

ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЛАНДШАФТОВ И СРЕД ОБИТАНИЯ ДЛЯ ЖИВОТНЫХ: ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

Е. В. ШУШКОВА¹⁾, А. А. СИДОРОВИЧ¹⁾, И. И. ЛУКИНА¹⁾

¹⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

Обзревается современные подходы к оценке проницаемости ландшафтов и сред обитания для животных, а также определяются области их применения. В частности, рассматриваются видовой (эко-системно-видовой), экосистемный (ландшафтный) и территориальный подходы. В рамках видового (эко-системно-видового) подхода исследуется проницаемость сред обитания для отдельных видов диких животных с учетом их экологических требований к условиям обитания и характера перемещений. В публикациях, основанных на этом подходе, как правило, оценивается пригодность сред обитания для конкретного вида и устанавливается минимальный размер его популяции. Для экосистемного (ландшафтного) подхода, основанного на теории островной биогеографии (Р. Х. Макартур и Э. О. Уилсон) и концепции ландшафтной экологии (Р. Т. Т. Форман), характерен анализ экологических характеристик природных территорий. Этот подход получил широкое развитие в связи с совершенствованием механизмов геоинформационного моделирования и использования данных дистанционного зондирования Земли. Территориальный подход, основателем которого является Б. Б. Родоман, связан с исследованием особенностей размещения территорий, подлежащих специальной охране, и изучением различных режимов их охраны и использования. Проведенный анализ позволяет определить актуальность исследования проницаемости ландшафтов и сред обитания для животных на территории Беларуси.

Ключевые слова: проницаемость ландшафтов; связанность местообитаний; фрагментация; индекс проницаемости; коридор.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. (подпрограмма «Биоразнообразие, биоресурсы, экология», задание 01.08 «Моделирование проницаемости среды обитания (наличия коридоров и барьеров для перемещений) для модельных видов животных Белорусского Поозерья с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и программного инструментария геоинформационных систем (ГИС)» на 2021–2023 гг.) (№ гос. регистрации 20210242).

THE LANDSCAPE AND HABITAT PERMEABILITY FOR ANIMALS: REVIEWING EXISTING APPROACHES

A. V. SHUSHKOVA^a, A. A. SIDOROVICH^a, I. I. LUKINA^a

^aScientific and Practical Center for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus,
27 Akademichnaja Street, Minsk 220072, Belarus

Corresponding author: A. V. Shushkova (lena-shushkova@yandex.by)

Образец цитирования:

Шушкова ЕВ, Сидорович АА, Лукина ИИ. Проницаемость ландшафтов и сред обитания для животных: обзор существующих подходов. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;1:47–56. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2023-1-47-56>

For citation:

Shushkova AV, Sidorovich AA, Lukina II. The landscape and habitat permeability for animals: reviewing existing approaches. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;1:47–56. Russian. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2023-1-47-56>

Авторы:

Елена Васильевна Шушкова – старший научный сотрудник.
Анна Андреевна Сидорович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник.
Ирина Ивановна Лукина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Authors:

Alena V. Shushkova, senior researcher.
lena-shushkova@yandex.by
Anna A. Sidorovich, PhD (biology), lead researcher.
sidorovich.ecofox@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-7523-5048>
Irina I. Lukina, PhD (biology), senior researcher.
lukinai@tut.by

The article presents an overview of up-to-date approaches and methods for assessing the permeability of landscapes and habitats for animals. In particular, the authors consider species (eco-system-species), ecosystem (landscape) and territorial approaches. The species (eco-system-species) approach considers the permeability of the habitat for the certain species of wild animals, taking into account their ecological requirements for habitats and the nature of their movements. Species-specific studies typically involve assessments of habitat suitability for a particular species and the minimum population size of a species. The ecosystem (landscape) approach is characterised by the analysis of the ecological characteristics of natural areas. This approach is rooted on the theory of island biogeography (R. H. McArthur and E. O. Wilson) and landscape ecology (R. T. T. Forman). The approach has been widely developed in connection with the development of geoinformation modelling and the use of remote sensing data. The territorial approach, the founder of which is B. B. Rodoman, is associated with the study of the peculiarities of the location of territories subject to special protection, and the study of various regimes for their protection and use. The analysis carried out allows us to determine the relevance of studying the permeability of landscapes and habitats for animals on the territory of Belarus.

Keywords: landscape permeability; habitat connectivity; fragmentation; landscape metric; corridor.

Acknowledgements. The work was supported by the state programme of scientific research «Natural resources and environment» for 2021–2025 (the subprogramme «Biodiversity, bioresources, ecology», task 01.08 «Modelling the permeability of the habitat (presence of corridors and distribution barriers) for focal animal species for Belarusian Poozerye using remote sensed data (RSD) and GIS software tools» for 2021–2023) (state registration No. 20210242).

