

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕВРОПЕЙСКИХ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ШКАЛ**Е.С. Золотова¹, Н.С. Иванова^{2*}¹ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия;² Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия* Эл. почта: i.n.s@bk.ru*Статья поступила в редакцию 05.07.2024; принята к печати 29.08.2024*

Исследование динамики растительности и взаимосвязей между факторами среды и фитоценозами – актуальная задача для целей устойчивого природопользования и сохранения биоразнообразия. С использованием методических рекомендаций PRISMA 2020 проведен обзор исследований динамики растительности, выполненных на основе экологических шкал Элленберга и Ландольта в период с 2019 по 2023 год. Анализ включал распределение публикаций по годам, странам, типам растительных сообществ, направлениям исследований, цитируемости и выявил особенности применения данных шкал. Установлена широкая география использования и высокая эффективность данных методов для решения широкого спектра актуальных задач. Выявлено, что для изучения лесных экосистем чаще применялись шкалы Элленберга, а для нарушенных ландшафтов и отдельных видов – шкалы Ландольта, одновременно с этим для лугов, болот и прибрежной растительности оба метода использовались почти с одинаковой частотой. Для оценки климатогенной и восстановительной динамики чаще применялись шкалы Ландольта, чем Элленберга. Достаточно много исследований направлено на изучение антропогенных изменений. Для этих целей чаще использовали шкалы Элленберга, однако шкалы Ландольта также давали хорошие результаты. Оценка цитируемости наглядно продемонстрировала высокий интерес к экологическим шкалам и их востребованность у исследователей. Результаты проведенного анализа будут способствовать дальнейшему развитию концепции экологических индикаторов, а также помогут исследователям ориентироваться в современном состоянии проблемы, понять сильные стороны экологических шкал Ландольта и Элленберга.

Ключевые слова: динамика растительности, шкалы Элленберга, шкалы Ландольта, мета-анализ, фитоиндикация.

**APPLICATION OF EUROPEAN ECOLOGICAL SCALES FOR VEGETATION DYNAMICS
ASSESSMENT**Ye.S. Zolotova¹, N.S. Ivanova^{2*}¹ Acad. A.N. Zavaritskiy Institute of Geology and Chemistry and ² Botanical Garden, Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, RussiaEmail: i.n.s@bk.ru

Studies of vegetation dynamics with account for relations between environmental factors and phytocenosis are important sustainable nature management and biodiversity maintenance. Based on PRISMA 2000 recommendations, a systematic review of vegetation dynamics studies using Ellenberg and Landolt in 2019 through 2023 has been carried out. The analysis included distributions of published studies numbers over years, countries, plant community types, study objectives, and citation rates. The scales proved to be used widely in the geographical terms and to be highly efficient for solving a wide range of topical problems. Ellenberg scales were used more often in studies of forest ecosystems, whereas Landolt scales, in studies of damaged landscapes and of separate species. In studies of disturbed meadows, marshes and costal vegetation, both scales were used at equal rates. In studies of climate-related and restorative dynamics, Landolt scale was used more often than Ellenberg scale. Many studies addressed the anthropogenic changes. Ellenberg scales were used more often in such cases; however, Landolt scales performance was good too. Citing rates show that the ecological scales are popular and in high demand among researchers. The results of the present analysis will facilitate further developments of the ecological indicator concept and be helpful in orientation in the current state of affairs in this field and in understanding the advantages of Landolt and Ellenberg scales.

Keywords: vegetation dynamics, Ellenberg scales, Landolt scales, meta-analysis, phytoindication.

Введение

Природные экосистемы по всему миру подвергаются возрастающему воздействию антропогенного фактора и изменению климата [74, 96]. Понимание динамики экосистем и системы взаимосвязей между средой обитания и биоценозами имеют ключевое значение для надежных прогнозов в области устойчивого природопользования, сохранения биоразнообразия и рисков экологических кризисов [28, 29, 43, 56, 104]. Оценка комплекса факторов окружающей среды, определяющих состав, структуру и динамику растительных сообществ [17, 54, 55, 82], чаще всего долгий, трудоемкий и дорогостоящий процесс. В связи с этим большой интерес представляет оценка местообитаний по значениям экологических показателей [34,

86, 105]. Они позволяют оценить совокупное воздействие факторов, поскольку связывают признаки растительности и градиенты ведущих факторов среды [107].

К настоящему времени разработаны десятки различных экологических индикаторов, которые имеют широкий спектр применения [1, 34, 53, 107]. Наиболее обширную географию использования имеют точечные европейские шкалы Г. Элленберга [40] и Э. Ландольта [65]. В странах постсоветского пространства популярны диапазонные экологические шкалы Л.Г. Раменского [9] и Д.Н. Цыганова [20]. Можно отметить исследование на основе шкал Раменского, посвященное фундаментальным проблемам растительных инвазий и трансформации экологических ниш растений [11], а также ряд работ, в которых эти шкалы используются для оценки факторов среды обитания [8, 15]. Шкалы Д.Н. Цыганова успешно применялись в лесотипологических исследованиях на Урале [5], при изучении светлых лесов подзоны южной тайги [3], травяных сосняков в Иркутской области [19], экологических режимов почв острова Сахалин [10], для фитоиндикации техногенного подтопления в зоне влияния полигона промышленных отходов [2] и сравнительной характеристики факторов организации сеgetальных сообществ Ленинградской области и республики Башкортостан [22]. Несмотря на хорошие результаты применения шкал Цыганова и Раменского для изучения растительности, у них сравнительно узкая география использования, и они мало представлены в мировых научных исследованиях.

Экологические шкалы Элленберга разработаны на основе полевых наблюдений преимущественно в Германии и Альпах [40]. Охарактеризовано 2494 растения по 6 факторам: освещенность, влажность, температура, континентальность климата, кислотность почвы, содержание азота. Отношение вида к влаге оценивается в 12 баллов, остальные параметры – в 9 баллов. Отдельно отмечено засоление почв по трехбалльной шкале.

Экологические шкалы Ландольта разработаны для флоры Швейцарии [65]. Охарактеризовано более 3400 растений [66] по 8 факторам. По шести факторам шкалы совпадают со шкалами Элленберга, но дополнительно есть шкалы по степени гранулированности (аэрации) и трофности почв. Каждый фактор оценивается пятью баллами, где 1 означает низкий, а 5 – высокий. Значения индикатора Ландольта используются реже, чем значения индикатора Элленберга [57]. Однако они наиболее эффективны при анализе альпийских сообществ [85].

Несмотря на то что точечные европейские шкалы Г. Элленберга и Э. Ландольта разработаны для Европы, они также достаточно широко используются в России. Здесь следует отметить публикации группы ученых из МГУ им. М.В. Ломоносова, посвященные оценке внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и подчиненных ярусов в еловых фитоценозах [12, 13] и индикационной роли травянистых растений в почвенно-экологических исследованиях [16]. Апробация шкал Ландольта проводилась для оценки факторов среды при изучении структуры и динамики растительности осушенного луга в условиях разной тепловлагообеспеченности [4], а также при исследованиях предгорных и горных широколиственных грабовых, дубово-грабовых и ясеневых лесов Северо-Западного Кавказа и их сравнительном анализе с лесными фитоценозами Центрального Кавказа (Грузия), севера Турции, Балкан и Крыма [21].

Точечные экологические шкалы, к которым относятся рассматриваемые европейские шкалы, представляют собой таблицы, где отношение вида к отдельным факторам выражено в виде балльной оценки, отражающей положение экологического оптимума вида на градиенте фактора. Окончательная оценка растительного сообщества по экологическим шкалам основана на оценках всех видов растений. Существуют разные методы расчета итогового балла [37], которые реализованы, в частности, в пакетах Vegan и BiodiversityR в свободной программной среде R, а также в разработанном отечественном программном продукте [7, 108].

Для того чтобы экологические шкалы успешно развивались дальше, необходимы в первую очередь анализ современного состояния проблемы и оценка эффективности различных шкал для исследования динамики растительности. Однако, несмотря на то что имеется ряд литературных обзоров, посвященных разным аспектам экологических шкал [24, 57, 67, 107], детальный систематический анализ исследований динамики растительности, реализованных с помощью экологических шкал, проведен не был.

В связи с этим мы поставили цель провести обзор исследований динамики растительности, выполненных на основе экологических шкал Элленберга и Ландольта за последние 5 лет, проанализировать современное состояние проблемы, оценить эффективность данных экологических индикаторов для решения поставленных задач и выявить их сильные стороны.

