

А. В. Кручонок, Б. Ю. Аношенко, М. А. Бедуленко, В. В. Титок

Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕСТООБИТАНИЙ ИСКУССТВЕННЫХ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ РЕДКИХ И ИСЧЕЗАЮЩИХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ

Аннотация. Представлены результаты экологического анализа местообитаний редких и исчезающих видов растений природной флоры в условиях Центрального ботанического сада НАН Беларуси. Объектами исследования являлись искусственные ценопопуляции *Astrantia major* L., *Allium ursinum* L., *Lunaria rediviva* L., *Hedera helix* L. Определены следующие количественные показатели: экологическая валентность, экологическая толерантность и бионтность четырех видов. Путем сопоставления экологической амплитуды и экологического оптимума найдены точки напряженности среды по отношению к экоморфам изучаемых видов.

Ключевые слова: искусственные ценопопуляции, фитоиндикация, *ex situ*, редкие и охраняемые растения, экологическая валентность, бионтность, экологическая эффективность, *Astrantia major* L., *Allium ursinum* L., *Lunaria rediviva* L., *Hedera helix* L.

Для цитирования: Экологический анализ местообитаний искусственных ценопопуляций редких и исчезающих видов растений / А. В. Кручонок [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 20–26.

A. V. Kruchonok, B. Yu. Anoshenko, M. A. Bedulenko, V. V. Titok

Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF HABITATS OF ARTIFICIAL CENOPOPULATIONS OF RARE AND ENDANGERED PLANTS

Abstract. Ecological analysis was performed for localities of Belarusian rare and endangered plant species created in the Central Botanical Garden of NAS of Belarus. Artificial cenopopulations of *Astrantia major* L., *Allium ursinum* L., *Lunaria rediviva* L., *Hedera helix* L. were analyzed in ecological space of the Central Botanical Garden by estimating ecological valence, tolerance and biocompatibility. Comparison between ecological amplitudes and optimums of species studied allows environmental stress points to be identified towards their ecomorphs.

Keywords: artificial cenopopulations, phytoindication, *ex situ*, rare and endangered species, ecological valence, biocompatibility, ecological efficiency, *Astrantia major* L., *Allium ursinum* L., *Lunaria rediviva* L., *Hedera helix* L.

For citation: Kruchonok A. V., Anoshenko B. Yu., Bedulenko M. A., Titok V. V. Environmental analysis of habitats of artificial cenopopulations of rare and endangered plants. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 20–26 (in Russian).

Введение. В реализации программ по сохранению и воспроизводству биоразнообразия природной флоры наиболее эффективны методы *in situ* и *ex situ*. Для разработки адекватных моделей транслокационных мероприятий (реинтродукции и репатриации) необходимы исследования экологического пространства территории, перспективной для транслокационных мероприятий. На сегодняшний день нет унифицированного количественного экспресс-теста, позволяющего определить новые местообитания с учетом комплекса экологических условий, которые необходимы для конкретного вида. Существующие тесты не всегда объективны и к тому же предполагают использование дорогостоящих инструментальных методов.

Применение метода фитоиндикации позволяет определить специфику растительного сообщества, выбранного местообитания и необходимые для этого условия. Кроме того, с помощью этого метода можно определить экологическую толерантность и бионтность репатрируемого вида.

Объекты и методы исследования. Для апробации системы экологического анализа были исследованы искусственные ценопопуляции (ЦП), высаженные на территории Центрального ботанического сада НАН Беларуси (ЦБС) с 1999 г. Из 26 существующих сегодня ЦП было отобрано 4, которые устойчиво развиваются по инвазионному типу, успешно возобновляются и даже образуют новые локалитеты.

