

## Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-1-110-118  
УДК: 631.95:502.5:504.5

А.И. Сафонов<sup>1</sup>, Ф.В. Голубев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донецкий государственный университет» 283001, Россия, Донецк, ул. Университетская, 24

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского Российской академии наук» 119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 19

\*Авторы для переписки:  
andrey\_safonov@mail.ru, f.v.golubev@mail.ru

**Финансирование.** Работа подготовлена в рамках научной темы: «Диагностика и оптимизация белигеративных экотопов Донбасса методами биомониторинга и фиторемедиации». № 1025073000026-6-1.6.19. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

**Вклад авторов:** А.И. Сафонов: концептуализация, ресурсы, формальный анализ, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование, администрирование проекта, верификация данных. Ф.В. Голубев: ресурсы, проведение исследования, формальный анализ, курирование данных, создание рукописи и ее редактирование, визуализация.

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

**Для цитирования:** Сафонов А.И., Голубев Ф.В. Экологический подход к фиторемедиации в новых условиях антропогенной трансформации ландшафтов Донбасса. *Овощи России*. 2026;(1):110-118. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-1-110-118>

**Поступила в редакцию:** 15.09.2025

**Принята к печати:** 12.11.2025

**Опубликована:** 16.03.2026

Andrei I. Safonov<sup>1</sup>, Fedor V. Golubev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Donetsk State University  
24, Universitetskaya St., Donetsk, 283001, Russia

<sup>2</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) RAS  
Kosygin str., 19 Moscow, 119991, Russia

\*Corresponding Authors:  
andrey\_safonov@mail.ru, f.v.golubev@mail.ru

**Funding.** The work was prepared within the framework of the scientific topic «Diagnostics and optimization of belligerent ecotopes of Donbass using biomonitoring and phytoremediation methods» No 1025073000026-6-1.6.19. The work was carried out within the state assignment of the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS).

**Authors' Contributions.** Safonov A.I.: conceptualization, resources, formal analysis, investigation, writing – review & editing, project administration, validation. Golubev F.V.: resources, investigation, formal analysis, data curation, writing – review & editing, visualization.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**For citations:** Safonov A.I., Golubev F.V. Ecological approach to phytoremediation in the new conditions of Donbass landscapes anthropogenic transformation. *Vegetable crops of Russia*. 2026;(1):110-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-1-110-118>

**Received:** 15.09.2025

**Accepted for publication:** 12.11.2025

**Published:** 16.03.2026

# Экологический подход к фиторемедиации в новых условиях антропогенной трансформации ландшафтов Донбасса

Check for updates



## РЕЗЮМЕ

**Актуальность.** В промышленно напряженном регионе (Донбассе) в результате социально-экономических пертурбаций с 2014 года по настоящее время многие земли выведены из сельскохозяйственного использования, являются бросовыми, деградирующими. Места активных боевых действий формируют бelligеративные ландшафты, которые характеризуются глубокими геофизическими и геохимическими преобразованиями. Эти участки являются очагами токсического воздействия на окружающую среду и нуждаются в целенаправленных мероприятиях по их восстановлению. В реальной практике действенных методов оптимизации природно-территориального комплекса ДНР выделяется фиторемедиационный метод как наиболее эффективный, экономически выгодный и эстетически привлекательный.

**Материалы и методы.** Изучены экотопы сельскохозяйственного и рекреационного использования в Центральном Донбассе. Проведена полевая диагностика состояния локальных фито- и геосистем. Применен метод морфологического анализа и описания растений, калькуляции в определении жизненных стратегий растений (CSR). Использованы методы аналитического контроля: атомно-абсорбционный, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, нейтронно-активационный.

**Результаты.** Установлена разница в диапазоне варьирования информативных признаков строения индикаторных растений для использования в фиторемедиационных целях на постконфликтных территориях – местах активных военных действий в Донбассе. Выявлены новые геохимические аномалии на исследованных территориях по ряду технофильных элементов (Mn, P, Zn, Cu, Mo, Ni, Pb, Cr, La, Co, Se, As, Cd). Для видов растений цикория обыкновенного (*Cichorium intybus* L.), одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* F.H.Wigg), подорожника большого (*Plantago major* L.), двурядки стеной (*Diplotaxis muralis* (L.) DC.) определены особенности реализации жизненных стратегий в экстремальных условиях (визуализация CSR в треугольнике Грайма-Раменского) и экологической пластичности в местах, пострадавших от милитаризации региона. Выявлены анатомо-морфологические патологии исследуемых видов. Установлено, что экологическая валентность изученных видов позволяет им в первые два-три года обеспечить начальные стадии активного сукцессионного процесса при формировании растительного покрова, выполняющего средообразующие и анти-эрозионные функции. На основании морфопатологий и данных элементного состава растений выделены варианты геохимических аномалий, и описан ряд геохимического фонового значения по элементному составу в растительных объектах. Фосфорно-лантановая аномалия (P-La), как следствие проводимых военных действий в ДНР, описана впервые.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

биодиагностика, экологический мониторинг, фитоиндикация, антропогенная трансформация, восстановление экосистем, микроэлементы, фосфор, лантан

## Ecological approach to phytoremediation in the new conditions of Donbass landscapes anthropogenic transformation

### ABSTRACT

**Relevance.** In the industrially tense region (Donbass), as a result of socio-economic upheavals since 2014, many lands have been withdrawn from agricultural use and are now abandoned and degraded. Areas of active military action create belligerent landscapes characterized by profound geophysical and geochemical transformations. These areas are hotbeds of toxic environmental impacts and require targeted restoration measures. Phytoremediation stands out among the most effective methods for optimizing natural-territorial complexes of the DPR as the most effective, economically advantageous and aesthetically attractive.

**Materials and Methods.** Agricultural and recreational ecotopes in the Central Donbass were studied. A field assessment of the state of local geosystems was conducted. Morphological analysis and description of plants, as well as calculations for determining life strategies (CSR), were applied. Analytical methods (atomic absorption, inductively coupled plasma mass spectrometry, and neutron activation) were used.

**Results.** A difference in the range of informative structural features variation of some indicator plants for use in phytoremediation purposes in post-conflict areas – sites of active military operations in Donbass – has been established. New geochemical anomalies were identified in post-conflict areas for a number of technophile elements (Mn, P, Zn, Cu, Mo, Ni, Pb, Cr, La, Co, Se, As, Cd). For the plant species *Cichorium intybus* L., *Taraxacum officinale* F.H.Wigg, *Plantago major* L., and *Diplotaxis muralis* (L.) DC., the implementation patterns of life-sustaining strategies (visualization of CSR in the Grime-Ramensky triangle) and ecological plasticity in areas affected by the militarization of the region were determined. Anatomical and morphological pathologies of the studied species were identified. The ecological valence of species allows them to support the initial stages of active succession during the first two to three years, forming a vegetation cover that performs anti-erosion and habitat-forming functions. Based on plant morphopathologies and elemental composition data, geochemical anomalies were identified and a range of geochemical background values for elemental composition in plant samples was described. A phosphorus-lanthanum anomaly (P-La), a consequence of military operations in the DPR, is described for the first time.

### KEYWORDS:

biodiagnostics, environmental monitoring, phytoindication, anthropogenic transformation, ecosystem restoration, trace elements, phosphorus, lanthanum

## Введение

Хозяйственное освоение территории Центрального Донбасса исторически обусловлено добычей и переработкой полезных ископаемых. Высокий уровень металлургического и коксохимического производства наряду с густой сетью урбанизированных территорий и сельскохозяйственных производств в совокупности создали условия глубокой трансформации природных степных экосистем. Их устойчивость по критерию естественных биогеохимических циклов в первую очередь зависит от сформированного растительного покрова, обеспечивающего балансовые процессы в ландшафтных комплексах. Нарушенные в результате интенсивной индустриализации природные экотопы [1] нуждаются в разработке научной программы по их восстановлению [2, 3], обеспечению процессов минимизации эрозии [4] и токсической нагрузки [5, 6], восстановлении биопродуктивных функций в геосистемах [7]. Во многом ситуация актуализируется в связи с затяжным обострением социально-политического конфликта на территории Донбасса [8, 9] и регистрируемыми повсеместно фактами изменения климата [10, 11]. Эколого-ботаническая экспертиза [12] для оценки функционирования биотопов является ключевой [13] и включает в себя разработку рациональных предложений для повышения устойчивости антропогенно нарушенных локалитетов [14].

