Bs) и ее комбинации с салициловой кислотой (0,05 ммоль) (далее СК) на физиологические параметры *Campanula alliarifolia* в условиях открытого грунта был поставлен опыт на открытых участках ботанического сада-института г. Уфы. Штамм Bs 10-4 ранее получен из пахотных земель Республики Башкортостан в Башкирском научно-исследовательском институте сельского хозяйства (г. Уфа), идентифицирован по маркерному гену 16s РНК, подробно описан [18] и помещен под ответственное хранение во Всероссийскую коллекцию промышленных микроорганизмов (№ В-12988 от 23.06.2019). Бактериальную суспензию штамма 10-4 специально готовили на среде Луриа – Бергани, до достижения концентрации клеток 10<sup>9</sup> КОЕ/мл при температуре 37 °С в течение одних суток при 180 об/мин. Затем разбавляли стерильной водой до концентрации 10<sup>5</sup> КОЕ/мл, по отобранной ранее оптимальной методике [18]. Для определения оптической плотности клеточных культур использовали спектрофотометр SmartSpec™ Plus (BioRad, Hercules, США) методом OD600.

Инокуляцию бактериями проводили ежегодно в период отрастания растений однократным поливом под корень (21.05.2021 и 23.05.2022). Почвы опытных участков серые и темно-серые лесные. Пахотной слой почвы имеет следующую агрохимическую характеристику: рН – 6,5; гумус – 6,1 %, нитратный азот – 6,0 мг/кг; содержание подвижных форм фосфора – 176,0 мг/кг; калия – 145,0 мг/кг.

Анализ динамики содержания основных фотосинтетических пигментов (ФСП) определяли за вегетационный период (бутонизация, цветение, плодоношение). Образцы листьев (25–30 штук)

отбирали в первой половине дня со средней части побегов. Определение концентрации хлорофилла *a* (Cl *a*), хлорофилла *b* (Cl *b*) и каротиноидов (Car) проводили методом спектрофотометрии [19, с. 3158]. Навеску из 0,05 г листьев колокольчика смешивали до полной однородности в 10 мл этанола (96 %) с добавлением карбоната кальция и фильтровали. На спектрофотометре определяли спектральную оптическую концентрацию отфильтрованной вытяжки в диапазоне волн 663 nm (Cl *a*), 646 nm (Cl *b*) и 470 nm (Car). Количественное содержание ФСП устанавливали по формуле, предложенной в методике.

### Результаты (Results)

Фотосинтез – это основной процесс накопления органического вещества и энергии зелеными растениями. Интенсивность фотосинтеза изменяется в течении вегетации. В процессе исследования обнаружено, что в фазу бутонизации у *C. alliariifolia* макси-

мальное содержание Cl *a*, Cl *b* и Car наблюдали при контрольном варианте опыта (К) (0,161 мг/г; 0,081 и 0,04 соответственно), минимальное – в варианте с бактеризацией (Bs) (0,087 мг/г; 0,026 и 0,027). В фазу цветения наибольшее количество Cl *a* и *b* отмечали в контрольном варианте (0,117 и 0,054 мг/г соответственно), наименьшее – при бактеризации в комбинации с салициловой кислотой (Bs+СК) (0,109 и 0,038 мг/г). Высокое значение содержания Car отмечали в варианте с Bs (0,032 мг/г), низкое – в контроле К (0,029 мг/г). В фазу плодоношения максимальное содержание ФСП наблюдали в варианте Bs + СК (0,053 мг/г; 0,016 и 0,018 соответственно), минимальное – в контроле (0,037 мг/г; 0,010 и 0,010 соответственно).