Материал и методика

При проведении исследований мы использовали методические рекомендации PRISMA [78] и методические рекомендации для экологических исследований [73]. Для поиска информации применялись следующие базы данных: ScienceDirect, Mendeley и Google Scholar. Поисковые запросы включали: «Landolt indicator value», «Landolt indicator values» и «Ellenberg indicator value», «Ellenberg indicator values». В качестве критерия качества использована индексация в базах данных Scopus и/или Web of Science. Литература проанализирована за последние 5 лет (2019–2023 годы). Для экологических шкал Элленберга

отобрано 170 статей, где они были в числе основных методов анализа. По экологическим шкалам Ландольта отобрано 70 статей. Информация (год публикации, авторы, название статьи и журнала, DOI, аннотация) об отобранных публикациях заносилась в Excel. Далее на основе названия и аннотации были отобраны публикации, посвященные динамике растительности. В итоге выбраны по Элленбергу 51 статья, а по Ландольту 26 статей. На рис. 1 показано распределение исследований по годам.

Сбор данных и заполнение таблицы в Excel проведено с 1 апреля по 20 мая 2024 года.

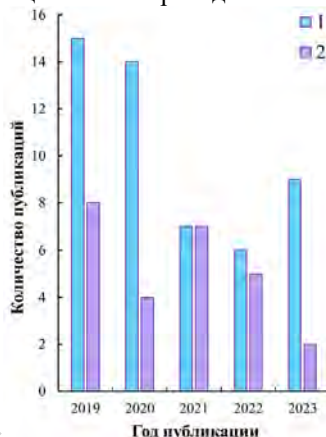


Рис. 1. Распределение по годам количества публикаций по динамике растительности, где использованы экологические шкалы Элленберга (1) и Ландольта (2)

Результаты и обсуждение

География и направления исследований

Проведенные ранее исследования [57, 107] показали, что экологические шкалы Элленберга и Ландольта хорошо себя зарекомендовали для решения различных задач: от классификации и ординации самой разнообразной растительности в различных климатических зонах и совершенствования методики оценки биогеоценозов до анализа экологических ниш отдельных видов растений (рис. 2).

Однако при том, что направления современных исследований с использованием экологических шкал Элленберга и Ландольта весьма разнообразны, наиболее часто они используются для изучения и анализа динамики растительности. Данной проблеме посвящено 37% всех исследований с использованием экологических шкал Ландольта и 32% исследований с использованием экологических шкал Элленберга.

Больше всего исследований по динамике растительности на основе экологических шкал Элленберга проводилось в Германии (18), а по экологическим шкалам Ландольта – в Швейцарии (10) (табл. 1). География исследований значительно шире по шкалам Элленберга, чем по шкалам Ландольта.



Рис. 2. Задачи, для которых используются экологические шкалы

Распределение стран по количеству проведенных исследований по динамике растительности с использованием экологических шкал Элленберга и Ландольта за 2019–2023 годы

Страна	Число исследований	
	Шкалы Элленберга	Шкалы Ландольта
Германия	18	0
Швейцария	0	10
Италия	4	5
Австрия	0	3
Словения	1	3
Россия	1	2
Чехия	4	0
Англия	3	0
Польша	3	0
Франция	2	1
Эстония	2	0
Словакия	2	0
Дания	2	0
Грузия	0	1

Примечание: Единичные исследования на основе шкал Элленберга проведены в Финляндии [83], Швеции [69], Венгрии [25], Испании [75], Литве [101], Бельгии [102] и на Мальте [97].

Исследования динамики растительности по экологическим шкалам проводились как для флоры больших территорий (с использованием шкал Элленберга – 12% общего числа исследований по данной шкале; с использованием шкал Ландольта – 31%), так и для отдельных типов растительности (табл. 2). Для изучения динамики лесных экосистем чаще всего использовались шкалы Элленберга [26, 39, 49, 81, 84]. Для лугов и пастбищ [58, 76, 89, 102], а также болот и прибрежной растительности [42, 48, 93, 97] оба метода применялись почти с одинаковой частотой. При помощи шкал Ландольта чаще оценивали динамику растительности нарушенных ландшафтов, например, карьеров [92], а также отдельных видов, таких как альпийские орхидеи [46] и плантации *Pinus nigra* [35]. Отдельно стоит упомянуть исследование по флоре городских территорий с использованием шкал Элленберга [45].

Табл. 2

Основные типы растительности, для которых исследована динамика с использованием экологических шкал за 2019–2023 годы

Растительные сообщества	Число исследований, % общего числа для каждой шкалы	
	Элленберг	Ландольт
Лесные экосистемы	39	15
Луга, пастбища	29	23
Болота и прибрежная растительность	14	12
Нарушенные ландшафты	2	8
Отдельные виды	0	8

Экологические шкалы Элленберга и Ландольта хорошо зарекомендовали себя для изучения многолетней динамики различных растительных сообществ, например, двадцатилетней динамики на средиземноморских альпийских пастбищах [103], изменения биоразнообразия мохообразных в лесах Англии с 1800 по 2022 год [32], сопоставление палинологического богатства и филогенетического разнообразия на протяжении 10 000-летней истории болот Сааремаа (Эстония) [27], реконструирование окружающей среды в голоцене [80].

Для оценки климатогенной динамики чаще используются шкалы Ландольта [33, 47, 60, 68, 88, 91, 94, 98], чем Элленберга [39, 70, 97]. Под воздействием изменения температур изучена трансформация растительности: лесной [39, 94], луговой [68] и водно-болотной [97], субарктической [60] и субальпийской [98].

Проведено моделирование будущих климатических и антропогенных изменений на основе выборки из 1095 видов растений Северной Италии, характерных и для южноевропейской растительности [33]; рассчитано вымирание и колонизация 135 видов из Европейских Альп при сравнении модели распределения видов с повторно обследованными участками [88]. Проанализирована выживаемость популяции, тенденции в численности и динамика изменения ареала альпийских орхидей за 28 лет на всем диапазоне высот (66–2970 м) в одной из горячих точек растительного разнообразия Европы (Италия, Трентино) [47], а также оценены флористические сдвиги в течение XX века на основе исторической (1900–1930 годы) и текущей (2000–2017 годы) флористической съемки кантона Цюрих, Швейцария [91]. Для изучения влияния климата

на изменения в составе разных типов растительных сообществ Франции за 2009–2017 годы вычислялись средние тепловые предпочтения сообществ на основе шкал Элленберга [70]. Отдельно стоит упомянуть исследование с использованием линейных смешанных моделей по изучению влияния микроклимата на видовой состав и реакцию на засуху растительности известковых лугов [71].

Достаточно много исследований по динамике растительности посвящено антропогенным изменениям, чаще для таких целей использовали шкалы Элленберга [30, 51, 62, 72, 76, 87, 106]. Однако шкалы Ландольта тоже давали хорошие результаты [58, 76, 77, 79], это направление исследований составило 15% общего числа исследований по динамике, сделанных с использованием данной шкалы за последние пять лет, а для Элленберга – 25%. Была исследована антропогенная трансформация лугов [31, 58, 72, 77, 79], лесов [62, 87, 95], влажных пустошей и болот [51, 72, 89] под влиянием хозяйственных мероприятий. Рассмотрено влияние известкования почв на насаждения сосны *Pinus sylvestris*, дуба *Quercus robur*, бука *Fagus sylvatica*, ели *Picea abies* за 25 лет [99]. Проанализировано изменение растительности и переменных окружающей среды с 1951 по 2016 год из-за постройки шлюза на реке Дове-Эльбе [23].

Восстановительным сукцессиям посвящено 31% исследований по шкалам Ландольта, а по шкалам Элленберга – 14% общего числа исследований по динамике по каждой из шкал. Например, с использованием шкал Элленберга изучено влияние сплошных рубок на восстановление прежней луговой растительности [44], восстановление пастбищ с помощью местных семян [61], проанализировано изменение лесного подлеска с 1993 по 2016 год в связи с изменением лесопользования и местными природными нарушениями (ветровалами) [64], обследованы пахотные растительные сообщества полей кукурузы, чтобы оценить изменения, произошедшие за 50 лет [41]. Шкалы Ландольта применялись для исследования естественного возобновления лесной растительности [35, 36, 63], пихты Дугласа в лесных насаждениях в Швейцарии [46], восстановления болот после прекращения выпаса [48], изучения долгосрочных эффектов восстановления растительности на оползневых склонах, карьерах [92] и для изучения влияния перемещения наносов на растительные сообщества [52]. Также стоит упомянуть интересное исследование по анализу влияния сукцессии известковых лугов на бабочек [50].