Цель работы – на примере экотопов аграрного и рекреационного комплексов, испытавших трансформирующее воздействие беллигеративного фактора с 2014 по 2025 г. в Донбассе, оценить их состояние, восстановительный и фиторемедиационный потенциал по индикаторным характеристикам рудеральных видов природной флоры региона.

## Материалы и методы

В основу методологического подхода реновационных мероприятий в донецких ландшафтах положены апробиро-

ванные ранее методы маршрутного геоботанического наблюдения, фитоиндикации [15, 16], картографирования и пространственной визуализации неоднородных данных [17, 18]. В качестве аналитического контроля использовали результаты элементного состава ряда технофильных элементов (Mn, P, Zn, Cu, Mo, Ni, Pb, Cr, La, Co, Se, As, Cd) в биопробах, определённых методами ААС на приборах Сатурн-2 и Сатурн-3 и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, учитывая накопленные оригинальные сведения по результатам нейтронно-активационного анализа в фитосубстратах индикационного назначения [19, 20]. Контроль качества аналитических измерений осуществляли с помощью стандартных образцов. Статистический анализ результатов проведён с помощью программы Statistica 12.

Отбор проб осуществляли на учётных площадках. Из природных условий отбирали материалы не более 10% от существующей фитомассы с характерными индикационными характеристиками. Поскольку пробные площадки были заложены в местах разного уровня и характера деградативных процессов на территориях пост- и неконфликтных ситуаций, характерных и изучаемых для многих участков Донбасса [21-24], то были использованы методы исследования в условиях посттехногенных локальных катастроф и милитаризации [25, 26]. Расчет показателей реализации программы индивидуально-специфического выживания проводили по методикам анализа адаптивных стратегий растений в разных экологических условиях [27, 28] и экстремальных факторах среды [29, 30], и моделирования в условиях неспецифического стресса [31].

Апробация метода учёта CSR стратегий растений в антропогенно трансформированных ландшафтах для ряда видов сорно-рудеральной фракции флоры Северного Приазовья актуальна [32] и представлена в настоящей работе. Применены методические подходы в анализе ботанических характеристик при организации целенаправленной

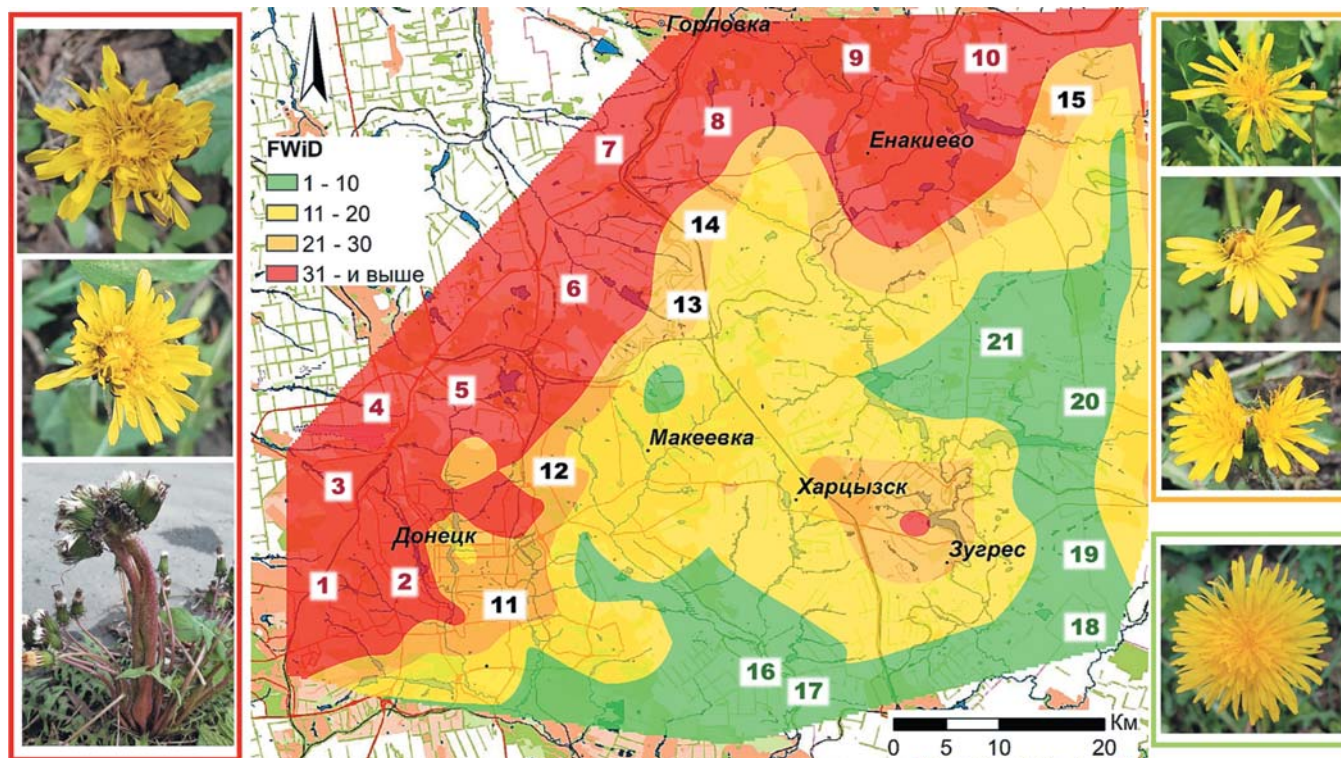


Рис. 1. Картограмма локализации пробных площадок (1-21) в Центральном Донбассе с учётом фактора военных действий, полемостресса (FWID) и состояния индикаторного признака – тератоморфности соцветий *Taraxacum officinale* в норме и патологии

Fig. 1. Map of the survey sites localization (1-21) in the Central Donbass taking into account the factor of military action, polemosstress (FWID) and the state of the indicator trait - teratomorphism of *Taraxacum officinale* inflorescences in normal and pathological conditions

ремедиации [33-35] в резко изменённых экосистемах. К анализу оценки состояния экотопов Донбасса (для отбора точек сельскохозяйственного назначения) приобщены сведения по 113 учетным стационарам, используемым в качестве постов наблюдений мониторинга за период более 25 лет [17], которые 12 последних лет находятся в состоянии деградации из-за военного конфликта. Из числа всех стационаров для экспериментальной работы выбраны территории, которые по своей принадлежности относятся к местам аграрного и рекреационного использования. Исследования проводили на 21 учётных площадках Центрального Донбасса с разной степенью антропогенной трансформации геосистем (рис.1). В качестве модельных растений использовали рудеральные виды: цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* F.H.Wigg), подорожник большой (*Plantago major* L.) и двурядку стенную (*Diplotaxis muralis* (L.) DC.).

**Результаты и их обсуждение**

В результате геоботанических обследований установлено, что техногенные экотопы, а также системы рудеральных и урбанизированных конструкций проходят процесс восстановления по другому сценарию (в отличие от агро- и рекреационных) по спонтанным и контролируемым сукцессиям после резких нарушений со стороны фактора военных событий – полемостресса [18]. Поэтому фиторемедиационные мероприятия и системы буферного возобновления были разделены на отдельные кластеры экспериментальных наблюдений (рис. 1).