За вегетационный период наибольшее содержание ФСП у *C. alliariifolia* наблюдали в контрольном варианте в фазу бутонизации. В последующие фазы отмечено достоверное снижение содержания пигментов (рис. 1)

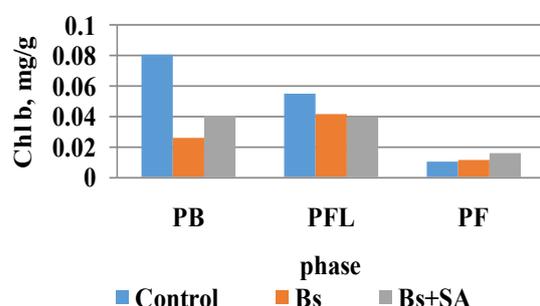
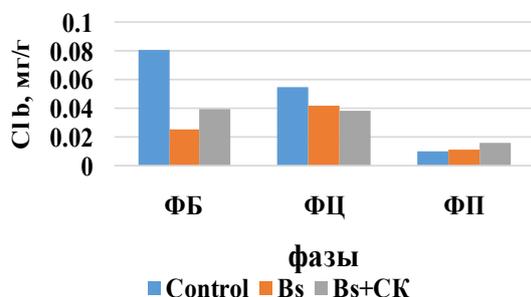
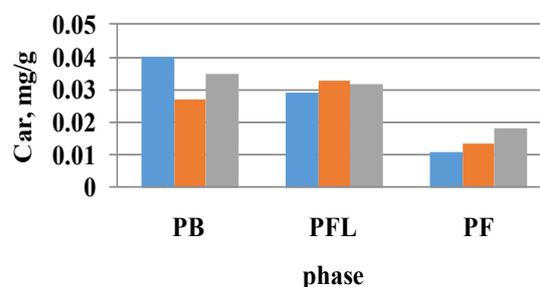
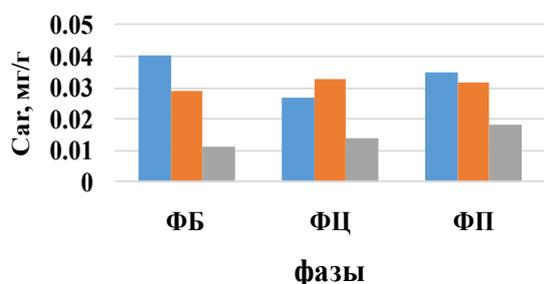
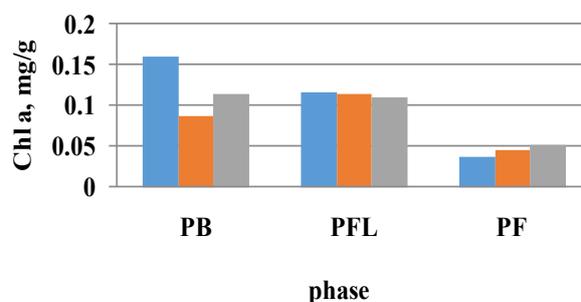
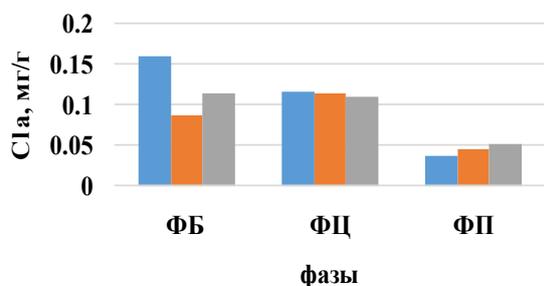


Рис. 1. Содержание хлорофилла *a* (Cl *a*), хлорофилла *b* (Cl *b*) и каротиноидов (Car) в листьях *Campanula alliariifolia* за вегетационный период фазы: ФБ – бутонизации, ФЦ – цветения, ФП – плодоношения Control – контрольный вариант опыта, Bs – вариант с бактеризацией, Bs+СК – вариант с бактеризацией в комбинации с салициловой кислотой

Fig. 1. The content of photosynthetic pigments (Cl *a*, Cl *b*, Car) of *Campanula alliariifolia* leaves during the season of vegetation phases: PB – budding, PFL – flowering, PF – fruiting Control – control variant of the experiment, Bs – variant with bacterization, Bs+SA – variant with bacterization in combination with salicylic acid

Таблица 1  
Количественное содержание пигментов фотосинтетического аппарата  
в листьях *Campanula alliariifolia* в среднем за вегетационный период