Анализ цитируемости

Проведенный нами анализ цитируемости наглядно продемонстрировал высокий интерес к экологическим шкалам и их востребованность у исследователей. Выявлено, что 93,5% статей, посвященных динамике растительности и выполненных с использованием экологических шкал за 2019–2023 годы, упоминались в других исследованиях хотя бы 1 раз (рис. 3). Кроме того, установлено наличие большого количества высокоцитируемых статей. Так, например, 58,4% статей цитировались 5 и более раз, а 37,7% – 10 и более раз. Процент статей с цитируемостью 20 и более также является очень высоким и составляет 18,2%. Отдельно следует отметить статьи с максимальной цитируемостью. На рис. 4 они сформировали обособленную группу из 4 статей. На них стоит обратить особое внимание. Наиболее активно (63 раза) цитируется статья коллектива австрийских авторов, посвященная динамике локальных ареалов нелесных растений в Европейских Альпах в связи с климатическими сменами [88]. Авторы сравнили модели распределения 135 видов растений с полевыми данными. Исследование имеет масштабный характер: было обследовано 1576 участков, расположенных в Австрии, Швейцарии, Италии, Словении и Германии. В результате установлено, что 60% изученных видов не исчезли на всех участках, которые модели классифицировали как непригодные, а 38% видов не смогли заселить все участки, которые, согласно моделям, стали пригодными для их произрастания. В целом 93% видов показали по крайней мере один тип запаздывающего ответа. При этом авторы подчеркнули, что они включили в анализ только наиболее часто встречающиеся виды и сделали предположение, что полученные ими цифры, характеризующие эффект запаздывания, могут быть заниженными. Данное исследование несомненно имеет большое значение как для развития концепции экологических индикаторов, так и для совершенствования концептуальных основ теории динамики растительных сообществ, их уязвимости и устойчивости.

Вторая по цитируемости статья (57 цитирований) выполнена коллективом авторов из Германии, Великобритании и Нидерландов и посвящена моделированию смен растительности различных типов полустепных лугов в Западной и Центральной Европе [38]. Это исследование представляет собой мета-анализ повторных исследований растительности. Авторы проанализировали 23 набора данных, включая 13 наборов данных по влажным лугам, 6 по сухим лугам и 4 по другим типам лугов. Период между исследованиями варьировал до 75 лет. При этом эдафические условия оценивались по средним значениям индикаторов Элленберга для влажности почвы, азоту и pH. Результаты исследований подтвердили повсеместное ухудшение состояния полустепных лугов, при этом наибольшая уязвимость выявлена у высокопродуктивных лугов. Выявлено, что основными причинами смен растительности являются внесение удобрений и выпадение азота. Полученные результаты важны для устойчивого использования пастбищ.

Третье место по цитируемости (49 цитирований) занимает статья коллектива авторов из Германии и Швейцарии, посвященная изучению устойчивости пастбищ к высокой интенсивности землепользования [31]. В результате исследований было установлено, что 34% видов растений отрицательно реагируют на высокую интенсивность землепользования и только 10% видов проявляют положительную взаимосвязь.

Также выявлено, что внесение удобрений и частота скашивания являются основными факторами, трансформирующими структуру пастбищ, при этом влияние интенсивности выпаса менее выражено.

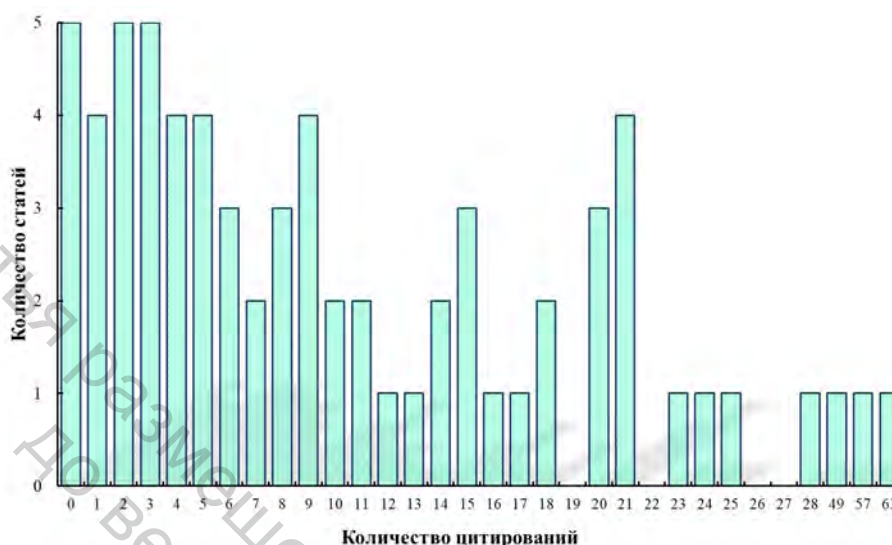


Рис. 3. Распределение по цитируемости статей, посвященных динамике растительности, выполненных с использованием экологических шкал за 2019–2023 годы

Четвертое место среди наиболее цитируемых статей (28 цитирований) принадлежит исследованию влияния ветровалов на адаптацию растительности к более теплему климату, которое провели ученые из Франции [39]. На основе флористических исследований (139 постоянных пробных площадей), проведенных в 2002 и 2018 годах в лесах, пострадавших от ветровалов 1999 года, авторы оценили изменения растительных сообществ в окнах полога древостоя по сравнению с ненарушенными лесными участками. Для каждой пробной площади были рассчитаны температурный индекс сообщества и индекс освещенности сообщества со значениями видового оптимума температуры и светового индикатора Элленберга соответственно. Авторы доказали, что температурный индекс сообщества значительно увеличился за исследуемый временной период (в среднем на 0,11 °C за десятилетие). В тот же период индекс освещенности сообщества снизился, что указывает на то, что термофилизация сообщества не была прямым результатом образования окон в пологе древостоя. Сравнение окон в пологе древостоя и ненарушенных участков на основе разработанных авторами моделей показало, что после восстановления полога термофилизация в окнах полога древостоя выражена сильнее в горах (+0,54 °C), чем на равнинных участках (+0,12 °C). Анализ видового состава и экологических ниш видов позволил авторам сделать вывод о том, что различия между восстановившейся в окнах полога лесной растительностью и растительностью ненарушенных лесов связана с инвазией адаптированных к теплу видов и сокращения количества видов, адаптированных к холоду. Авторы доказали, что режим нарушений играет ключевую роль в адаптации лесных сообществ к потеплению климата. Данный вывод является важным для лучшего понимания механизмов адаптации фитоценозов.

Таким образом, за последние пять лет с использованием экологических шкал проведены интересные и разноплановые исследования динамики растительности. Высокая цитируемость доказывает их теоретическую и практическую значимость, а также позволяет предположить, что экологические шкалы будут активно развиваться дальше на основе непрерывно получаемых новых результатов высокого научного уровня.

Проблемы исследования динамики растительности с использованием экологических шкал

1. Обширные многолетние исследования структуры и динамики растительных сообществ и создание различных геоботанических баз данных привело научное общество к эпохе больших экологических массивов информации. С одной стороны, это делает возможным получение более точных региональных оценок и прогнозов динамики растительных сообществ, повышение эффективности природопользования и охраны природы, а также позволяет перейти на новый уровень исследований: трансконтинентальный и глобальный. С другой стороны, остро ощущается недостаток соответствующих методов анализа. Остается открытым вопрос, насколько широко в географическом плане можно использовать экологические шкалы. Современные исследования показали, что география применения экологических шкал Элленберга и Ландольта расширяется. Однако их эффективность недостаточно доказана для исследований на уровне Евразии. Здесь исследователи сталкиваются с проблемой трансформации экологических ниш в различных биоклиматических зонах [11]. Это общеизвестно. Тем не менее, масштабы трансформации экологических

ниш по-прежнему остаются недостаточно изученными, особенно для техногенных ландшафтов. Понимание трансформации экологических ниш стимулирует проведение корректировок имеющихся и разработку новых региональных экологических шкал с внесением соответствующих поправок. Причем, если страны находятся недалеко от европейских стран, для которых разработаны шкалы Элленберга и Ландольта, то поправки могут быть относительно небольшие, в отличие от тех, которые необходимо вносить в более удаленных регионах, в том числе в России. Таким образом, с одной стороны, разработка региональных экологических шкал позволяет существенно повысить их эффективность в пределах отдельного региона, а другой, осложняет сравнение результатов исследований для разных стран. Кроме того, использование региональных шкал затрудняет переход к анализу больших территорий, для которого требуется применение единых экологических шкал на всей территории исследования.