1. Астранция большая (*Astrantia major* L.) – I категория (CR) – вид, находящийся на грани исчезновения. Естественный ареал вида охватывает преимущественно горные районы Центральной Европы. На сегодняшний день достоверно существует только популяция в Беловежской пушче. В Волковысском районе при инвентаризации 2016 г. не подтверждена. ЦП-10 высажена в 2010 г., расположена в искусственном понижении на выкашиваемой луговине с избыточным увлажнением в весенний период; ЦП-21 высажена в 1999 г., занимает пограничное положение на краю лиственного леса и низкотравного луга. Имеются признаки переувлажнения почвы и избыточного затенения.

2. Лук медвежий (*Allium ursinum* L.), или черемша, – III категория (VU) – уязвимый вид. В Беларуси это реликтовый средневропейский горный вид, находящийся на северо-восточной границе равнинной части ареала. Произрастает в тенистых широколиственных и широколиственно-еловых лесах преимущественно снытевого типа, вблизи рек и ручьев, по окраинам болот и на облеженных островах среди болот. В ЦБС созданы две ценопопуляции: ЦП-4 посажена в 1999 г., произрастает под пологом широколиственных деревьев, на влажных лесных рыхлых почвах; ЦП-8 посажена в 2013 г. в понижении, под пологом искусственных древесных насаждений, в местах интенсивного антропогенного пресса и на почвах с признаками избыточного увлажнения, обусловленного характером подстилающей поверхности.

3. Лунник оживающий (*Lunaria rediviva* L.) – IV категория (NT) – потенциально уязвимый вид. Реликтовый, по происхождению пребореальный средневропейский неморальный вид, в Беларуси находится в островных участках произрастания и отдельных локалитетах вблизи северо-восточной границы ареала. ЦП-1 высажена в 1999 г. Фитоценоз представлен антропогенно-трансформированным сообществом. ЦП-5 – группа растений, которые являются спонтанным локалитетом ЦП-1 и находятся в грабовнике. ЦП-20 расположена на границе низкотравного луга и посадок лиственных культур.

4. Плющ обыкновенный (*Hedera helix* L.) – II категория (EN) – исчезающий вид. Реликтовый, по происхождению пребореальный средневропейский горный вид, в Беларуси занимает островные участки распространения и отдельные локалитеты на восточной границе ареала и за его пределами. ЦП-2 создана в 1990-е годы из коллекционного материала белорусского происхождения. Расположена в сосняке, представлена вегетативной формой. ЦП-16 образовалась в результате слияния границ произрастания двух образцов дендрологической коллекции. Один образец интродуцирован из Ялты (1957 г.), второй из Батуми (1964 г.). Произрастает в секторе дендрофлоры Крыма и Кавказа.

Для характеристики и оценки соответствия экологических условий мест произрастания ЦП и их экологической реализации были использованы методы амплитудной (по Цыганову) и точечной (по Элленбергу) фитоиндикации [1, 2].

Известно, что виды могут произрастать не только в зонах с оптимальными условиями, но и в зонах с той или иной степенью угнетения видов, вплоть до их гибели (так называемые зоны угнетения). Различия между оптимальными условиями и условиями зоны угнетения и составляют экологическую амплитуду вида. Размеры зон видоспецифичны и не обязательно симметричны и равновелики (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения экологического оптимума и экологической амплитуды на двунаправленном векторе экологического фактора. Зоны: зк – зона комфорта, зу – зона угнетения, зг – зона гибели

Fig. 1. The ecological optimum and the ecological amplitude on bi-directional vector of environmental factor. Zones: зк – comfort zone, зу – oppression zone, зг – death zone

Экологическое поле искусственных местообитаний для сравнения с оптимальными показателями рассчитывали с помощью регрессионного анализа экологических амплитуд растительного сообщества [3]. Экологический оптимум для вида определяли по таблицам Элленберга, точечные экологические показатели для реальных ЦП – с помощью инструментальных измерений (люксометрия, рН-метрия), многолетних климатических наблюдений и данных почвенных карт ЦБС.