Учитывая имеющееся структурно-ботаническое зонирование по фактору патологий от военного стресса [17] на рис. 1 показано 4 диапазона варьирования признака в разной цветовой гамме. Мониторинговые точки 1-10 соответствуют зоне максимальной, 11-15 – умеренной и 16-21 – минимальной трансформации экотопов в результате милитаризационного импакта в ландшафтных системах.

Тератологические проявления в структуре индикаторных видов растений положены в основу demonstra-

ционного примера экспресс-диагностики неблагоприятных факторов нео-антропогенной природы при анализе уровня неспецифического стресса. Наиболее изученным и показательным в этом блоке диагностики является *Taraxacum officinale* (рис. 1). В результате многолетних исследований установлена корреляционная связь между характеристиками тератообразования на разных уровнях организации и локализаций морфологических патологий: архитектоники побегообразования, симметричности габитуса, парных органов (листовой пластинки или цветка с язычковым отгибом венчика и др.), дистопии и элиминации генеративных органов, множественных пролификаций, опушения вегетативных частей растения, строения пыльцы и отдельных конформационных тканей в зародышевом аппарате [16, 32]. На рис. 1 представлены соцветия *Taraxacum officinale*, имеющие разные морфотипические проявления в соответствии с ранжированными диапазонами значений фактора военного возмущения в экосистемах. По разнообразию морфологических особенностей прикорневых розеток индикационного вида *Taraxacum officinale*, обуславливающих качественные сигнальные отличия на макро- и микроуровнях строения растений, выделены 4 фенотипические линии, проявляющиеся в зависимости от особенностей геохимического контраста в местах беллигеративного фактора. На основании макроратологий в растениях и данных их элементного состава описаны 4 варианта геохимических аномалий (табл.) и описан ряд фитогеохимического фонового значения по элементному составу в объектах исследования. Данные о содержании технофильных элементов в фитопробах представлены в таблице. В таблице указаны только существенно меняющиеся численные значения для идентификации отдельных геохимических аномалий с сохранением тенденций, полученных в типичном ряду концентрирования от его большего значения к меньшему. Кроме того, приводится типичный геохимический ряд для сравнительной оценки с установленными нами геохимическими аномалиями (табл.).

**Таблица. Варианты геохимических аномалий при анализе фиторемедиационных процессов в Донбассе, разница в элементном составе растительных проб *Taraxacum officinale***  
**Table. Variants of geochemical anomalies in the analysis of phytoremediation processes in Donbass, the difference in the elemental composition of *Taraxacum officinale* plant samples**

Учётные площадки (см. рис. 1)	Геохимическая аномалия, по доминантным загрязнителям	Концентрационный ряд в фитомассе по некоторым технофильным элементам, мг/кг
16, 17, 18, 19, 20, 21	типичный геохимический ряд (81 % исследуемых экотопов Донбасса)	Mn (2100) > P (1600) > Zn (1530) > Cu (194) > Mo (41,4) > Ni (36,1) > Pb (32,7) > Cr (26,9) > La (10,1) > Co (4,5) > Se (4,2) > As (2,8) > Cd (0,87), учётная площадка 21
3, 4, 10, 12	цинково-кобальтово-свинцовая аномалия (Zn-Co-Pb), зона типичного полемостресса	Zn (2800) > Mn > P > Cu > Co (190) > Pb (112) > Mo > Ni > Cr > La > Se > As > Cd, учётная площадка 4
1, 2, 7, 11, 14	медно-никелево-свинцовая аномалия (Cu-Ni-Pb)	Cu (1830) > Mn > P > Zn > Ni (290) > Pb (160) > Mo > Cr > La > Co > As > Se > Cd, учётная площадка 7
5, 6	фосфорно-лантановая аномалия (P-La), уникальный локалитет	P (5950) > Mn > Zn > Cu > La (179) > Mo > Ni > Pb > Cr > Co > Se > As > Cd, учётная площадка 5
8, 9, 13, 15	никелево-кобальтовая аномалия (Ni-Co)	Mn > P > Zn > Ni (628) > Cu > Co (72,3) > Mo > Pb > Cr > La > Se > As > Cd, учётная площадка 9

Учётные площадки 5 и 6 (рис.1), территориально сопряженные с урбанизированными ландшафтами Авдеевки и Ясиноватой, выделены в специфическую геохимическую аномалию с доминированием содержащегося в растениях фосфора (с периода 2022-2025 гг. сборов) и резким повышением содержания редкоземельного элемента лантана. Фосфорно-лантановая геохимическая аномалия, идентифицируемая по высоким концентрациям P ( $5950 \pm 32,2$  мг/кг) и La ( $179 \pm 5,8$  мг/кг) в растениях-индикаторах, была впервые зарегистрирована с мая 2022 г. В сравнении с региональными фоновыми значениями эти показатели в зоне беллигеративного импакта превышают концентрации P и La в 3,7 и 17,7 раз соответственно. Если сравнивать с нормированными показателями по концентрации фосфора в растениях [36-38], то полученные результаты превышают контрольные значения для экологически благополучных регионов в 22-45 раз, а по лантану [39-42] – в 39-57 раз. Хотя эти элементы не имеют жёсткого нормирования в сельском хозяйстве и в продуктах питания растительного происхождения [36, 38, 41, 42], в целях экологического мониторинга идентифицируемая фито-геохимическая аномалия выполняет сигнальную информационную функцию и свидетельствует о дополнительном факторе воздействия и трансформации исторически сформированных природных ландшафтов. Этот факт рассматривается как опосредованное доказательство использования соединений фосфора и лантана для разных форм осуществления боевых действий. На более ранних этапах обследования этих территорий (до 2022 г.) такие закономерности не были отмечены.

Для контрастного сравнения в полевой диагностике экотопов Донбасса была применена габитуальная оценка фитогеохимических аномалий модельного объекта *Taraxacum officinale* (рис.1). На макроморфологическом

уровне существенную роль играет захват растением территории после резкого нарушения в результате взрывов и образования беллигеративного ландшафта. Эта стратегия захвата пространства (временно освобожденной поверхности почвенного покрова) пионерными особями после нуля-момента (эцезиса) может реализовываться по разным сценариям.

У *Taraxacum officinale* прослеживается максимальная эксплеренция (захват поверхности субстрата, резкое размножение и расселение) как по вегетативной части архитектоники особей (рис. 2), так и анализе генеративного успеха по количеству и качеству семенного материала. По форме листовой пластинки, степени её расчленения, характеру асимметричности и визуальной разнице пигментного состава в полевых условиях сделан вывод о наличии угнетающего фактора (рис.2). В условиях цинково-кобальтово-свинцовой аномалии (Zn-Co-Pb) проявляются признаки ксерофитизации: уменьшается поверхность листового аппарата, редуцируется верхняя доля листа, изменяется пигментный состав в результате проявляющихся антоцианов при разрушении хлорофилла. Подобные физиолого-биохимические реакции реализуются в условиях фосфорно-лантановой геохимической аномалии (P-La), однако локализация наблюдается в периферических участках верхней расширенной доли листовой пластинки при общей гипертрофии розеточной конструкции (рис. 2). При медно-никелево-свинцовой геохимической аномалии (Cu-Ni-Pb), высоких концентрациях меди, никеля и свинца в *Taraxacum officinale* листовая пластинка лишена расчленения, вытянута вдоль основной жилки, уплотнена анастомозная сеть жилкования и опушения. Для никелево-кобальтовой геохимической аномалии (Ni-Co) характерны радикальные преобразования формы листовой пластинки и анатомические изменения, кото-