2. Изменение видового состава происходит постепенно и не всегда четко следует за трансформацией среды обитания. Эффект запаздывания проявляется как для появления новых видов, более приспособленных к изменившимся условиям, так и к исчезновению видов, для которых условия среды стали малоприспособленными [88]. Однако каких-либо точных количественных оценок, характеризующих время запаздывания, не существует. Кроме того, можно предположить, что данный эффект будет зависеть от биоклиматической зоны, разных типов воздействий и многих других факторов.

3. Изменение климата может привести к сложным изменениям в видовом составе, пространственной структуре, экологических процессах и функциональных услугах фитоценозов и исказить естественный ход восстановительных и дигрессивных сукцессий. Несмотря на то, что синергетические эффекты от наложения различных типов динамики, несомненно, имеют место, данная проблема остается мало изученной. Более того, синергетические эффекты значительно затрудняют исследование как климатической динамики, так и восстановительных и дигрессивных сукцессий. Разумеется, что при использовании экологических шкал данную проблему необходимо учитывать, так как есть вероятность получения ложных выводов. Однако ответов на данные вопросы современные исследования не предоставляют.

4. В проанализированных нами исследованиях на основе экологических шкал не была затронута проблема конвергенции растительных сообществ. В обзоре, посвященном российским лесным типологиям, подчеркивалось, что данное явление проявляется очень часто как на вырубках, так в коренных и производных лесах [18]. На вырубках и гарях это связано с тем, что однотипные внешние воздействия сходным образом трансформируют среду обитания, и в различных лесорастительных условиях формируются физиономически сходные растительные сообщества. С другой стороны, в коренных и производных лесах четко проявляется влияние эдификатора, который оказывает влияние на видовой состав и структуру подчиненных ярусов, и фитоценозы приобретают физиономическое сходство в различных местообитаниях. Разумеется, что видовые составы данных растительных сообществ не идентичны, но на сегодняшний момент не проведена количественная оценка степени варьирования конвергенции растительных сообществ. Также мы не нашли сведений, насколько данное явление осложняет фитоиндикацию среды обитания на основе экологических шкал.

5. Вышеперечисленные проблемы приводят к сложности построения эффективных моделей динамики растительности. Прогнозирование динамики растительности, например, на основе моделей процессов или машинного обучения, требует большого количества точных и репрезентативных данных для обучения алгоритмов и проверки параметров. Причем данные должны быть получены по одинаковым методикам. Текущая нехватка высококачественных наборов данных мониторинга, эффекты запаздывания, конвергенция растительных сообществ и синергетические эффекты снижают точность имеющихся моделей и, соответственно, прогнозов. Это осложняет разработку системы устойчивого природопользования и сохранения биоразнообразия, а также требует дополнительных исследований.

Приоритетные направления дальнейших исследований

Совершенствование методов оценки факторов среды и мониторинга, а также реализации перехода от изучения исторических и современных условий к прогнозам на будущее остаются актуальными и востребованными направлениями. В связи с этим, на наш взгляд, является перспективным совершенствование существующих экологических шкал на основе критериев научности, сопоставимости, точности (в том числе для больших территорий) и чувствительности к изменениям. Поэтому для будущих исследований приоритетными могут быть следующие направления.

1. Устранение существующих пробелов в изучении растительности. Так как точные количественные данные являются основой для экологического анализа, необходимы дальнейшие масштабные многолетние исследования по сбору данных о структуре и динамике растительности, а также факторах среды обитания, дополнение имеющихся баз данных и создание новых. Если для стран Евросоюза таких данных накоплено уже достаточно для глубокого экологического анализа, то на карте Российской Федерации еще очень много «пустых зон», которые только предстоит заполнить. Данная работа потребует много усилий. Однако она остро необходима для создания надежной основы для дальнейших исследований.

2. Проверка эффективности и разработка методики корректировки экологических шкал для разных биоклиматических зон и типов растительности. Здесь в качестве примера можно привести исследование

большого международного коллектива авторов по разработке новейшей шкалы Ecological Indicator Values for Europe (EIVE) [34]. Авторы постарались использовать все известные экологические шкалы и их региональные варианты, содержащие оценки растений относительно положения их экологической ниши (а потенциально, и ширины ниши) по экологическим градиентам. В итоге они использовали 31 экологическую шкалу, в том числе шкалы Элленберга, Ландольта, Цыганова, Раменского и другие. EIVE на сегодняшний день является наиболее полной системой значений экологических показателей для европейских сосудистых растений и включает данные по 14 714 таксонам для влажности почвы (M), 13 748 таксонам для азота (N), 14 254 таксонам для кислотности почвы (R), 14 054 таксонам для освещенности (L) и 14 496 таксонам для температуры (T). Другим примером скрупулезного и масштабного исследования является разработка экологических шкал для почти 9000 европейских таксонов сосудистых растений на основе экологических шкал Элленберга [100]. Однако проверки эффективности данных шкал для территорий Российской Федерации проведены не были. Устранение данного пробела является одной из актуальных задач. Для России проверка применимости, эффективности и сопоставимости оценок была проведена для экологических шкал Цыганова, Элленберга и Ландольта [6]. Авторы выявили, что, несмотря на разницу диапазонов балловых значений у различных шкал, нормированные значения соответствующих показателей оказались сопоставимыми и в целом дали хорошие результаты для изучения сукцессий в сосняке сложном (*Pineta sylvestris composita (nemoro-boroherbosa)*) подзоны хвойно-широколиственных лесов. Оценки факторов среды на основе всех трех шкал коррелировали в процессе сукцессий. Апробация шкал Раменского, Цыганова и Ландольта для условий Воронежской области выполнена на примере изучения послепожарных сукцессий [14]. Авторы получили положительный результат для всех трех тестируемых экологических шкал. Однако четких выводов о границах применимости данных шкал и необходимости корректировок исследователи не приводят. Поэтому, несмотря на положительные результаты по апробации шкал Элленберга, Ландольта, Цыганова и Раменского на территории Российской Федерации, данные проблемы требуют более тщательных и масштабных исследований для различных биоклиматических зон и типов растительных сообществ, особенно в техногенных ландшафтах.

3. Изучение эффектов запаздывания. Для этих целей необходимы специальные исследования с получением строго количественных данных о динамике как растительности, так и факторов среды обитания. Для реализации данного научного направления можно использовать опыт коллектива австрийских авторов [88].

4. Разработка прогнозных моделей динамики растительных сообществ. С одной стороны, данное направление даст надежную основу для природопользования и охраны природы, а с другой стороны, будет способствовать проверке качества и глубины понимания механизмов климатических и антропогенных смен растительности. Здесь важно понимание особенностей как трансформации экологических ниш, так и эффектов запаздывания в изменении видового состава в процессе климатических сдвигов и дигрессивно-демутационных сукцессий. Выявление особенностей и разработка обоснованных строгих количественных корректировок дадут ключ к успешному прогнозированию динамики растительности при различных будущих сценариях изменения климата.

Заключение

Мета-анализ исследований за 2019–2023 годы, проведенных по динамике растительности на основе экологических шкал Ландольта и Элленберга, показал широкую географию использования и высокую эффективность данных методов для решения широкого спектра актуальных задач. Анализ включал распределение публикаций по годам, странам, типам растительных сообществ, направлениям исследований, цитируемости и выявил особенности применения данных шкал. Например, география исследований продолжает оставаться более широкой для шкал Элленберга, чем для шкал Ландольта; кроме того, для изучения динамики лесных экосистем чаще применялись шкалы Элленберга, а для нарушенных ландшафтов и отдельных видов – шкалы Ландольта; вместе с тем, для лугов, болот и прибрежной растительности оба метода использовались почти с одинаковой частотой. Для оценки климатогенной динамики чаще применялись шкалы Ландольта, чем Элленберга. Достаточно много исследований направлено на изучение антропогенных изменений, чаще для этих целей использовали шкалы Элленберга, однако шкалы Ландольта тоже давали хорошие результаты. Восстановительным сукцессиям посвящен 31% исследований общего количества публикаций по шкалам Ландольта, а по шкалам Элленберга – 14%. Проведенный нами анализ цитируемости наглядно продемонстрировал высокий интерес к экологическим шкалам и их востребованность у исследователей.