Степень освоения среды обитания определяет экологическая валентность. Различают PEV – потенциальную экологическую валентность (отношение баллов экологической шкалы к общей протяженности баллов по шкале) и REV – реализованную экологическую валентность (этот показатель выражает экологические условия конкретных ЦП). Соотношение PEV и REV определяет степень использования видом экологических возможностей и выражается коэффициентом экологической эффективности (К. ес. eff) [4].

Результаты и их обсуждение. На диаграммах сплошной черной линией показаны потенциальные экологические оптимумы видов по Элленбергу. Линиями с обозначениями на них номеров ЦП показано фактическое положение последних в экологическом пространстве ЦБС (рис. 2).

Два искусственных локалитета *A. major* произрастают в условиях, близких к оптимуму, однако условия освещения и температурный режим отлежат в меньшую сторону от оптимальных значений (рис. 2, а). ЦП-21 находится в условиях, характеризующихся азотной недостаточностью и большей, чем требуется, влажностью почв. Что касается мест произрастания *A. ursinum*, то, будучи подобны между собой, они далеки от оптимума, совпадая лишь в показателе кислотности почвы. Известно, что этот вид предпочитает богатые гумусом почвы, а в условиях ЦБС он произрастает в зоне угнетения (в соответствии с данным показателем). Это говорит о том, что местообитание выбрано неподходящее и необходима коррекция или даже транслокация (рис. 2, б).

Экологические показатели трех мест произрастания *L. rediviva* практически совпадают между собой, но их геоклиматические (большая степень континентальности и недостаточный по температурам термоклимат) и почвенные (недостаточность азота) характеристики далеки от оптимальных. Тем не менее, это одна из наиболее динамично развивающихся групп, образующих спонтанные локалитеты в пределах ЦБС (рис. 2, с).

В случае *H. helix* анализ соответствия мест обитания оптимальным значениям показал, что лишь показатель влажности почв совпадает с оптимумом, остальные факторы находятся в избыточном количестве (рис. 2, д). По шкале Элленберга отсутствуют значения термоклиматических показателей, однако известно, что лимитирующим фактором распространения вида на восток является изотерма отрицательных зимних температур – 4,3 °С [5].

Сравнение оптимальных значений с результатами инструментальных измерений позволяет определить лимитирующий фактор, препятствующий нормальному развитию ЦП в данных условиях, и провести его своевременную коррекцию в том случае, если он не является геоклиматическим.

Сравнивая фактическое положение ЦП, определенное по регрессии амплитудных значений видов сообщества с амплитудами вида по Цыганову, можно получить визуализацию потенциальных и реализованных экологических возможностей ЦП (рис. 3).

Анализ экологических диапазонов дает возможность определить пределы пластичности вида по отношению к комплексу условий произрастания. Сплошной линией на диаграммах показано положение ЦП в экологическом пространстве на территории ЦБС. На рис. 3 видно, что все четыре вида находятся в пределах своего экологического диапазона. Условия произрастания *L. rediviva*, *H. helix* и *A. major* полностью соответствуют как геоклиматической, так и эдафической группе факторов. В случае с *A. ursinum* показатель влажности почвы превышает диапазон значений, а показатели минерального богатства, кислотности почвы и криоклиматической морфы находятся на нижнем пределе. Значит, местообитание подобрано неправильно. Данные по точечным шкалам Элленберга подтверждают этот факт (см. рис. 2, б).

Экологические валентности REV и PEV рассчитывали по методу Л. М. Жуковой. На основе этих вычислений определяли коэффициент экологической эффективности (К. ес. eff = (REV/PEV) · 100 %) и индекс экологической толерантности ($It = \sum PEV / \Sigma$) [4, 6].