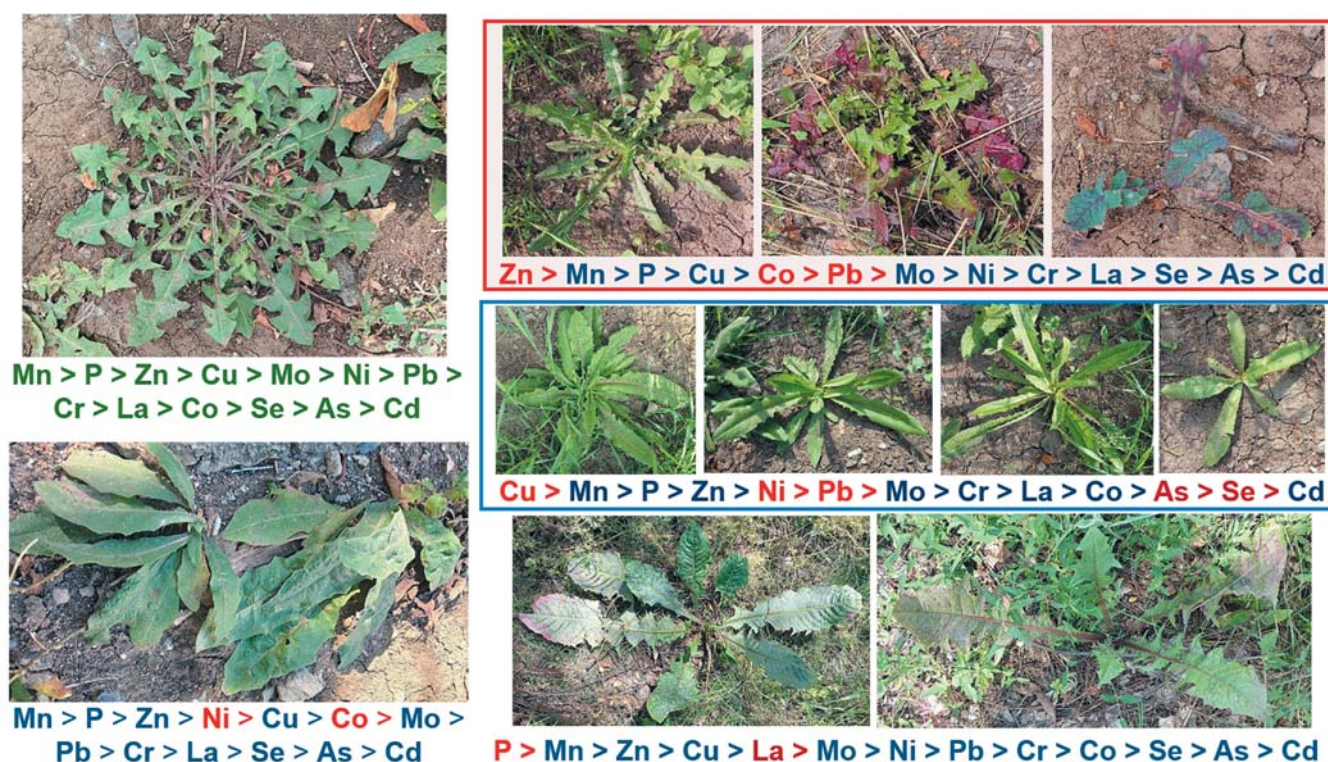


Рис. 2. Архитектоника прикорневой розетки *Taraxacum officinale* в условиях типичного регионального фона и сформированных геохимических аномалий 4-х вариантов  
Fig. 2. Architectonics of the basal rosette of *Taraxacum officinale* under conditions of a typical regional background and formed geochemical anomalies of 4 variants

рые видны при микроскопировании поверхностной ткани листа (эпидермы): околоустьичный аппарат аноцитного типа становится асимметричным, в 40-55% случаев встречаются устьичные аппараты диацитного и парацитного типов, что оценено как патологическое проявление в органогенезе; по морфологии лист перестаёт иметь лопасти, доли и сегменты, край листа становится волнистым (рис. 2), увеличенная ассимиляционная поверхность указывает на обратный ксерофитизации процесс – гипертрофию и мезофитизацию вегетативных органов *Taraxacum officinale*.

Экспресс-диагностика продолжена в условиях камеральной обработки материала, в которой учитывались сведения, необходимые для калькуляции жизненных стратегий в каждом конкретном случае анализа формирования особи, преимущественно по индексу ксерофитизации (по расчету площади, массы листового аппарата до и после высыхания).

При захвате нео-экотопов постконфликтных территорий у вида с широкой экологической амплитудой *Cichorium intybus*, наблюдаются многочисленные проявления структурных патологий, главным образом, скупенность побеговой системы и формирование укороченных междоузлий (рис. 3). При этом, по данным калькулятора CSR, стратегия из области устойчивой рудерализации смещается в категорию стресс-толерантных видов, что в первые годы адаптации отражается на внешнем строении и имеет свои характерные особенности в элементном составе. Общие закономерности накопления токсических элементов в одуванчике и цикории совпадают в диапазоне варьирования в 1,5-4,1%, что можно рассматривать в пределах варьирования стандартной ошибки на 5%-ном доверительном интервале значимости. Ряд концентраций элементов для определения фона (на примере учётной площадки

21) по средним значениям в *Cichorium intybus* составляет следующую последовательность, в мг/кг: Mn (2100) > P (1550) > Zn (1540) > Cu (195) > Mo (41,9) > Ni (35,8) > Pb (32,2) > Cr (27,1) > La (10,2) > Co (4,5) > Se (4,2) > As (2,7) > Cd (0,85).

Есть многочисленные примеры, когда зона поражения после обстрелов не ограничивается только беллигеративными воронками глубинного нарушения, поэтому с помощью индикационных свойств растений сопредельных территорий можно также диагностировать наличие новых локальных геохимических аномалий в том числе без глубинного нарушения почвенного горизонта. Анализ жизненных стратегий *Diplotaxis muralis* (рис. 4) выделяет смещение приоритетов в крайние позиции рудерально-стрессовых условий беллигеративного фактора, что установлено по индексам ксерофитизации и формулам глобального калькулятора CSR.

По габитуальной структуре *Diplotaxis muralis* и архитектонике прямых морфологических отличий как у *Taraxacum officinale*, установлено не было. Индикация фактора стресса реализовалась иначе, – по тератоморфным проявлениям в генеративных органах: цветках, плодах, структуре пыльцевых зерен. Различимы отличия тератообразования при установленных сценариях доминирующих загрязнителей: Zn-Co-Pb – пролификация цветков в средней части соцветия, фасциации плодов, деформации пыльцевых зёрен в экваториальной части; P-La – гипергенезия основания листового аппарата, ретортообразные кроющие трихомы, дистопия цветка; Cu-Ni-Pb – петализация тычинок, пролификация цветка внутри ранее сформированной завязи, нетипичное опушение вдоль главной жилки листа из нитчатых трихом, фасциации частей цветка; Ni-Co – олигомеризация листового аппарата срединной формации, хориза (расщепление) и дистопия в кругах цветка,