Результаты проведенного анализа будут способствовать дальнейшему развитию концепции экологических индикаторов, а также помогут исследователям ориентироваться в современном состоянии проблемы, понять сильные стороны экологических шкал Ландольта и Элленберга.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (тема № НИОКТР 123011800011-2) и государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Бузук ГН. Определение экологического пространства растительных сообществ методом идеального индикатора с помощью объединенных европейских экологических шкал Н. Ellenberg. Вестник фармации. 2023;2(100):72-81. doi: 10.52540/2074-9457.2023.2.72.
2. Гусев АП. Фитоиндикаторы техногенного подтопления в зоне влияния полигона промышленных отходов. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2015;(1):128-31.
3. Ефимова СН, Домнина ЕА. Использование шкал Д.Н. Цыганова для оценки условий местообитаний растений соснового леса в подзоне южной тайги. Вестник современных исследований. 2018;5(1):17-19.
4. Захарова ОА. Экологические особенности лугового фитоценоза на осушительном объекте. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2021;13(1):12-18. doi: 10.36508/RSATU.2021.49.1.002.
5. Золотова Е., Иванова Н.С. Использование шкал Д.Н. Цыганова для анализа экологического пространства типов леса Среднего Урала. Фундаментальные исследования. 2015;2(23):5114-9.
6. Зубкова ЕВ, Андреева МВ, Припутина ИВ. Изменения видового состава и экологических условий в сосняке сложном подзоны хвойно-широколиственных лесов в условиях заповедного режима. Биосфера. 2020;12(4):214-22. doi: 10.24855/biosfera.v12i4.563.
7. Зубкова ЕВ, Ханина ЛГ, Грохлина ТИ, Дорогова ЮА. Компьютерная обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам с помощью программы EcoScaleWin. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет; 2008.
8. Лапенко НГ. Эколого-ценотические аспекты формирования степных фитоценозов. Сельскохозяйственный журнал. 2023;2(16):37-44. doi: 10.48612/FARC/2687-1254/004.2.16.2023.
9. Раменский ЛГ, Цаценкин ИА, Чижиков ОН, Антипин НА. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз; 1956.
10. Рожкова-Тимина ИО, Шепелева ЛФ. Экологические режимы почв и их агрохимические свойства в южной части острова Сахалин. Достижения науки и техники АПК. 2023;37(10):10-4. doi: 10.53859/02352451_2023_37_10_10.
11. Селедец ВП. Трансформация экологических ниш видов растений в различных биоклиматических зонах (Приморский край, Дальний Восток России). Растительный мир Азиатской России: Вестник Центрального сибирского ботанического сада СО РАН. 2019;(1):84-90. doi: 10.21782/RMAR1995-2449-2019-1(84-90).
12. Семенюк ОВ, Телеснина ВМ, Богатырев ЛГ, Бенедиктова АИ, Кузнецова ЯД. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях. Почвоведение. 2020;(1):31-43. doi: 10.31857/S0032180X2001013X.
13. Семенюк ОВ, Телеснина ВМ, Богатырев ЛГ, Бенедиктова АИ. Подстилки еловых насаждений в пределах мегаполиса как объект экологического мониторинга. Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023;(1):36-45. doi:10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-36-45.
14. Стародубцева ЕА, Ханина ЛГ. Послепожарная сукцессия в сосняках черничниках Воронежского заповедника. Фиторазнообразие Восточной Европы. 2023;17(3):187-212. doi: 10.24412/2072-8816-2023-17-3-187-212.
15. Таран ГС, Тюрин ВН. *Mentha arvensis-Rorippetum amphibiae*, новая ассоциация из пойм Оби и Иртыша, и ее экологическая характеристика. Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. 2023;3(47):108-27. doi: 10.32516/2303-9922.2023.47.7.
16. Телеснина ВМ, Семенюк ОВ. Индикационная роль травяного яруса в почвенно-экологических исследованиях в условиях ухода за озелененными территориями г. Москвы (на примере территории МГУ). Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2022; (1):42-51.
17. Федоров НИ, Жигунова СН, Мартыненко ВБ, Широких ПС, Михайленко ОИ. Влияние климата и рельефа на распространение лесных сообществ в разных ботанико-географических районах южно-уральского региона. Экология. 2022;(6):411-20. doi: 10.31857/S036705972206004X.
18. Фомин ВВ, Иванова НС, Залесов СВ, Попов АС, Михайлович АП. Лесные типологии в Российской Федерации. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023;6:9-30. doi: 10.37482/0536-1036-2023-6-9-30.
19. Харпухаева ТМ, Афанасьева ЛВ, Калугина ОВ. Ценофлора травяных сосняков Тайшетского и Братского районов Иркутской области. Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2023;44:37-52. doi: 10.26516/2073-3372.2023.44.37.
20. Цыганов ДН. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука; 1983.
21. Шевченко НЕ, Браславская ТЮ. Широколиственные леса Северо-Западного Кавказа. I. Порядок *Carpinetalia betuli* Р. Fukarek 1968. Растительность России. 2021;(42):118-45. doi: 10.31111/vegrus/2021.42.118.

22. Ямалов СМ, Лебедева МВ, Лунева НН, Хасанова ГР, Шигапов ЗХ. Сравнительная характеристика факторов организации сегетальных сообществ Ленинградской области и республики Башкортостан. Самарский научный вестник. 2019;8(3):92-8. doi:10.17816/snv201983116.