Варианты опыта	Фенологическая фаза	Cl a + Cl b, мг/г	Cl a / Cl b	(Cl a + Cl b) / Car
Контроль	ФБ	0,242	1,988	6,050
	ФЦ	0,172	2,147	5,892
	ФП	0,049	3,482	4,435
<i>Bacillus subtilis</i>	ФБ	0,113	3,346	4,185
	ФЦ	0,156	2,745	4,755
	ФП	0,057	3,735	4,154
<i>Bacillus subtilis</i> + салициловая кислота	ФБ	0,155	2,875	4,429
	ФЦ	0,149	2,815	4,656
	ФП	0,069	3,265	3,804

Примечание. ФБ – фаза бутонизации, ФЦ – фаза цветения, ФП – фаза плодоношения; Cl a – хлорофилл а, Cl b – хлорофилл b, Car – каротиноид.

Table 1  
Quantitative content of photosynthetic apparatus pigments in the leaves  
of *Campanula alliariifolia* during the period of life (average data)

Variants	Phenological phase	Cl a + Cl b, mg/g	Cl a / Cl b	(Cl a + Cl b) / Car
Control	PB	0.242	1.988	6.050
	PFL	0.172	2.147	5.892
	PF	0.049	3.482	4.435
<i>Bacillus subtilis</i>	PB	0.113	3.346	4.185
	PFL	0.156	2.745	4.755
	PF	0.057	3.735	4.154
<i>Bacillus subtilis</i> + Salicylic acid	PB	0.155	2.875	4.429
	PFL	0.149	2.815	4.656
	PF	0.069	3.265	3.804

Note. PB – phase budding, PFL – phase flowering, PF – phase fruiting; Cl a – chlorophyll a, Cl b – chlorophyll b, Car – carotenoid.

Важными характеристиками устойчивости пигментных систем растений к неблагоприятным факторам являются соотношение хлорофиллов (Cl a / Cl b) и соотношение суммы хлорофиллов и каротиноидов (Cl a + Cl b) / Car. Изменения в соотношении количества содержания ФСП сказываются на активности светособирающего комплекса, воздействующего на скорость биосинтеза органических соединений, рост и хозяйственно полезные признаки растений. Одним из содержательных параметров, который характеризует потенциальную фотосинтетическую деятельность листьев, является отношение Cl a / Cl b [7].

Суммарное количество хлорофилла (Cl a + Cl b) в листьях *C. alliariifolia* варьировало от 0,049 (в контроле в фазу плодоношения) до 0,242 мг/г (в контроле в фазу бутонизации). Выявлено, что за весь период вегетации количество Cl a в 2,0–3,7 раза больше, чем Cl b (таблица 1). Наибольшие значения отношения Cl a / Cl b отмечены в варианте с Bs в период плодоношения, минимальные – в контроле в фазу бутонизации. Показатель (Cl a + Cl b) / Car во всех изученных вариантах минимален в период плодоношения, что указывает на трансформацию светособирающей функции фотосинтетического аппарата к окончанию вегетационного сезона. Наибольшее значение (Cl a + Cl b) / Car наблюдали в

контроле в период бутонизации, наименьшее – в варианте с бактеризацией с использованием салициловой кислоты в период плодоношения.

Используя метод двухфакторного дисперсионного анализа, провели оценку изменчивости количества фотосинтетических пигментов. Первым фактором считали период вегетации (бутонизация, цветение и плодоношение); вторым – разные варианты опыта (К, Bs и Bs + СК). Дисперсионный анализ доказал, что влияние фактора А (периода вегетации), фактора В (разные варианты опыта) и их общее влияние (А × В) статистически значимо для всех изученных показателей.

При сравнительной оценке влияния периода вегетации, разных вариантов опыта и их общего воздействия на количество фотосинтезирующих пигментов в листьях было обнаружено, что именно период вегетации, рассматриваемый в качестве фактора А, является решающим для множества изученных параметров колокольчика (доля дисперсии от 56,4 до 85,5 %) (таблица 2). Максимальные показатели силы влияния А × В выявлены для содержания Cl b (доля дисперсии – 23,7 %); фактора фазы вегетации (А) выявлены для содержания Car (доля дисперсии – 85,5%); фактора разных вариантов опыта для количества Cl b (доля дисперсии – 19,8 %).