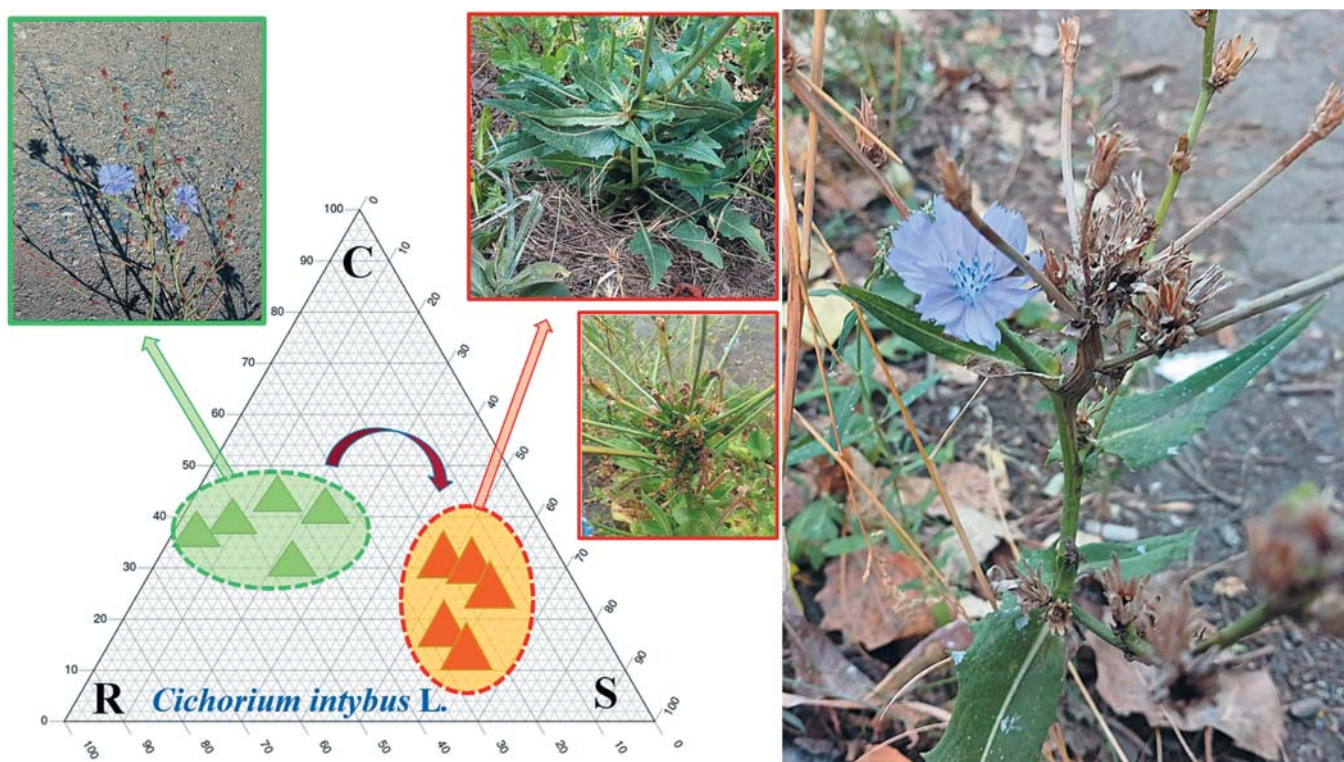


Рис. 3. Смещение способа реализации жизненной стратегии *Cichorium intybus* в условиях беллигеративных экотопов в местах аграрного и рекреационного хозяйственного использования  
 Fig. 3. Shift in the mode of implementation of the *Cichorium intybus* life strategy in the conditions of belligerent ecotopes in places of agricultural and recreational economic use

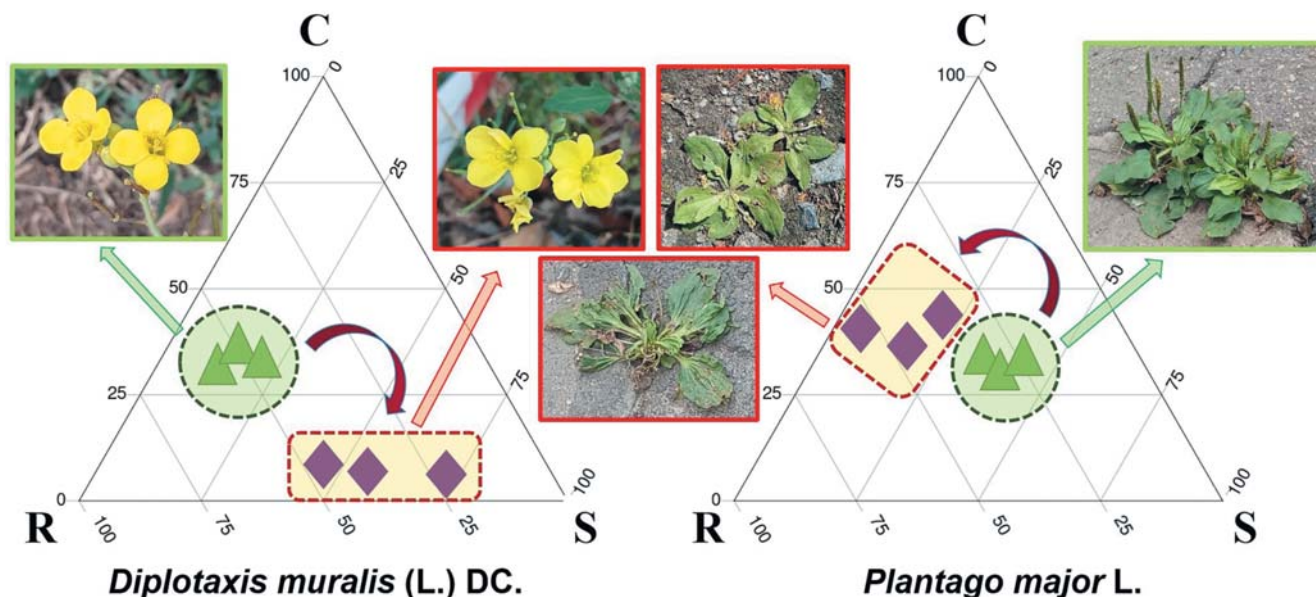


Рис. 4. Смещение способа реализации жизненной стратегии видов *Diplotaxis muralis* и *Plantago major* в условиях беллигеративных экотопов в местах аграрного и рекреационного хозяйственного использования  
 Fig. 4. Shift in the mode of implementation of the life strategy of species *Diplotaxis muralis* & *Plantago major* in the conditions of beligerative ecotopes in places of agricultural and recreational economic use

частые разрывы наружной оболочки пыльцевых зёрен (экзины) в результате её утончения, тератологическая схизокотилия. Геохимические отличия для мест изучаемого импакта по накоплению в тканях *Diplotaxis muralis* на 2,3-3,8% отличались от установленных диапазонов для *Taraxacum officinale*. При этом последовательность концентрирования ряда элементов в *Diplotaxis muralis* на примере фонового значения учётной площадки 21 сохраняется: Mn (2120) > P (1620) > Zn (1500) > Cu (190) > Mo (41,5) > Ni (36,8) > Pb (32,1) > Cr (26,4) > La (10,2) > Co (4,6) > Se (4,3) > As (2,9) > Cd (0,81). Закономерности в соотношениях геохимических показате-

лей и трендов по рядам концентрирования (табл.) элементов сохраняются в пределах статистического отклонения по среднему значению.

*Plantago major* в условиях полемостресса проявил тенденции к смещению жизненной стратегии в сторону конкурентно способных приспособлений по данным индекса ксерофитизации калькулятора CSR (рис. 4,5). Этот вид в ремедиационных мероприятиях может формировать пионерное поселение сразу же в первый вегетационный период после нарушений почвенного покрова (рис. 5, сценарий никелево-кобальтовой аномалии), что не характерно для других используемых видов при таком характере