Общий список литературы/References

1. Buzuk GN. [Determination of ecological environment of plant coenoses by the ideal indicator method using combined European ecological Ellenberg-type indicator values]. Vestnik Farmatsii. 2023;2(100):72-81. doi: 10.52540/2074-9457.2023.2.72. (In Russ.)
2. Gusev AP. [Phytoindicators of technogenic flooding in the impact zone of dump of industrial wastes]. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta Ser Geol. 2015;(1):128-31. (In Russ.)
3. Yefimova SN, Domnina EA. [Using D.N. Tsyganov scales for assessing the habitat conditions of pine-forest plants in the southern taiga subzone]. Vestnik Sovremennykh Issledovaniy. 2018;5(1):17-9. (In Russ.)
4. Zakharova OA. [Ecological features of meadow phytocenosis at a draining facility]. Vestnik Riazanskogo Gosudarstvennogo Agrotehnologicheskogo Universiteta im PA Kostycheva. 2021;13(1):12-8. doi: 10.36508/RSATU.2021.49.1.002. (In Russ.)
5. Zolotova Ye, Ivanova NS. Using DN. [Tsyganov's scales for analysis of the ecological space of forest types in Middle Urals]. Fundamentalnye Issledovaniya. 2015;2(23):5114-9. (In Russ.)
6. Zubkova YeV, Andreyeva MV, Pripulina IV. [Changes in species composition and ecological conditions in a complex pine forest of the coniferous-deciduous forests subzone under the nature reserve regimen]. Biosfera. 2020;12(4):214-22. doi: 10.24855/biosfera.v12i4.563.
7. Zubkova YeV, Khanina LG, Grokhlina TI, Dorogova YuA. Kompyuternaya Obrabotka Geobotanicheskikh Opisaniy po Ekologicheskim Shkalam s Pomoshchyu Programmy EcoScaleWin. [Computer Processing of Geobotanical Descriptions According to Ecological scales using the program EcoScaleWin]. Yoshkar-Ola; Mariyskiy Gosudarstvennyi Univarsitet; 2008. (In Russ.)
8. Lapenko NG. [Ecological and coenotic aspects of the steppe phytocoenosis formation]. Selskokhosiaystvennyi Zhurnal. 2023;2(16):37-44. doi: 10.48612/FARC/2687-1254/004.2.16.2023. (In Russ.)
9. Ramensky LG, Tsatsenkin IA, Chizhikov ON, Antipin NA. Ekologicheskaya Otsenka Kormovykh Ugodiy po Rastitelnomu Pokrovu. [Ecological Assessment of Fodder Lands by Vegetation Cover]. Moscow: Selkhozgiz; 1956. (In Russ.)
10. Rozhkova-Timina IO, Shepeleva LF. [Ecological regimes of soils and their agrochemical properties in the southern part of Sakhalin Island]. Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK. 2023;37(10):10-4. doi: 10.53859/02352451_2023_37_10_10.
11. Seledets VP. [Transformation of ecological niches of plant species in different bioclimatic zones (Primorskiy Kray, Far East of Russia)]. Rasitelnyi Mir Aziatskoy Rossii. 2019;(1):84-90. doi:10.21782/RMAR1995-2449-2019-1(84-90). (In Russ.)
12. Semeniuk OV, Telesnina VM, Bogatyrev LG, Benediktova AI, Kuznetsova YaD. Assessment of intra-biogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub-herbaceous vegetation in spruce stands. Eurasian Soil Science. 2020;53(1):27-38. doi: 10.1134/S1064229320010135.
13. Semenyuk OV, Telesnina VM, Bogatyrev LG, Benediktova AI. [The litters of spruce stands within a megalopolis as an object of ecological monitoring]. Vetenik Moskovskogo Universiteta Ser 17 Pochvovedeniye. 2023;(1):36-45. doi:10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-36-45. (In Russ.)
14. Starodubtseva EaA, Khanina LG. Post-fire succession in blueberry pine forests of the Voronezh Nature Reserve. Phytodiversity of Eastern Europe. 2023;17(3):187-212. doi: 10.24412/2072-8816-2023-17-3-187-212.
15. Taran GS, Tyurin VN. [Mentho arvensis-Rorippetum amphibiae, a new association from the Ob and Irtysh floodplains, and its ecological characteristics]. Vetenik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta. 2023;3(47):108-27. doi: 10.32516/2303-9922.2023.47.7. (In Russ.)
16. Telesnina VM, Semeniuk OV. [The indicative role of the grass tier in soil-ecological research in the condition of caring for the green areas of Moscow (case study of the MSU territory)]. Vetenik Moskovskogo Universiteta Ser 17 Pochvovedeniye. 2022;(1):42-51.
17. Fedorov NI, Zhigunova SN, Martynenko VB, Shirokikh PS, Mikhaylenko OI. [Influence of climate and topography on the distribution of forest communities in different botanical and geographical areas of the South Ural region]. Ekologiya. 2022;(6):411-20. doi: 10.31857/S036705972206004X. (In Russ.)
18. Fomin VV, Ivanova NS, Zalesov SV, Popov AS, Mikhaylovich AP. [Forest typologies in the Russian Federation. Lesnoy Zhurnal]. 2023;6:9-30. doi: 10.37482/0536-1036-2023-6-9-30. (In Russ.)
19. Kharpukhayeva TM, Afanasyeva LV, Kalugina OV. [Coenofloras of Taishet and Bratsk Districts of the Irkutsk Region (East Siberia)]. Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta Ser Biol Ecol. 2023;44:37-52. doi: 10.26516/2073-3372.2023.44.37. (In Russ.)
20. Tsyganov DN. Fitoindikatsiya Ekologicheskikh Rezhimov v Podzone Khvoyno-Shirokolistvennykh Lesov. [Phytoindication of Ecological regimens in the Subzone of Coniferous-Deciduous Forests]. Moscow: Nauka; 1983. (In Russ.)

21. Shevchenko NE, Braslavskaya TYu. [Broad-leaved forests in the North-Western Caucasus. I. Order Carpinetalia betuli P. Fukarek 1968]. Rastitelnost Rossii. 2021;(42):118-45. doi: 10.31111/vegrus/2021.42.118.
22. Yamalov SM, Lebedeva MV, Luneva NN, Khasanova GR, Shigapov ZKh. [Comparison of weed communities organization factors in the Leningrad Region and the Republic of Bashkortostan]. Samarskiy Nauchiy Vestnik. 2019;8(3):92-8. doi:10.17816/snv201983116. (In Russ.)
23. Asdonk M, Lenzevski N, Jensen K, Ludewig K. Diversity decrease due to loss of tidal influence at the Dove Elbe River between 1951 and 2016. *Funct Ecol Plants*. 2019;258:151438. doi: 10.1016/j.flora.2019.151438.
24. Bartelheimer M, Poschlod P. Functional characterizations of Ellenberg indicator values – a review on ecophysiological determinants. *Funct Ecol*. 2016;30(4):506-16. doi: 10.1111/1365-2435.12531.
25. Bátor Z, Tölgyesi C, Li G, Erdős L, Gajdác M, Kelemen A. Forest age and topographic position jointly shape the species richness and composition of vascular plants in karstic habitats. *Ann Forest Sci*. 2023;80(1). doi: 10.1186/s13595-023-01183-x.
26. Baumann M, Dittrich S, Körner M, von Oheimb G. Temporal changes in the ground vegetation in spruce forests in the Erzgebirge (Ore Mountains)–bryophytes are better indicators of the impact of liming and of sulphur and nitrogen deposition than the herb layer. *App Vegetat Sci*. 2021;24(3):e12598. doi: 10.1111/avsc.12598.
27. Blaus A, Reitalu T, Poska A, Vassiljev J, Veski S. Mire plant diversity change over the last 10,000 years: Importance of isostatic land uplift, climate and local conditions. *J Ecol*. 2021;109(10):3634-51. doi: 10.1111/1365-2745.13742.
28. Bouchard E, Searle EB, Drapeau P, Liang J et al. Global patterns and environmental drivers of forest functional composition. *Glob Ecol Biogeogr*. 2024;33(2):303-24. doi: 10.1111/geb.13790.
29. Braun-Blanquet J. Pflanzensozologie. Grundzüge der Vegetationskunde. Berlin/Heidelberg: Springer; 1928.
30. Bruelheide H, Jansen F, Jandt U, Bernhardt-Römermann M, Bonn A, Bowler D, Dengler J, et al. Using incomplete floristic monitoring data from habitat mapping programmes to detect species trends. *Divers Distribut*. 2020;26(7):782-94. doi: 10.1111/ddi.13058.
31. Busch V, Klaus VH, Schäfer D, Prati D, Boch S, Müller J et al. Will I stay or will I go? Plant species-specific response and tolerance to high land-use intensity in temperate grassland ecosystems. *J Vegetat Sci*. 2019;30(4):674-86. doi: 10.1111/jvs.12749.
32. Callaghan DA, Gadsdon S. How basic bryophyte recording provides information on major changes in key conservation localities: a case study of Epping Forest, England, an internationally significant site. *J Bryol*. 2023;45(2):159-71. doi: 10.1080/03736687.2023.2229189.
33. Dalle Fratte M, Brusa G, Pierce S, Zanzottera M, Cerabolini BEL. Plant trait variation along environmental indicators to infer global change impacts. *Funct Ecol Plants*. 2019;254:113-21. doi: 10.1016/j.flora.2018.12.004.
34. Dengler J, Jansen F, Chusova O, Hüllbusch E, Nobis MP, Van Meerbeek K, et al. Ecological Indicator Values for Europe (EIVE) 1.0. *Vegetat Class Survey*. 2023;4:7-29. doi: 10.3897/VCS.98324.
35. Diaci J, Adamič T, Rozman A, Fidej G, Rožnberger D. Conversion of *Pinus nigra* plantations with natural regeneration in the Slovenian Karst: The importance of intermediate, gradually formed canopy gaps. *Forests*. 2019;10:e1136. doi: 10.3390/f10121136.
36. Diaci J, Rozman J, Rozman A. Regeneration gap and microsite niche partitioning in a high alpine forest: Are Norway spruce seedlings more drought-tolerant than beech seedlings? *Forest Ecol Manag*. 2020;455:e117688. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117688.
37. Diekmann M. Species indicator values as an important tool in applied plant ecology – A review. *Basic Appl Ecol*. 2003;4:493-506. doi: 10.1078/1439-1791-00185.
38. Diekmann M, Andres C, Becker T, Bennie J, Blüml V, Bullock JM et al. Patterns of long-term vegetation change vary between different types of semi-natural grasslands in Western and Central Europe. *J Vegetat Sci*. 2019;30(2):187-202. doi: 10.1111/jvs.12727.
39. Dietz L, Collet C, Dupouey JL, Lacombe E, Laurent L, Gégout JC. Windstorm-induced canopy openings accelerate temperate forest adaptation to global warming. *Glob Ecol Biogeogr* 2020;29:2067–77. doi: 10.1111/geb.13177.
40. Ellenberg H. Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas. Göttingen; 1974.
41. Fanfarillo E, Kasperski A, Giuliani A, Abbate G. Shifts of arable plant communities after agricultural intensification: a floristic and ecological diachronic analysis in maize fields of Latium (central Italy). *Bot Lett*. 2019;166(3):356-65. doi: 10.1080/23818107.2019.1638829.
42. Fogliata P, Cislighi A, Sala P et al. An ecological analysis of the riparian vegetation for improving the riverine ecosystem management: the case of Lombardy region (North Italy). *Landscape Ecol Eng*. 2021;17:375-86. doi: 10.1007/s11355-021-00451-0.
43. Fomin V, Ivanova N, Mikhailovich A, Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology. *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conf Proc*. 2021;2388:030007. doi: 10.1063/5.0068806.