Итоги двухфакторного дисперсионного анализа количества фотосинтетических пигментов (доля дисперсии, %)

Показатель	Фаза (А), %	Варианты (В), %	Взаимодействие (А × В), %
Хлорофилл а	78,4*	6,0*	15,6*
Хлорофилл b	56,4*	19,8*	23,7*
Каротиноид	85,5*	2,8*	11,6*

Примечание. \* Достоверное влияние фактора на уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

The number of photosynthetic pigments according to the results of two-factor analysis of variance (proportion of variance, %)

Indicator	Phase (A), %	Variants (B), %	Interaction (A × B), %
Chlorophyll a	78.4*	6.0*	15.6*
Chlorophyll b	56.4*	19.8*	23.7*
Carotenoid	85.5*	2.8*	11.6*

Note. \* Significant influence of the factor at the significance level  $p \leq 0.05$ .

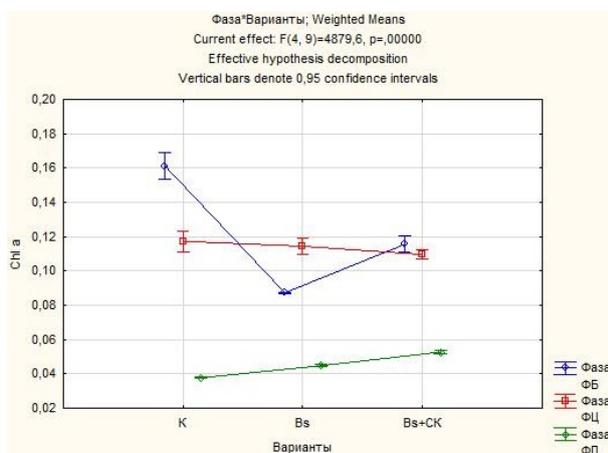


Рис. 2. Содержание хлорофилла а (Сl а) в листьях *Campanula alliarifolia* с доверительными интервалами, в разных вариантах опыта за вегетационный период К – контроль, Bs – вариант с бактеризацией, Bs+СК – бактеризация в комбинации с салициловой кислотой фазы: ФБ – бутонизации, ФЦ – цветения, ФП – плодоношения

При анализе частных различий между количеством Сl а в листьях *C. alliarifolia* в различных вариантах опыта согласно точному тесту Фишера отмечены 7 однородных групп, между которыми есть статистические значимые различия: в I группу относятся К и Bs в фазу цветения, Bs + СК в фазу бутонизации; во II – К в фазу бутонизации; остальные варианты распределены по 5 разным группам (рис. 2).

По оценке существенности разности содержания Сl b в листьях колокольчика согласно точному тесту Фишера отмечены 6 однородных групп: в I группу относятся К и Bs в фазу плодоношения; во II – Bs + СК в фазы бутонизации и цветения, Bs в фазу цветения; остальные варианты распределены по 4 разным группам.

При анализе частных различий между количеством каротиноидов в листьях *C. alliarifolia* в различных вариантах опыта согласно точному тесту Фишера отмечены 8 однородных групп: в I группу

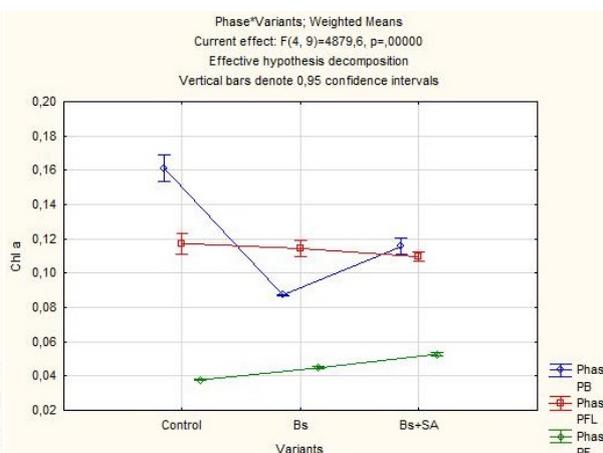


Fig. 2. The amount of chlorophyll a (Cl a) of *Campanula alliarifolia* leaves with confidence intervals, in different experimental variants during the growing season Control – control variant of the experiment, Bs – variant with bacterization, Bs+SA – variant with bacterization in combination with salicylic acid phases: PB – budding, PFL – flowering, PF – fruiting

относятся Bs + СК и Bs в фазу цветения; остальные варианты распределены по 7 разным группам.