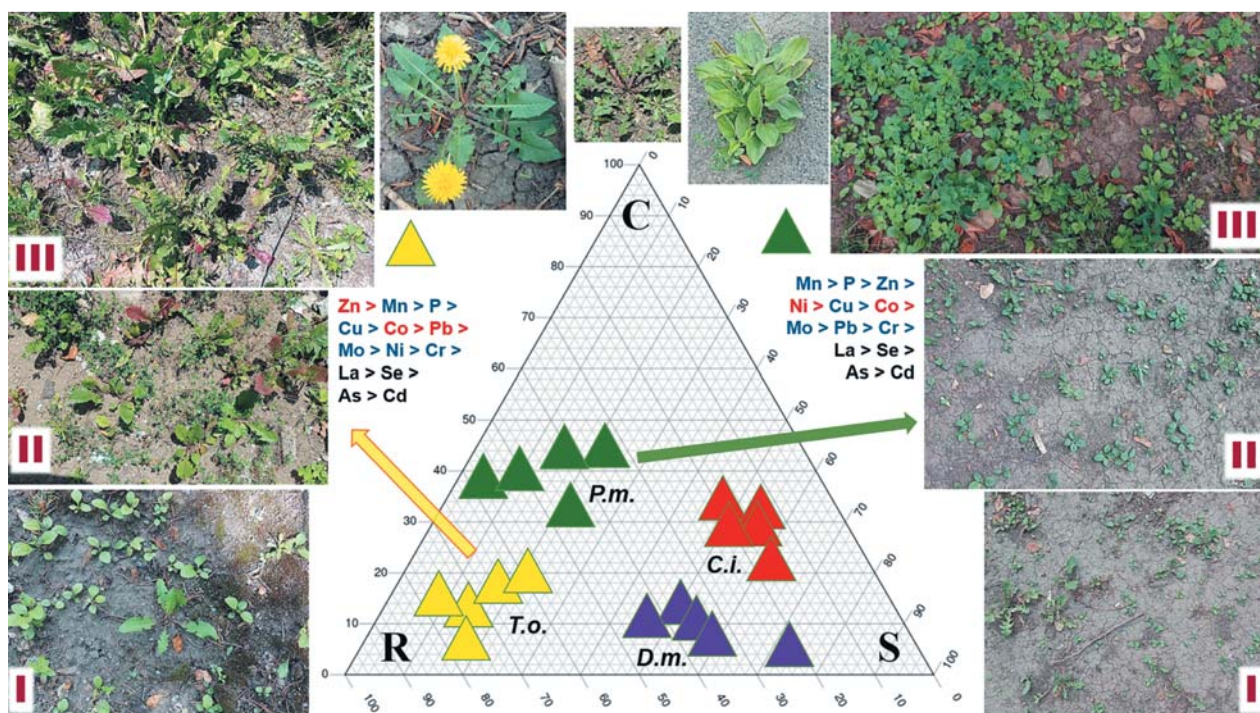


Рис.5. Система компактизации экологических ниш модельных видов для фиторемедиации в Донбассе по сценариям преобразования в условиях разных геохимических аномалий; I-II-III – этапы сукцессионного ряда с доминированием отдельных видов. C.i. – *Cichorium intybus*, T.o. – *Taraxacum officinale*, P.m. – *Plantago major*, D. m. – *Diplotaxis muralis*  
 Fig. 5. System of ecological niches compaction of model species for phytoremediation in Donbass according to transformation scenarios under conditions of different geochemical anomalies; I-II-III – stages of succession with dominance of individual species. C.i. – *Cichorium intybus*, T.o. – *Taraxacum officinale*, P.m. – *Plantago major*, D. m. – *Diplotaxis muralis*

загрязнений. Вероятно, высокая устойчивость обеспечивается особенностью корневой системы и повышает шансы на выживание в открытых ландшафтах аридного и субаридного степного климата Центрального Донбасса. Особенности тератологических проявлений у *Plantago major* для установленных геохимических аномалий следующие: Zn-Co-Pb – укорочение оси при скупенности соцветий, аномальность анастомозной сетки в листовом аппарате, пролификация цветков и соцветий, тератные формы пыльцевых зёрен и орнаментации экзины, матрикальная гетероспермия, схизокотилия; P-La – гипергенезия побега, матрикальная гетерокарпия; Cu-Ni-Pb – аномальное опушение листа по специализации трихом кроющего типа, линзовидность пыльцевого зерна; Ni-Co – атипичное строение устьичного аппарата на фоне гипогенезии листа, фасциации соцветий, дистопия андроцея по отношению к частям венчика. По концентрированию технофильных элементов вид на 1,5-2,7% отличается от диапазонов, установленных для ранее описанных закономерностей *Taraxacum officinale* (табл.). Ряд накопления элементов в *Plantago major* соответствует установленной последовательности: Mn (2110) > P (1610) > Zn (1510) > Cu (195) > Mo (41,9) > Ni (36,6) > Pb (32,4) > Cr (26,8) > La (10,3) > Co (4,3) > Se (4,1) > As (2,9) > Cd (0,81). На основании таких значений даны рекомендации для практического использования. Установлено, что межвидовая разница в накопительной способности не является достоверно различимой и для определения элементного состава можно использовать фитопробы одного из 4-х исследованных модельных видов. В полевой практике рекомендуется сбор сразу всех ремедиантов для характеристики совокупной выборки накопления токсичных элементов.

В оценке успешности формирования устойчивого растительного покрова и соответственно фиторемедиационного эффекта наиболее распространенным критерием является проективное покрытие, сформированное растениями на единицу площади. Однако в функциональном подходе для степных участков, конечно, более важным показателем должен быть коэффициент задернения при формировании плотной преимущественно мятликовобобовой разнотравной заросли. Но для первых этапов заселения после резких механических нарушений поверхностного почвенно-растительного горизонта в результате боевых действий и на практике всё же показатель проективного покрытия закреплен как основной. Поэтому при создании возможных условий ускоренных сукцессионных преобразований видами аборигенной флоры важно учитывать критерий структурно-функциональной взаимодополняемости соседствующих видов при компактизации экологических ниш (рис. 5) и рациональном распределении ресурсов внутри сообщества, даже при условии его формирования на уровне локального природно-территориального комплекса. При этом на практике фиторекультивации (варианта фиторемедиации) важно учитывать не природные характеристики видов в их естественных условиях среды, а те характеристики, которые виды будут проявлять в конкретных изменённых условиях неспецифического (например, механической трансформации) или специфического (по сценарию одного из вариантов геохимической аномалии, рис. 5) стресса.

В треугольнике жизненных стратегий (рис. 5) *Cichorium intybus*, *Taraxacum officinale*, *Plantago major* и *Diploaxis*

*muralis* в своих трансформированных показателях адаптивных возможностей не являются друг другу прямыми конкурентами за комплексный ресурс жизнеобеспечения, поэтому могут в полной мере реализоваться по формированию большего количества требуемой биомассы для первых этапов восстановления экосистемы. По такому принципу обеспечивается средообразующая роль пионерного сообщества. При специальном занесении семенного материала в такой комбинации видов обеспечивается ускорение сукцессионных преобразований в 5-10 раз (2 года в эквиваленте 10-15 лет естественных процессов). Установлено, что при моделировании таких олиговидовых (или в дальнейшем поливидовых) сообществ и при формировании естественного барьера между токсичной почвой и открытым воздушным пространством для эмиссий и переноса на большие расстояния, устраняется нежелательный эффект инвазивности элементов адвентивной флоры, что значительно закрепляет успешность фиторемедиационных мероприятий.

### Заключение

С 2014 года по настоящее время природные системы Центрального Донбасса испытывают влияние нео-антропогенного фактора – глубоких трансформаций ландшафтных систем в результате боевых действий. Этот фактор имеет комплексный характер воздействия, диагностика его требует всестороннего детального анализа и дифференциации в ситуативных сравнениях в зависимости от силы и характера воздействий. Однозначным на сегодня является факт наличия ответной реакции у растительных организмов на действие полемостресса (нарушений в результате военного конфликта, полемики). Совокупность таких реакций во многом отражается в особенностях структурной пластичности индикаторных видов растений, которые, являясь аборигенными, стремятся сохранить за собой право выжить и сформировать следующее поколение в адаптированной версии к изменённым условиям среды. Эти характеристики используются экологами для разработки научно обоснованной системы восстановительных мероприятий на разных этапах эксплуатации территории и её целевого назначения в каждом конкретном случае.