44. Frantík T, Trylč L. Recovery of grassland after clear-cutting of invasive *Robinia pseudoacacia* – Long-term study in Prague (Czech Republic). *J Nat Conserv.* 2023;73:126420. doi: 10.1016/j.jnc.2023.126420.
45. Fratarcangeli C, Giuliano Fanelli G, Testolin R, Buffi F, Travaglini A. Floristic changes of vascular flora in the city of Rome through grid-cell census over 23 years. *Urban Ecosyst.* 2022;25:1851-64. doi: 10.1007/s11252-022-01293-w.
46. Frei ER, Moser B, Wohlgemuth T. Competitive ability of natural Douglas fir regeneration in central European close-to-nature forests. *Forest Ecol Manag.* 2022;503:119767. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119767.
47. Geppert C, Perazza G, Wilson RJ et al. Consistent population declines but idiosyncratic range shifts in Alpine orchids under global change. *Nat Comm.* 2020;11:5835. doi: 10.1038/s41467-020-19680-2.
48. Graf UH, Bergamini A, Bedoll A, Boch S, Küchler H, Küchler M, Ecker K. Regeneration potential of a degraded alpine mountain bog: complex regeneration patterns after grazing cessation and partial rewetting. *Mires Peat.* 2022;(28):01. doi: 10.19189/MaP.2021.SNPG.StA.2246.
49. Günther K, Schmidt M, Quitt H, Heinken T. Vegetation change in the forests between the Elbe and Havel rivers (NE Germany) from 1960 to 2015. *Tuexenia.* 2021;41:53-85. doi: 10.14471/2021.41.005.
50. Habel JC, Segerer AH, Ulrich W, Schmitt T. Succession matters: Community shifts in moths over three decades increases multifunctionality in intermediate successional stages. *Sci Rep.* 2019;9(1):5586. doi: 10.1038/s41598-019-41571-w.
51. Hájek M, Horsáková V, Hájková P, Coufal R, Dítě D, Němec T, Horsák M. Habitat extremity and conservation management stabilise endangered calcareous fens in a changing world. *Sci Total Environ.* 2020;719:134693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134693.
52. Haselberger S, Ohler L-M, Junker RR, Otto J-C, Glade T, Kraushaar S. Quantification of biogeomorphic interactions between small-scale sediment transport and primary vegetation succession on proglacial slopes of the Gepatschferner, Austria. *Earth Surf Process Landforms.* 2021;46:1941-52. doi: 10.1002/esp.5136.
53. Hellegers M, Ozinga WA, Hinsberg A, Huijbregts MAJ, Hennekens SM, Schaminée JHJ, Dengler J, Schipper AM. Evaluating the ecological realism of plant species distribution models with ecological indicator values. *Ecography.* 2020;43(1):161-70. doi: 10.1111/ecog.04291.
54. Ivanova N. Global overview of the application of the Braun-Blanquet approach in research. *Forests.* 2024;15:937. doi: 10.3390/f15060937.
55. Ivanova N, Petrova I. Species abundance distributions: Investigation of adaptation mechanisms of plant communities. *E3S Web Conf.* 2021;254:02003. doi: 10.1051/e3sconf/202125402003.
56. Ivanova N, Fomin V, Kusbach A. Experience of forest ecological classification in assessment of vegetation dynamics. *Sustainability.* 2022;14(6):3384. doi: 10.3390/su14063384.
57. Ivanova N, Zolotova E. Landolt indicator values in modern research: A review. *Sustainability.* 2023;15(12):e9618. doi: 10.3390/su15129618.
58. Jamin A, Peintinger M, Gimmi U, Holderegger R, Bergamini A. Evidence for a possible extinction debt in Swiss wetland specialist plants. *Ecol Evol.* 2020;10:1264-77. doi: 10.1002/ece3.5980.
59. Kaiser T, Ahlborn J. Long-term vegetation monitoring in the floodplain grasslands of the lower Havel Valley (northeastern Germany) and conclusions for sustainable management practices. *J Nat Conserv.* 2021;63:126053. doi: 10.1016/j.jnc.2021.126053.
60. Kapfer J, Popova K. Changes in subarctic vegetation after one century of land use and climate change. *J Veg Sci.* 2021;32:e12854. doi: 10.1111/jvs.12854.
61. Kaulfuß F, Rosbakh S, Reisch C. Grassland restoration by local seed mixtures: New evidence from a practical 15-year res-toration study. *App Veg Sci.* 2022;25(2):e12652. doi:10.1111/avsc.12652.
62. Kermavnar J, Marinšek A, Eler K, Kutnar, L. Evaluating short-term impacts of forest management and microsite conditions on understory vegetation in temperate fir-beech forests: Floristic, ecological, and trait-based perspective. *Forests.* 2019;10(10):909. doi: 10.3390/f10100909.
63. Khanina LG, Bobrovsky MV, Zhmaylov IV. Vegetation diversity on the microsites caused by tree uprooting during a catastrophic windthrow in temperate broadleaved forests. *Russ J Ecosyst Ecol.* 2019;4:1-17. doi: 10.21685/2500-0578-2019-3-1.
64. Klynge D, Svenning JC, Skov F. Floristic changes in the understory vegetation of a managed forest in Denmark over a period of 23 years – Possible drivers of change and implications for nature and biodiversity conservation. *Forest Ecol Manag.* 2020;466:118128. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118128.
65. Landolt E. *Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora.* Zurich: Veroff Geobot Inst ETH; 1977.
66. Landolt E, et al. *Flora indicativa. Ecological indicator values and biological attributes of the flora of Switzerland and the Alps.* Bern: Haupt-Verlag; 2010.
67. LaPaix R, Freedman B, Patriquin D. (2009). Ground vegetation as an indicator of ecological integrity. *Environ Rev.* 2009;17. doi: 10.1139/A09-012.
68. Liberati L, Messerli S, Matteodo M, Vittoz P. Contrasting impacts of climate change on the vegetation of windy ridges and snowbeds in the Swiss Alps. *Alpine Bot.* 2019;129:95-105. doi: 10.1007/s00035-019-00223-5.