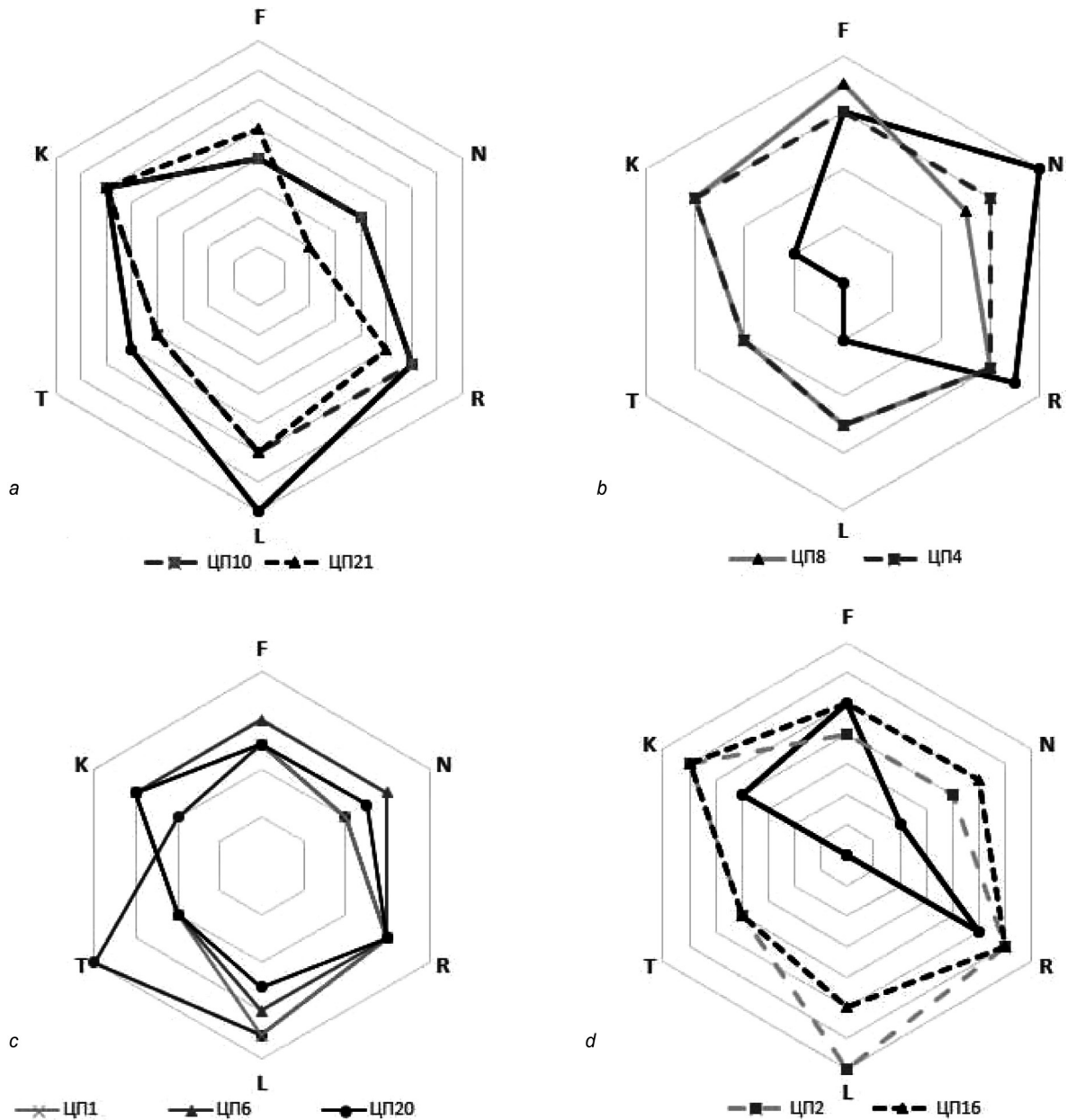


Рис. 2. Экологический оптимум и фактические экологические условия искусственных ценопопуляций в условиях Центрального ботанического сада (по Элленбергу): а – астранция большая (*A. major*); б – лук медвежий (*A. ursinum*); с – лунник оживающий (*L. rediviva*); д – плющ обыкновенный (*H. helix*). Показатели экологической шкалы: F – увлажнение почв, N – насыщенность почв азотом, R – кислотность почв, L – освещенность/затенение, T – термоклимат, K – степень континентальности климата