Экспериментально доказано, что в условиях боевых действий формируются участки нео-патологического химического контраста, которые запускают цепные реакции адаптаций и изменения жизненных стратегий растений. В свою очередь возможность проведения фиторемедиации (её ускорения и контроля) обеспечивают лучший эффект для детоксикации свободно распространяющихся в окружающей среде загрязняющих элементов путём их вовлечения в биогеохимические циклы и нейтрализации их агрессивного состояния. Геохимическая аномалия с доминированием фосфора и сопутствующего ему загрязнителя лантана описана в настоящей работе для Донбасса впервые, что требует более детального анализа в будущем. В работе описана ландшафтная полевая диагностика и мониторинг уровня трансформации экотопов на постконфликтных территориях, а также предложен научно-обоснованный способ направления фиторемедиационных восстановительных работ. Такой способ в Донбассе наиболее экономически оправдан и технически возможен для осуществления в реальных современных условиях.

## ● Литература / References

1. Bezel' V.S., Zhuikova T.V., Gordeeva V.A., Goloushkina E.V. Biogeochemistry of Impact Regions: the Role of Edaphic and Phytocoenotic Environmental Factors. *Geochemistry International*. 2020;58(10):1135-1144.  
<https://doi.org/10.1134/S0016702920100043>  
<https://elibrary.ru/tvcivb>
2. Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Pogorelsky I.P., Leschenko A.A., Mironina A.Yu., Lobastov V.S., Senkin A.V. Bioremediation of technogenically degraded lands after the completion of a special military operation on the territory of new subjects of the Russian Federation. *Theoretical and Applied Ecology*. 2023;(2):209-217.  
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-2-209-217>  
<https://elibrary.ru/habfsm>
3. Kornienko V., Reuckaya V., Shkirenko A., Meskhi B., Olshevskaya A., Odabashyan M., Shevchenko V., Teplyakova S. Silvicultural and ecological characteristics of *Populus bolleana* Lauche as a key introduced species in the urban dendroflora of industrial cities. *Plants*. 2025;14(13).  
<https://doi.org/10.3390/plants14132052>  
<https://elibrary.ru/drdbqf>
4. Yang Z., Jiang L., Li X., Ji Q., Wang M., Zhang Yi., Cheng Yu., Zhang X., Li H., Feng Ch. Role of sludge biochar immobilized multifunctional microbiome in phytoremediation of lead-zinc composite pollution. *Biochar*. 2025;7(1):5.  
<https://doi.org/10.1007/s42773-024-00395-2>  
<https://elibrary.ru/izsqsq>
5. Opekunova M.G., Nikulina A.R., Opekunov A.Yu., Arestova I.Yu., Somov V.V., Kukushkin S.Yu., Lisenkov S.A. Transformations of the vegetation cover on the Southern Kuril Islands under the impact of natural and anthropogenic factors. *Contemporary Problems of Ecology*. 2024;17(3):360-378.  
<https://doi.org/10.1134/s1995425524700227>  
<https://elibrary.ru/lavbkn>
6. Golubev F., Jovanović L., Ermakov V., Degtyarev A. Peculiarities of Heavy Metals Accumulation by *Cladochaeta candidissima* Under Conditions of the Polymetallic Biogeochemical Provinces in the Territory of the North Ossetia. *Ecologica*. 2025;32(117):9-14.  
<https://doi.org/10.18485/ecologica.2025.32.117.2>
7. Worku A., Ayalew S. Review on drivers of deforestation and associated socio-economic and ecological impacts. *Vegetable Crops of Russia*. 2024;(3):112-119.  
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-3-112-119>  
<https://elibrary.ru/nlbotk>
8. Zagornaya T.O., Treshchevsky Yu.I., Dolbnya N.V. Institutional support for the development of the Donbas: a retrospective analysis performed upon the inclusion of the region into the Russian Federation. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*. 2023;(4):46-59.  
<https://doi.org/10.17308/econ.2023.4/11685>  
<https://elibrary.ru/imzhzf>
9. Kornienko V., Shkirenko A., Reuckaya V., Meskhi B., Dzhedirov D., Olshevskaya A., Odabashyan M., Shevchenko V., Mangasarian D., Kulikova N. *Taxus baccata* L. under changing climate conditions in the steppe zone of the East European Plain. *Plants*. 2025;14(13).  
<https://doi.org/10.3390/plants14131970> <https://elibrary.ru/utzuc>
10. Poinas I., Meynard Ch.N., Fried G. Plant Species Better Adapted to Climate Change Need Agricultural Extensification to Persist. *Ecology Letters*. 2025;28(2):70030.  
<https://doi.org/10.1111/ele.70030>  
<https://elibrary.ru/gqfuoc>
11. Worku A. The Role of Agroforestry in Ecosystem Services and Mitigation of Climate Change. *Vegetable Crops of Russia*. 2024;(4):111-119.  
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-4-111-119>  
<https://elibrary.ru/ibwncb>
12. Suleymanov R., Suleymanov A., Zaitsev G., Adelmurzina I., Galiakhmetova G., Abakumov E., Shagaliev R. Assessment and Spatial Modelling of Agrochernozem Properties for Reclamation Measurements. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;(9):13-5249.  
<https://doi.org/10.3390/app13095249>  
<https://elibrary.ru/yjpfpo>
13. Korniyenko V.O., Kalaev V.N. Impact of natural climate factors on mechanical stability and failure rate in silver birch trees in the city of Donetsk. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022;15(7):806-816.  
<https://doi.org/10.1134/s1995425522070150>  
<https://elibrary.ru/euvzmy>
14. Rouhani A., Skousen J., Tack F.M.G. An Overview of Soil Pollution and Remediation Strategies in Coal Mining Regions. *Minerals*. 2023;13(8):1064.  
<https://doi.org/10.3390/min13081064>  
<https://elibrary.ru/balvkz>
15. Yeprintsev S., Kurolap S., Klepikov O., Vinogradov P. Remote monitoring of factors determining the environmental safety of urban areas. *E3S Web of Conferences*. 2023;(389):03030.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338903030>  
<https://elibrary.ru/wpfksg>
16. Safonov A.I. A review of phytological assessment of anthropogenic ecotopes in Donbass: a review. *Theoretical and Applied Ecology*. 2025;(2):16-29.  
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2025-2-016-029>  
<https://elibrary.ru/yofktg>
17. Safonov A. Ecological phytomonitoring of anthropogenic transformations: monograph. Donetsk: Publishing house EDIT, 2024. 289 p.  
<https://elibrary.ru/qvjsqe>
18. Safonov A. Assessing landscape disturbance in Donbass using phytomonitoring data. *BIO Web of Conferences*. 2024;(126):1031.  
<https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601031>  
<https://elibrary.ru/vvpfdr>
19. Zinicovscaia I.I., Safonov A.I., Yushin N.S., Nespirnyi V.N., Germonova E.A. Phytomonitoring in Donbass for identifying new geochemical anomalies. *Russian Journal of General Chemistry*. 2024;94(13):3472-3482.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363224130048>  
<https://elibrary.ru/qxjump>
20. Zinicovscaia I., Safonov A., Kravtsova A., Chaligava O., Germonova E. Neutron activation analysis of rare earth elements (Sc, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb) in the diagnosis of ecosystems of Donbass. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2024;21(2):186-200.  
<https://doi.org/10.1134/S1547477124020158>  
<https://elibrary.ru/xytwui>
21. Mirnenko N.S. Pollen viability of some woody plants species in Donetsk agglomeration. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2022;26(6):55-61.  
<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-6-55-61>  
<https://elibrary.ru/ggmvxix>
22. Chufitskiy S., Romanchuk S., Meskhi B., Olshevskaya A., Shevchenko V., Odabashyan M., Teplyakova S., Vershinina A., Savenkov D. Assessment of surface water quality in the Krynkа river basin using fluorescence spectroscopy methods. *Plants*. 2025;14(13).  
<https://doi.org/10.3390/plants14132014>  
<https://elibrary.ru/mrtrh>
23. Nespirnyi V., Safonov A. The importance of principal component analysis for environmental biodiagnostics of Donbass. *E3S Web of Conferences*. 2024;(555):01007.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455501007>  
<https://elibrary.ru/eqegdi>