Для определения влияния Bs и Bs + СК на декоративность колокольчика применили стобалльную шкалу по общеизвестной методике. Рассматривали следующие признаки, которые подчеркивают декоративность объекта исследований: цвет околоцветника (максимальное количество баллов по данному признаку – 20), размеры и форма цветка (10 и 5 баллов соответственно), высота и прочность цветоноса (по 5 баллов), плотность соцветия (10), продолжительность и обилие цветения (по 10 баллов), декоративный эффект вегетативной части (5), эксклюзивность и устойчивость растений (по 5 баллов). Растения, которые оцениваются в суммарном итоге 85 баллами и более, считаются высокодекоративными. Наибольшее количество баллов набрали образцы, обработанные *B. subtilis* (89 баллов), наименьшее – в контрольном варианте (84 баллов) и в Bs + СК (85 баллов). Корреляционный анализ

показал, что между содержанием ФСП и показателями оценки декоративной ценности колокольчика по стобалльной шкале и другими изученными морфометрическими параметрами не установлена достоверная связь.

По литературным данным, СК в низких концентрациях либо не влияет на рост растений (0,001 ммоль), либо оказывает стимулирующее воздействие на изученные ростовые показатели (0,01 и 0,1 ммоль), тогда как при использовании ее высоких концентраций (0,3, 0,5 и 0,7 ммоль) рост растений тормозится [8]. Предполагаем, что для дальнейших опытов с *C. alliarifolia* следует использовать более низкие концентрации СК.

Таким образом, выявлено, что на определенные декоративные признаки *C. alliarifolia*, такие как длина цветоноса и обилие цветения, положительное влияние бактерий наиболее максимально проявляется.

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

На основе проведенного исследования выявлено, что инокуляция *Bacillus subtilis* растений *Campnula alliarifolia* приводит к увеличению каротиноидов в фазу цветения. В фазу плодоношения максимальное содержание фотосинтетических пигментов отмечали при комбинации *B. subtilis* с

салициловой кислотой. Содержание в листьях колокольчика хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов и их соотношение за вегетационный период являются критериями эффективности адаптации *C. alliarifolia* в условиях Башкирского Предуралья.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что доля влияния фактора А (периода вегетации), фактора В (разные варианты опыта) и их общее влияние (А × В) на количество светособирающих пигментов в листьях *C. alliarifolia* статистически значимо для всех проанализированных параметров. Для большинства показателей определяющим является фактор фазы вегетации (А).

В целом установлено, что инокуляция *B. subtilis* положительно повлияла на обилие цветения, тем самым улучшая декоративные признаки *C. alliarifolia*. При оценке декоративных качеств по стобалльной шкале максимальные показатели отмечены при инокуляции растений *C. alliarifolia* бактериями *B. subtilis*.

Таким образом, применение и внедрение в агротехнику высоких технологий с использованием стимуляторов роста позволит решить проблему повышения декоративности и устойчивости многолетних цветочных культур к неблагоприятным факторам окружающей среды.