Fig. 2. Ecological optimum and actual ecological conditions of artificial cenopopulations in the Central Botanical Garden for *Astrantia major* (a), *Allium ursinum* (b), *Hedera helix* (c), *Lunaria rediviva* (d). Ecological indicators: F – soil humidification, N – soil nitrogen content, R – soil acidity, L – illuminance, T – temperature factor, K – continental climate rate

По значению коэффициента экологической валентности установлена чувствительность каждого вида к определенному фактору (табл. 1). Чувствительными можно назвать стеновалентные виды, когда вид занимает менее 1/3 шкалы. Мезовалентными видами занято 2/3 шкалы. Толерантными и устойчивыми к факторам можно назвать эвривалентные, когда вид занимает более 2/3 шкалы. Таким образом, в условиях ЦБС все исследуемые ЦП проявляют стеновалентность к фактору азотообеспеченности почв и криоклимату. *A. major* чувствительна к степени континентальности климата, омброрежиму и солевому режиму. *H. helix* и *L. rediviva* стеновалентны к фактору освещенности и влажности почв.

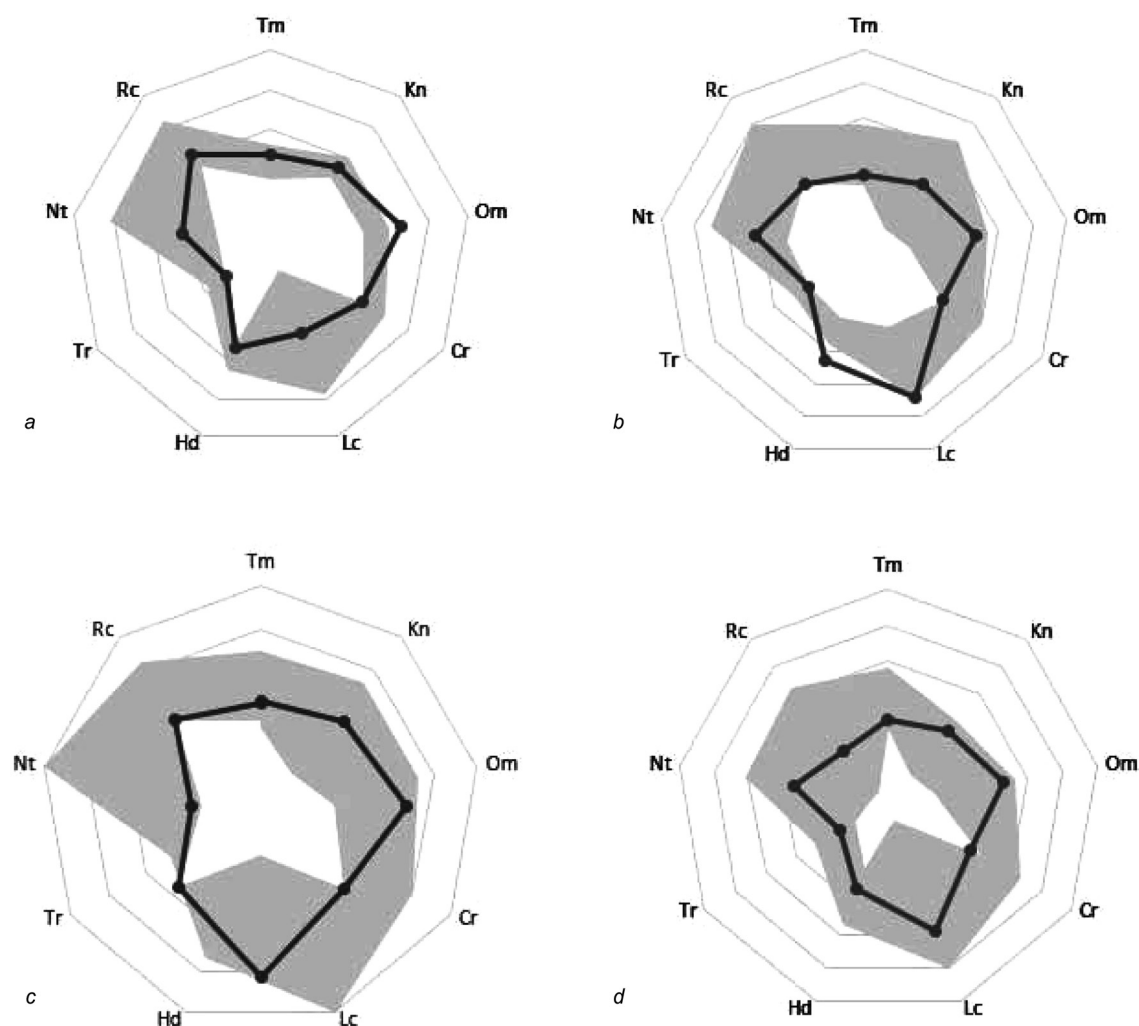


Рис. 3. Потенциальное (□) и фактическое (—) экологическое пространство видов редких растений в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси (по Цыганову): *a* – астранция большая (*A. major*); *b* – лук медвежий (*A. ursinum*); *c* – лунник оживающий (*L. rediviva*); *d* – плющ обыкновенный (*H. helix*). Геоклиматические факторы: Кп – континентальность климата (15 баллов), Сг – криоклимат (15 баллов), Тм – термоклиматическая шкала (17 