24. Mirnenko E.I. Content composition and dynamics of photosynthetic pigments in the reservoirs of the Kalmius River of the Donetsk People's Republic. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2024;79(4):267-273.  
<https://doi.org/10.3103/S009639252560022X>  
<https://elibrary.ru/wwyshx>
25. Neronov V.V., Chernitsova O.V., Koroleva T.V., Krechetov P.P. Contemporary state of vegetation in Baikonur Cosmodrome and estimate of its potential resistance to impact of space-rocket activities. *Arid Ecosystems*. 2012;2(3):186-196.  
<https://doi.org/10.1134/S2079096112030109>  
<https://elibrary.ru/feilzt>
26. Semenkov I., Koroleva T. Review on the environmental impact of emissions from space launches: a case study for areas affected by the Russian space programme. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(60):89807-89822.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-23888-8> <https://elibrary.ru/zqzsmc>
27. Guo W.Y., Čuda Ja., Skálová H., Lambertini C., Pierce S., Lučanová M., Brix H., Meyerson L.A., Pyšek P. Climate and genome size shape the intraspecific variation in ecological adaptive strategies of a cosmopolitan grass species. *Functional Ecology*. 2024.  
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.14613>  
<https://elibrary.ru/hupjut>
28. Logofet D.O., Kazantseva E.S., Belova I.N., Onipchenko V.G. How Long Does a Short-Lived Perennial Live? A Modeling Approach. *Biology Bulletin Reviews*. 2018;8(5):406-420.  
<https://doi.org/10.1134/s2079086418050043>  
<https://elibrary.ru/lrfmga>
29. Bai K., Li W., Lv Sh., Wei Sh., Xu X. Regulation of leaf elemental composition in a subtropical river basin with diverse forest landscapes. *Plant and Soil*. 2024.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-024-07039-1> <https://elibrary.ru/cgnfxo>
30. Elmas E., Türkiş S., Bani B. Relationship Between Plant Strategy Types and Soil Characteristics in Backdunes and Foredunes. *Estuaries and Coasts*. 2025;(3):48-76.  
<https://doi.org/10.1007/s12237-025-01512-5>  
<https://elibrary.ru/bogjgw>
31. Calbi M., Boenisch G., Boulangeat I., Bunker D., Catford J.A., Changenet A., Culshaw V., Dias A.S., Hauck T., Joschinski J., Kattge J., Mimet A., Pianta M., Poschold P., Weisser W.W., Roccoliello E. A novel framework to generate plant functional groups for ecological modelling. *Ecological Indicators*. 2024;(166):112370. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112370> <https://elibrary.ru/wwebsp>
32. Safonov A. Changes in plant CSR strategies under new anthropogenic transformations. *E3S Web of Conferences*. 2025;(614):04022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561404022> <https://elibrary.ru/scxinb>
33. Amin H., Ahmed Arain B., Jahangir T.M., Abbasi A.R., Abbasi M.S., Amin F. Comparative zinc tolerance and phytoremediation potential of four biofuel plant species. *International Journal of Phytoremediation*. 2023;25(8):1014-1028.  
<https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2125496>  
<https://elibrary.ru/acjhff>
34. Antoniadis V., Shaheen S.M., Stärk H.J., Wennrich R., Levizou E., Merbach I., Rinklebe J. Phytoremediation potential of twelve wild plant species for toxic elements in a contaminated soil. *Environment International*. 2021;(146):106233.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106233>  
<https://elibrary.ru/ynmjhq>
35. Kumar A., Tripti, Raj D., Maiti S.K., Maleva M., Borisova G. Soil Pollution and Plant Efficiency Indices for Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s: Two-Decade Study (2002–2021). *Metals*. 2022;12(8):1330. <https://doi.org/10.3390/met12081330> <https://elibrary.ru/myupup>
36. Raven J.A., Lambers H., Smith S.E., Westoby M. Costs of acquiring phosphorus by vascular land plants: patterns and implications for plant coexistence. *New Phytologist*. 2018;217(4):1420-1427.  
<https://doi.org/10.1111/nph.14967>  
<https://elibrary.ru/yfxlnr>
37. Feng L., Cao B. Plant-root-litter-soil C, N, P stoichiometry and plant phosphorus accumulation and utilization response to warming and phosphorus input in desert steppe. *Global Ecology and Conservation*. 2024;(56):e03266.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03266>  
<https://elibrary.ru/fkulmr>
38. Zhang X., Wang P., Mao H., Gao H., Li Q. Detection of the nutritional status of phosphorus in lettuce using thz time-domain spectroscopy. *Engenharia Agricola*. 2021;41(6):599-608. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n6p599-608/2021> <https://elibrary.ru/wbmqptn>
39. Sharma P., Jha A.B., Dubey R.Sh. Addressing lanthanum toxicity in plants: Sources, uptake, accumulation, and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*. 2024;(929):172560.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172560>  
<https://elibrary.ru/beaeqo>
40. Martina A., Ferroni L., Marrocchino E. The soil-plant continuity of rare earth elements: insights into an enigmatic class of xenobiotics and their interactions with plant structures and processes. *Journal of Xenobiotics*. 2025;15(2):46.  
<https://doi.org/10.3390/jox15020046>  
<https://elibrary.ru/hyomcg>
41. Vorob'ev V.N., Gorshkov V.Yu., Terentyev V.V., Islamov B.R., Kotov S.F., Nikolenko V.V., Yakushenkova T.P., Timofeeva O.A. Differences in the effect of light (La) and heavy (Yb) lanthanides on the efficiency of photosynthesis and accumulation of metabolites by Krim-Saghyz Dandelion (*Taraxacum hybernum*). *Russian Journal of Plant Physiology*. 2024;71(6):1-6. <https://doi.org/10.1134/S1021443724607067>  
<https://elibrary.ru/sralmx>
42. Kastori R., Maksimovic I., Putnik-Delic M. Rare earth elements in environment and effects on plants: A review scientific paper. *Matica Srpska Journal of Natural Sciences*. 2023;(144):51-72.  
<https://doi.org/10.2298/zmspn2344051k>  
<https://elibrary.ru/jkqyto>

**Об авторах:**

**Андрей Иванович Сафонов** – кандидат биологических наук, заведующий кафедрой ботаники и экологии Донецкого государственного университета (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донецкий государственный университет»), доцент, старший научный сотрудник НИЧ ДонГУ,  
<https://orcid.org/0000-0002-9701-8711>,

SPIN-код: 8396-6159, ResearcherID: IXN-8945-2023,

Scopus Author ID: 57210835692 andrey\_safonov@mail.ru

**Фёдор Вячеславович Голубев** – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН,  
<https://orcid.org/0000-0001-7401-5705>,  
 SPIN-код: 6311-8229, f.v.golubev@mail.ru

**About the Author:**

**Andrey I. Safonov** – Cand. Sci. (Biology), Head of the Botany and Ecology Department of Donetsk State University (DonSU), Associate Professor, Senior Researcher at the Research Institute of Donetsk State University,  
<https://orcid.org/0000-0002-9701-8711>,  
 SPIN-code: 8396-6159, ResearcherID: IXN-8945-2023,  
 Scopus Author ID: 57210835692, andrey\_safonov@mail.ru

**Fedor V. Golubev** – Cand. Sci. (Biology), Scientific Researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS (GEOKHI RAS); Laboratory of Environmental Biogeochemistry;  
<https://orcid.org/0000-0001-7401-5705>,  
 SPIN-code: 6311-8229, f.v.golubev@mail.ru