#### Библиографический список

1. Лубянова А. Р., Безрукова М. В., Шакирова Ф. М. Взаимодействие сигнальных путей при формировании защитных реакций растений в ответ на стрессовые факторы окружающей среды // Физиология растений. 2021. Т. 68, № 6. С. 563–578. DOI: 10.31857/S0015330321060129.
2. Павлюченко Н. Г., Мельникова С. И., Колесникова О. И., Зимина Н. И. Влияние обработки салициловой кислотой на развитие виноградных саженцев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17, № 3(67). С. 24–30.
3. Колупаев Ю. Е., Ястреб Т. О., Поляков А. К., Дмитриев А. П. Салициловая кислота и формирование адаптивных реакций растений на абиотические стрессоры: роль компонентов сигнальной сети // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 55. С. 135–165. DOI: 10.17223/19988591/55/8.
4. Wu Q., Jing H.-K., Feng Z.-H., Huang J., Shen R.-F., Zhu X.-F. Salicylic acid acts upstream of auxin and nitric oxide (NO) in cell wall phosphorus remobilization in phosphorus deficient rice // Rice. 2022. Vol. 15. DOI: 10.1186/s12284-022-00588-y.
5. Jelali N., Ben Youssef R., Boukari N., Zorrig W., Dhifi W., Abdely C. Salicylic acid and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> seed priming alleviates Fe deficiency through the modulation of growth, root acidification capacity and photosynthetic performance in *Sulla carnosa* // Plant Physiology and Biochemistry. 2021. Vol. 159. Pp. 392–399. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.11.039.
6. Zhu Y. L., Guo M., Si D. X., Cao X., Li H. Y. Salicylic acid alleviates potassium deficiency by promoting nutrient absorption and accumulation in *Zinnia elegans* // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2021. Vol. 24. Pp. 214–220. DOI: 10.17957/ijab/15.1427.
7. Zhu C. Q., Hu W. J., Cao X. C., Zhu L. F., Bai Z. G., Huang J., Liang Q. D., Jin Q. Y., Zhang J. H. Role of salicylic acid in alleviating the inhibition of root elongation by suppressing ethylene emission in rice under Al toxicity conditions // Plant Growth Regulation. 2020. Vol. 90. Pp. 475–487. DOI: 10.1007/s10725-019-00554-7.
8. Игнатенко А. А., Батова Ю. В., Холопцева Е. С., Казнина Н. М. Влияние предпосевной обработки семян салициловой кислотой на рост и фотосинтетический аппарат ячменя при разном содержании цинка в субстрате // Физиология растений. 2023. Т. 70, № 3. С. 251–258. DOI: 10.31857/S001533032370001X.
9. Ahluwalia O., Singh P. C., Bhatia R. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria // Resources, Environment and Sustainability. 2021. Vol. 5. Article number 100032. DOI: 10.1016/j.resenv.2021.100032.

10. Вронская О. О. Тридцать лет Кузбасскому ботаническому саду // Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов: Материалы докладов VI Международной конференции. Кемерово, 2021. С. 10–12. DOI 10.53650/9785902305606\_10.
11. Реут А. А., Аллаярова И. Н., Ласточкина О. В., Биглова А. Р. Влияние разных спектров света в комбинации с *Bacillus subtilis* на содержание фотосинтетических пигментов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2 (70). С. 218–230. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-25.
12. Иванов Л. А., Ронжина Д. А., Юдина П. К., Золотарева Н. В., Калашникова И. В., Иванова Л. А. 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.
13. Мирошниченко Н. Н. Репродуктивная биология и особенности размножения некоторых представителей рода *Campanula* L. в Крыму: дис. ... канд. биол. наук. Ялта, 2019. 170 с.
14. Аллаярова И. Н., Реут А. А. Биологические особенности редкого вида *Campanula carpatica* Jacq. в условиях культуры // Аграрная Россия. 2019. № 1. С. 42–48. DOI: 10.30906/1999-5636-2019-1-42-48.
15. Кучеров И. Б., Зверев А. А. Ценогические позиции бореальных видов растений в сообществах широколиственно-лесной зоны // Turczaninowia. 2021. Т. 24, № 3. С. 89–110. DOI: 10.14258/turczaninowia.24.3.8.
16. Погода в Уфе по месяцам в 2021 году. Башкортостан – температура воздуха, скорость ветра, влажность [Электронный ресурс] // World Weather. 2014–2024. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/ufa/2021> (дата обращения: 15.01.2024).
17. Погода в Уфе по месяцам в 2022 году. Башкортостан – температура воздуха, скорость ветра, влажность [Электронный ресурс] // World Weather. 2014–2024. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/ufa/2022> (дата обращения: 16.01.2024).
18. Lastochkina O., Aliniaiefard S., Garshina D., Garipova S., Pusenkova L., Allagulova C., Fedorova K., Baymiev A., Koryakov I., Sobhani M. Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* strain-specifically improves growth of *Phaseolus vulgaris* plants under normal and salinity conditions and exerts anti-stress effect through induced lignin deposition in roots and decreased oxidative and osmotic damages // Journal of Plant Physiology. 2021. No. 263. Article number 153462. DOI: 10.1016/j.jplph.2021.153462.
19. Shomali A., Das S., Arif N., Sarraf M., Zahra N., Yadav V., Aliniaiefard S., Chauhan D. K., Hasanuzzaman M. Diverse Physiological Roles of Flavonoids in Plant Environmental Stress Responses and Tolerance // Plants. 2022. No. 11 (22). Article number 3158. DOI: 10.3390/plants11223158.