баллов), Ом – омбро-режим аридность-гумидность (15 баллов), Лс – освещенность (9 баллов). Эдафические факторы: Hd – влажность почв (23 балла), Tr – солевой режим (19 баллов), Rc – кислотность почв (13 баллов), Nt – обеспеченность азотом (11 баллов)

Fig. 3. Potential (□) and implemented (—) ecological conditions for *Astrantia major* (*a*), *Allium ursinum* (*b*), *Hedera helix* (*c*), *Lunaria rediviva* (*d*) in the Central Botanical Garden. Geoclimatic factors: Kn – climate continentality, Cr – crioclimate, Tm – thermoclimate, Om – ombrogenity, aridity and humidity, Lc – illuminance; edaphic factors: Hd – soil humidification, Tr – mineral nutrition, Rc – soil acidity, Nt – soil nitrogen content

Таблица 1. Коэффициент экологической эффективности искусственных ЦП в условиях Центрального ботанического сада НАН Беларуси

Table 1. Ecological efficiency coefficient for the artificial cenopopulations of Belarus rare and endangered species in conditions of the Central Botanical Garden

Вид ЦП	К. ec. eff, %							
	Tm	Kn	Om	Cr	Lc	Hd	Tr	Nt
<i>Astrantia major</i>	0,40	0,15	0,30	0,15	0,43	0,40	0,33	0,14
<i>Allium ursinum</i>	0,70	0,50	0,80	0,25	0,60	0,60	0,66	0,33
<i>Hedera helix</i>	0,70	0,35	0,80	0,25	0,11	0,22	0,50	0,22
<i>Lunaria rediviva</i>	0,70	4,40	0,70	0,25	0,25	0,34	0,41	0,33

Примечание. Экологические факторы: Тм – термоклимат, Кп – континентальность климата, Сг – криоклимат, Ом – омброрежим, Лс – освещенность, Hd – влажность почв, Tr – солевой режим, Rc – кислотность почв, Nt – обеспеченность азотом.