69. Löfgren O, Hall K, Schmid BC, Prentice HC. Grasslands ancient and modern: Soil nutrients, habitat age and their relation to Ellenberg N. *J Veg Sci.* 2020;31(3):367-79. doi: 10.1111/jvs.12856.
70. Martin G, Devictor V, Motard E, MacHon N, Porcher E. Short-term climate-induced change in French plant communities. *Biol Lett.* 2019;15(7):0280. doi: 10.1098/rsbl.2019.0280.
71. Mazalla L, Diekmann M, Duprè C. Microclimate shapes vegetation response to drought in calcareous grasslands. *App Veg Sci.* 2022;25(3): e12672. doi: 10.1111/avsc.12672.
72. Mazalla L, Ludwig G, Pepler-Lisbach C. *Nardus* grasslands and wet heaths are affected differently by reintroduction of management and pH recovery. *Tuexenia* 2021;41:227-52. doi: 10.14471/2021.41.010.
73. Mengist W, Soromessa T, Legese G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environ-mental science research. *MethodsX.* 2020;7:100777 doi: 10.1016/j.mex.2019.100777.
74. Meng N, Wang NA, Cheng H, Liu X, Niu Z. Impacts of climate change and anthropogenic activities on the normalized difference vegetation index of desertified areas in northern China. *J Geogr Sci.* 2023;33(3):483-507. doi: 10.1007/s11442-023-2093-y.
75. Merle H, Garmendia A, Hernández H, Ferriol M. Vegetation change over a period of 46 years in a Mediterranean mountain massif (Penyagolosa, Spain). *Appl Veg Sci.* 2020;23(4):495-507. doi: 10.1111/avsc.12507.
76. Midolo G, Herben T, Axmanová I, Marcenò C, Pätsch R, Bruelheide H, et al. Disturbance indicator values for European plants. *Glob Ecol Biogeogr.* 2023;32(1): 24-34. doi: 10.1111/geb.13603.
77. Nicod C, Gillét F. Recent changes in mountain hay meadows of high conservation value in eastern France. *Appl Veg Sci.* 2021;24:e12573. doi: 10.1111/avsc.12573.
78. Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:160. doi: 10.1136/bmj.n160.
79. Pittarello M, Probo M, Perotti E. et al. Grazing management plans improve pasture selection by cattle and forage quality in sub-alpine and alpine grasslands. *J M. Sci.* 2019;16:2126-2135. doi: 10.1007/s11629-019-5522-8.
80. Poska A, Väli V, Vassiljev J, Alliksaar T, Saarse L. Timing and drivers of local to regional scale land-cover changes in the hemiboreal forest zone during the Holocene: A pollen-based study from South Estonia. *Quat Sci Rev.* 2022;277: 107351 doi: 10.1016/j.quascirev.2021.107351.
81. Prausová R, Doležal J, Rejmánek M. Nine decades of major compositional changes in a Central European beech forest protected area. *Plant Ecol.* 2020;221:1005-6. doi: 10.1007/s11258-020-01057-6.
82. Ramos MB, Maciel MGR, da Cunha SS, de Souza SM, Pedrosa KM, de Souza JLL, et al. The role of chronic anthropogenic disturbances in plant community assembly along a water availability gradient in Brazil's semiarid Caatinga region. *Forest Ecol Managt.* 2023; 538:120980. doi: 10.1016/j.foreco.2023.120980.
83. Rehell S, Laitinen J, Oksanen J, Siira OP. Mire margin to expanse gradient in part relates to nutrients gradient: Evidence from successional mire basins, north finland. *Mires Peat.* 2019;24:1-12. doi: 10.19189/MaP.2018.OMB.353.
84. Řepka R, Keclíková J, Šebesta J. Comparison of forest species-diversity and composition inside and outside of the Holedná Game Reserve (The City of Brno, Czech Republic). *J Landscape Ecol.* 2021;14:1–18. doi: 10.2478/jlecol-2021-0001.
85. Reutimann P, Billeter R, Dengler J. Effects of grazing versus mowing on the vegetation of wet grasslands in the northern Pre-Alps, Switzerland. *Appl Veg Sci.* 2023;26:e12706. doi: 10.1111/avsc.12706.
86. Rodríguez JP, Sucre B, Mileham K. et al. Addressing the biodiversity paradox: mismatch between the co-Occurrence of biological diversity and the human, financial and institutional resources to address its decline. *Diversity.* 2022;14(9):708. doi: 10.3390/d14090708.
87. Roth M, Müller-Meißner A, Michiels HG, Hauck M. Vegetation changes in the understory of nitrogen-sensitive temperate forests over the past 70 years. *Forest Ecology and Management.* 2022; 503:119754. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119754.
88. Rumpf SB, Hülber K, Wessely J et al. Extinction debts and colonization credits of non-forest plants in the European Alps. *Nat Commun.* 2019;10:4293. doi: 10.1038/s41467-019-12343-x.
89. Sand-Jensen K, Jørgensen H, Larsen JR. Long-term influence of hay-cutting on plant species richness, biodiversity and soil fertility in a Danish fen. *Ecol Engineering.* 2019;134:93-100. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.05.009.
90. Skálová H, Hadincová V, Krahulec F, Pecháčková S, Herben T. Dynamics of a mountain grassland: Environment predicts long-term trends, while species' traits predict short-term fluctuations. *J Veg Sci.* 2022;33:1. doi: 10.1111/jvs.13138.
91. Scherrer D, Bürgi M, Gessler A, Kessler M, Nobis MP, Wohlgemuth T. Abundance changes of neophytes and native species indicate a thermophilisation and eutrophication of the Swiss flora during the 20th century. *Ecol Indic.* 2022; 135:108558 doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108558.
92. Scotton M, Andreatta D. Anti-erosion rehabilitation: Effects of revegetation method and site traits on introduced and native plant cover and richness. *Sci Total Environ.* 2021;776:145915. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145915.

93. Smith PH, Lockford P. Fifteen years of habitat, floristic and vegetation change on a pioneer sand-dune and slack system at Ainsdale, north Merseyside, UK. *Brit Irish Bot.* 2021;3(2). doi: 10.33928/bib.2021.03.232.
94. Staubli E, Dengler J, Billeter R, Wohlgemuth T. Changes in biodiversity and species composition of temperate beech forests in Switzerland over 26 years. *Tuexenia.* 2021;41:87–108. doi: 10.14471/2021.41.007.
95. Tardella FM, Postiglione N, Tavoloni M, Catorci A. Changes in species and functional composition in the herb layer of sub-Mediterranean *Ostrya carpinifolia* abandoned coppices. *Plant Ecol.* 2019;220(11):1043-1055. doi: 10.1007/s11258-019-00973-6.
96. Tariq A, Graciano C, Sardans J, Zeng F, Hughes AC, Ahmed Z, et al. Plant root mechanisms and their effects on carbon and nutrient accumulation in desert ecosystems under changes in land use and climate. *New Phytologist* 2024;242(3):916-934. doi: 10.1111/nph.19676.
97. Tavilla G, Lamoliere A, Gabarretta J, Attard V, Henwood J, Stevens DT, et al. Climate change and wetland ecosystems: the effects on halophilous vegetation diversity in Il-Ballut ta' Marsaxlokk Natura 2000 Site (Malta). *Land.* 2023;12(9). doi: 10.3390/land12091679.
98. Tephnadze-Hoernchen N, Kikvidze Z, Nakhutsrishvili G, Abdaladze O. Subalpine vegetation along the soil moisture gradient under the climate change conditions: re-visitation approach (the Central Great Caucasus). *Bocconea.* 2021;29:297-310. doi: 10.7320/Bocc29.297.
99. Thomas FM, Krug K, Zoldan J, Schröck HW. Long-term effects of liming on the species composition of the herb layer in temperate Central-European forests. *Forest Ecol Manag.* 2019;437:49-58. doi: 10.1016/j.foreco.2019.01.026.
100. Tichý L., Axmanová I., Dengler J., Guarino R., Jansen F., Midolo G. et al. Ellenberg-type indicator values for European vascular plant species. *J Veg Sci.* 2023;34:e13168. doi: 10.1111/jvs.13168.
101. Uogintas D, Rasomavicius V. Impact of short-term abandonment on the structure and functions of semi-natural dry grasslands. *Botanica.* 2020;26(1):40-8. doi: 10.2478/botlit-2020-0004.
102. Van Den Berge S, Tessens S, Baeten L, Vanderschaeve C, Verheyen K. Contrasting vegetation change (1974–2015) in hedgerows and forests in an intensively used agricultural landscape. *App Veg Sci.* 2019;22(2):269-81. doi: 10.1111/avsc.12424.
103. Varricchione M, Carranza ML, Di Cecco V, Di Martino L, Stanisci A. Warmer and poorer: the fate of Alpine calcareous grasslands in Central Apennines (Italy). *Diversity.* 2022;14(9):695. doi: 10.3390/d14090695.
104. Zavyalov K, Ivanova N, Potapenko A, Ayan S. Influence of soil fertility on the ability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to adapt to technogenic pollution. *CERNE.* 2019;25(4):326-31. doi: 10.1590/01047760201925042670.
105. Zhivotovsky LA, Osmanova GO. Phyto-indicator of variation in environmental conditions. *Biol Bull Russ. Acad Sci.* 2021;48:207-13. doi: 10.1134/S1062359021020151.
106. Ziaja M, Wójcik T, Wrzesień M. Phytosociological data in assessment of anthropogenic changes in vegetation of Rzeszów reservoir. *Sustainability.* 2021;13:e9071. doi: 10.3390/su13169071.
107. Zolotova E, Ivanova N, Ivanova S. Global overview of modern research based on Ellenberg indicator values. *Diversity.* 2023;15(1):14. doi: 10.3390/d15010014.
108. Zverev A. Methodological aspects of using indicator values in biodiversity analysis. *Contemp Probl Ecol.* 2020;13:321-32. doi: 10.1134/S1995425520040125.