#### Об авторах:

**Антонина Анатольевна Реут**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией цветоводства и селекции, Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия; ORCID 0000-0002-4809-6449, AuthorID 625318. E-mail: [cvetok.79@mail.ru](mailto:cvetok.79@mail.ru)

**Ирина Нагимовна Аллаярова**, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории цветоводства и селекции, Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия; ORCID 0000-0002-4575-7301, AuthorID 908455. E-mail: [Allayarowalrina@yandex.ru](mailto:Allayarowalrina@yandex.ru)

**Айгуль Радиковна Биглова**, инженер I категории лаборатории цветоводства и селекции, Южно-Уральский ботанический сад-институт – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия; ORCID 0000-0002-5729-8261, AuthorID 961279. E-mail: [ajgul.biglova@mail.ru](mailto:ajgul.biglova@mail.ru)

**Оксана Владимировна Ласточкина**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией молекулярных механизмов устойчивости растений к стрессам, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия; ORCID 0000-0003-3398-1493, AuthorID 631751. E-mail: [oksanaiabg@gmail.com](mailto:oksanaiabg@gmail.com)

#### References

1. Lubyanova A. R., Bezrukova M. V., Shakirova F. M. Interaction between signal pathways upon formation of plant defense in response to environmental stress factors. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2021; 68 (6): 989–1002. DOI: 10.31857/S0015330321060129. (In Russ.)
2. Pavlyuchenko N. G., Melnikova S. I., Kolesnikova O. I., Zimina N. I. The effect of salicylic acid treatment on grapevine seedlings development. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2022; 17 (3): 24–30. (In Russ.)