Расчет степени толерантности к каждому фактору довольно громоздкий. Для оценки отношений вида и среды используется индекс толерантности (It), описывающий отношение вида к ряду факторов [6]. Индекс It определяется по соотношению суммы потенциальных экологических валентностей конкретного вида с числом шкал, с учетом, что вклад каждой шкалы равен единице. Значение этого индекса дает возможность определить группу толерантности (бионтности) вида. При распределении видов по группам толерантности применяли тот же принцип, что и при распределении видов по фракциям экологической валентности. В результате получили следующие показатели валентности и индекса толерантности:

- стеновалентная (СВ) эквалентность и стенобионтная (СБ) толерантность – не более 0,33;
- гемистеновалентная (ГСВ) эквалентность и гемистенобионтная (ГСБ) толерантность – от 0,34 до 0,45;
- мезовалентная (МВ) эквалентность и мезобионтная (МБ) толерантность – от 0,46 до 0,56;
- гемиэвривалентная (ГЭВ) эквалентность и гемиэврибионтная (ГЭБ) толерантность – от 0,57 до 0,66.

Все изученные виды (кроме *L. rediviva* L.) более чувствительны к климатическим факторам и менее чувствительны к эдафическим (табл. 2). Наименьшая пластичность ЦП в условиях ЦБС присуща *A. major*.

Таблица 2. Экологическая валентность и толерантность редких и охраняемых видов ЦП Центрального ботанического сада

Table 2. Ecological valency and tolerance of Belarus rare and endangered species in the Central Botanical Garden

Вид	Климатические факторы			Эдафические факторы		
	It клим.	Фракция эквалентности	Группа толерантности	It почв	Фракция эквалентности	Группа толерантности
<i>Astrantia major</i> L.	0,21	СВ	СБ	0,35	ГСВ	ГСБ
<i>Allium ursinum</i> L.	0,49	МВ	МБ	0,38	ГСВ	ГСБ
<i>Hedera helix</i> L.	0,44	ГСВ	ГСБ	0,59	ГЭВ	ГЭБ
<i>Lunaria rediviva</i> L.	0,45	ГСВ	ГСБ	0,40	ГСВ	ГСБ

Примечание. Фракции эквалентности: СВ – стеновалентная, МВ – мезовалентная, ГСВ – гемистеновалентная, ГЭВ – гемиэвривалентная. Группы толерантности: СБ – стенобионтная, МБ – мезобионтная, МСБ – мезостенобионтная, ГСБ – гемистенобионтная, ГЭБ – гемиэврибионтная.

Заключение. Все четыре объекта относятся к редким и охраняемым видам природной флоры Беларуси. Изученные ЦП за время своего существования на территории ЦБС проявили различную степень освоения условий обитания. Экологическое поле ЦБС имеет одинаковые климатические условия, однако все местообитания хоть незначительно, но отличаются по почвенным характеристикам и степени освещенности. В ряде случаев эти факторы оказываются решающими для успешного развития искусственной ЦП.

Показатели потенциальной и реализованной экологической валентности свидетельствуют о том, что на зональном и региональном уровнях лимитирующим для исследованных видов является криоклиматический фактор, ограничивающий распространение видов по растительным зонам, а на локальном – степень азотообеспеченности почв и режим освещенности. Наиболее чувствительный к комплексу факторов вид – астранция большая (*A. major*). Применение амплитудных шкал Цыганова и точечных шкал Элленберга позволяет объективно оценить и обосновать экологическое соответствие растительной экоморфе, выбранной территории для создания модельных полигонов по изучению особенностей развития искусственных ЦП редких и охраняемых видов в условиях *ex situ* и более точно подобрать новые местообитания для стеновалентных видов.

Таким образом, фитоиндикационный анализ дает возможность получить количественную оценку напряженности факторов среды, не требующую проведения дорогостоящих инструментальных измерений, и, как следствие, провести объективный количественный экологический анализ территорий, рассматриваемых как перспективные для репатриации и ренатурализации редких и исчезающих видов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ellenberg, H. *Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas* / H. Ellenberg. – Gottingen : Verlag Erich Goltze KG, 1974. – 97 S.
2. Цыганов, Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов / Д. Н. Цыганов. – М. : Наука, 1983. – 193 с.
3. Бузук, Г. Н. Регрессионный анализ в фитоиндикации (на примере экологических шкал Д. Н. Цыганова) / Г. Н. Бузук, О. В. Созинов // Ботаника. – Минск, 2009. – Вып. 37. – С. 356–362.
4. Экологические шкалы и методы анализа экологического разнообразия растений / Л. А. Жукова [и др.]. – Йошкар-Ола : МарГУ, 2010. – 368 с.
5. Парфенов, В. И. Редкие и исчезающие виды растений Белоруссии и Литвы / В. И. Парфенов, А. А. Лякавичюс, Н. В. Козловская ; Акад. наук Белорус. ССР, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Акад. наук Литов. ССР, Ин-т ботаники. – Минск : Наука и техника, 1987. – 352 с.
6. Турмухамедова, Н. В. Экологическая характеристика некоторых видов растений / Н. В. Турмухамедова, Л. А. Жукова, Ю. А. Дорогова // Онтогенетический атлас растений. – Йошкар-Ола : МарГУ, 2013. – Т. 7. – С. 289–296.

References

1. Ellenberg H. *Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas*. Gottingen, Verlag Erich Goltze KG Publ., 1974. 97 p.
2. Tsyganov D. N. Phytoindication of ecological regimes in the subzone of coniferous-broadleaf forests. Moscow, Science, 1983. 193 p. (in Russian).
3. Buzuk G. N., Sozinov O. V. Regression analysis in phytoindication (using the example of environmental scales by D. N. Tsyganov). *Botanika* [Botany], Minsk, 2009, iss. 37, pp. 356–362 (in Russian).
4. Zhukova L. A., Dorogova Iu. A., Turmukhametova N. V., Gavrilova M. N., Polianskaya T. A. *Ecological scales and methods of analysis of ecological diversity of plants*. Yoshkar-Ola, Mariysk State University, 2010. 368 p. (in Russian).
5. Parfenov V. I., Liakavichius A. A., Kozlovskaya N. V. *Rare and endangered species of plants in Belarus and Lithuania*. Academy of Sciences of the Byelorussian SSR, Institute of Experiments. Botany named after V. F. Kuprevich, Academy of Sciences of the Lithuanian SSR, Institute of Botany. Minsk, Science and technology, 1987. 352 p. (in Russian).
6. Turmukhamedova N. V., Zhukova L. A., Dorogova Iu. A. Ecological characteristics of some plant species. *Ontogeneticheskii atlas rastenii* [Ontogenetic atlas of plants]. Yoshkar-Ola, Mariysk State University, 2013, vol. 7, pp. 289–296 (in Russian).

Информация об авторах

Кручонок Аlesia Владимировна – науч. сотрудник, заведующий Сектором. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: A.Kruchonok@cbg.org.by.

Аношенко Борис Юрьевич – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: B.Anoshenko@cbg.org.by.

Бедуленко Марина Анатольевна – науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: M.Bedulenko@cbg.org.by.

Титок Владимир Владимирович – член-корреспондент, д-р биол. наук, директор. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Titok@cbg.org.by.

Information about the authors

Alesia V. Kruchonok – Researcher, Head of the Sector. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: A.Kruchonok@cbg.org.by.

Boris Yu. Anoshenko – Ph. D. (Biol.), Leading researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: B.Anoshenko@cbg.org.by.

Marina A. Bedulenko – Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: M.Bedulenko@cbg.org.by.

Vladimir V. Titok – Corresponding Member, D. Sc. (Biol.), director. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Titok@cbg.org.by.