3. Kolupaev Yu. E., Yastreb T. O., Polyakov A. K., Dmitriev A. P. Salicylic acid and formation plant adaptive responses to abiotic stressors: role of signaling network components. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021; 55: 135–165. DOI: 10.17223/19988591/55/8. (In Russ.)
4. Wu Q., Jing H.-K., Feng Z.-H., Huang J., Shen R.-F., Zhu X.-F. Salicylic acid acts upstream of auxin and nitric oxide (NO) in cell wall phosphorus remobilization in phosphorus deficient rice. *Rice*. 2022; 15. DOI: 10.1186/s12284-022-00588-y.
5. Jelali N., Ben Youssef R., Boukari N., Zorrig W., Dhifi W., Abdelly C. Salicylic acid and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> seed priming alleviates Fe deficiency through the modulation of growth, root acidification capacity and photosynthetic performance in *Sulla carnosa*. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021; 159: 392–399. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.11.039.
6. Zhu Y. L., Guo M., Si D. X., Cao X., Li H. Y. Salicylic acid alleviates potassium deficiency by promoting nutrient absorption and accumulation in *Zinnia elegans*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021; 24: 214–220. DOI: 10.17957/ijab/15.1427.
7. Zhu C. Q., Hu W. J., Cao X. C., Zhu L. F., Bai Z. G., Huang J., Liang Q. D., Jin Q. Y., Zhang J. H. Role of salicylic acid in alleviating the inhibition of root elongation by suppressing ethylene emission in rice under al toxicity conditions. *Plant Growth Regulation*. 2020; 90: 475–487. DOI: 10.1007/s10725-019-00554-7.
8. Ignatenko A. A., Batova Yu. V., Kholoptseva E. S., Kaznina N. M. The effect of pre-sowing seed treatment with salicylic acid on the growth and photosynthetic apparatus of barley with different zinc content in the substrate. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2023; 70 (3): 251–258. DOI: 10.31857/S001533032370001X. (In Russ.)
9. Ahluwalia O., Singh P. C., Bhatia R. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*. 2021; 5: 100032. DOI: 10.1016/j.resenv.2021.100032.
10. Vronskaya O. O. Thirty years of the Kuzbass Botanical Garden. *Problems of industrial botany in industrialized regions: materials of reports of the VI international conference*. Kemerovo, 2021. Pp. 10–12. DOI: 10.53650/9785902305606\_10. (In Russ.)
11. Reut A. A., Allayarova I. N., Lastochkina O. V., Biglova A. R. Influence of different spectrum of light in combination with *Bacillus subtilis* on the content of photosynthetic pigments. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023; 2 (70): 218–230. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-25. (In Russ.)
12. Ivanov L. A., Ronzhina D. A., Yudina P. K., Zolotareva N. V., Kalashnikova I. V., Ivanova L. A. Seasonal dynamics of chlorophyll and carotenoid content in leaves of steppe and forest plants at the level of species and community. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2020; 67 (3): 278–288. DOI: 10.31857/S0015330320030112. (In Russ.)
13. Miroshnichenko N. N. Reproductive biology and reproduction characteristics of some representatives of the genus *Campanula* L. in Crimea: dissertation ... candidate of biological sciences: 03.02.01. Yalta, 2019. 170 p. (In Russ.)
14. Allayarova I. N., Reut A. A. Biological features of rare species *Campanula carpatica* Jacq. under the conditions of culture. *Agrarnaya Rossiya*. 2019; 1: 42–48. DOI: 10.30906/1999-5636-2019-1-42-48. (In Russ.)
15. Kucherov I. B., Zverev A. A. Coenotic positions of boreal plant species in communities of the broad-leaved forest zone. *Turczaninowia*. 2021; 24 (3): 89–110. DOI: 10.14258/turczaninowia.24.3.8. (In Russ.)
16. Weather in Ufa by month in 2021. Bashkortostan – air temperature, wind speed, humidity [Internet]. 2021 [cited 2024 Jan 15]. Available from: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/ufa/2021>. (In Russ.)
17. Weather in Ufa by month in 2022. Bashkortostan – air temperature, wind speed, humidity [Internet]. 2022 [cited 2024 Jan 16]. Available from: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/ufa/2022>. (In Russ.)
18. Lastochkina O., Aliniaiefard S., Garshina D., Garipova S., Pusenkova L., Allagulova C., Fedorova K., Baymiev A., Koryakov I., Sobhani M. Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* strain-specifically improves growth of *Phaseolus vulgaris* plants under normal and salinity conditions and exerts anti-stress effect through induced lignin deposition in roots and decreased oxidative and osmotic damages. *Journal of Plant Physiology*. 2021; 263: 153462. DOI: 10.1016/j.jplph.2021.153462.
19. Shomali A., Das S., Arif N., Sarraf M., Zahra N., Yadav V., Aliniaiefard S., Chauhan D.K., Hasanuzzaman M. Diverse physiological roles of flavonoids in plant environmental stress responses and tolerance. *Plants*. 2022; 11 (22): 3158. DOI: 10.3390/plants11223158.

#### Authors' information:

**Antonina A. Reut**, candidate of biological sciences, leading researcher, head of the laboratory of floriculture and selection, South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia; ORCID 0000-0002-4809-6449, AuthorID 625318. *E-mail: cvetok.79@mail.ru*

**Irina N. Allayarova**, candidate of biological sciences, junior researcher at the laboratory of floriculture and selection, South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia; ORCID 0000-0002-4575-7301, AuthorID 908455. *E-mail: AllayarowaIrina@yandex.ru*

**Aygul R. Biglova**, junior researcher at the laboratory of floriculture and selection, South-Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia; ORCID 0000-0002-5729-8261, AuthorID 961279. *E-mail: ajgul.biglova@mail.ru*

**Oksana V. Lastochkina**, candidate of biological sciences, senior researcher, laboratory of molecular mechanisms of plant stress resistance, Institute of Biochemistry and Genetics of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia; ORCID 0000-0003-3398-1493, AuthorID 631751.

*E-mail: oksanaibg@gmail.com*