Введение

В результате деятельности человека природные ландшафты были существенно трансформированы, что привело к сокращению или исчезновению экологических связей между многими популяциями диких животных и значительно ограничило возможности их распространения из-за возникновения физических барьеров. В настоящее время отдельные популяции, особенно видов, находящихся в группе риска, могут сокращаться и исчезать по причине отсутствия коридоров для пространственных перемещений [1]. Поддержание и формирование проницаемости ландшафтов и природных сред имеют особое значение в аспекте адаптации животных к трансформации условий среды, в том числе к изменению климата [2], а также играют ключевую роль в сохранении биологического разнообразия [3–6].

Существенное влияние хозяйственной деятельности на природные комплексы характерно и для территории Беларуси. Согласно данным Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь по состоянию на 2020 г. сельскохозяйственные земли (39,9 %) занимали почти такую же площадь, как и лесные земли (42,7 %), при этом площадь пахотных земель составляла около 27,5 % от всей территории страны. В настоящее время площадь преобразованных земель растет¹.

В Беларуси достаточно интенсивно развивается сеть автомобильных дорог. С 1997 г. протяженность сети автомобильных дорог общего пользования увеличилась более чем в 1,6 раза, и к 2020 г. она составила 87 тыс. км. Плотность сети автомобильных дорог общего пользования равняется 418 км на 1000 м² (высокий показатель для стран Восточной Европы). В несколько раз увеличилась интенсивность движения на дорогах за счет роста автомобилизации населения и увеличения скоростного режима².

Оценка проницаемости сред обитания для животных лежит в основе комплексного анализа состояния природных ресурсов. Без сохранения и восстановления проницаемости ландшафтов невозможно планировать, прогнозировать и разрабатывать эффективные стратегии в сфере устойчивого использования природно-ресурсного потенциала. Следует отметить, что в Беларуси проницаемость ландшафтов и сред обитания для животных ранее не изучалась.

В статье обобщаются существующие подходы к оценке проницаемости ландшафтов и сред обитания для животных в целях более четкого формулирования терминологического аппарата и определения потенциальных областей практического применения результатов подобных работ.

Материалы и методы исследования

В основу работы положена аналитико-синтетическая компиляция подходов и методов, которые касаются оценки проницаемости сред обитания для животных. Поиск литературных источников осуществлялся с помощью программного обеспечения *Publish or Perish*, систем поиска *Google Scholar* и *Web of Science*. В общей сложности проанализировано 118 публикаций за период с 2000 г. (включая ссылки

¹Мониторинг земель (почв) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/uploads/archive/Sborniki/> (дата обращения: 18.02.2020).

²О государственной программе «Дороги Беларуси» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 9 апр. 2021 г. № 212 [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100212> (дата обращения: 15.10.2021).

на более ранние теоретические источники), из которых для дальнейшего исследования было отобрано 35 работ. Преимущество отдавалось публикациям с высоким индексом цитирования и официальным документам, утвержденным на уровне отдельных стран или в рамках международных договоров.

К значимым работам по исследуемой проблематике относятся публикации [7–10]. Особый интерес представляют исследования по применению ландшафтных индексов [11–13]. В развитие понимания рассмотренных подходов внесли вклад обзоры [14; 15].

В странах Восточной Европы чаще всего рассматривается проблема фрагментации природных территорий (см., например, [16; 17]). В русскоязычном сегменте изучение проницаемости сред обитания является новым направлением исследований.

Результаты и их обсуждение

Основные термины, используемые при оценке проницаемости ландшафтов, и сфера их использования. Под проницаемостью ландшафтов понимается степень благоприятности ландшафтов, охватывающих различные типы естественных земельных покровов и земельных покровов, близких к ним, для беспрепятственного перемещения представителей дикой природы и содействия развитию экологических процессов [7; 18]. Другими словами, при высоком уровне проницаемости ландшафты поддерживают способность различных видов живых организмов к перемещению.

Ключевые характеристики проницаемости сред обитания, их размеры и особенности распределения, а также густота дорожной сети территории исследования берутся за основу при планировании природоохранной деятельности, разработке и реализации соответствующих мероприятий, проектов и стратегий [2; 8]. Так, понятие «проницаемость» нашло отражение в резолюции 12.26 «Улучшение способов решения проблемы взаимосвязанности при сохранении мигрирующих видов» Конвенции по сохранению мигрирующих видов диких животных³, а также в рамочной программе по сохранению биоразнообразия на период после 2020 г. Конвенции о биологическом разнообразии⁴.

Выделяется структурная и функциональная проницаемость. Структурная проницаемость отражает физические связи между элементами ландшафта или участками местообитания без прямой корреляции с какими-либо поведенческими или экологическими характеристиками видов. Близким к понятию «структурная проницаемость сред обитания» является термин «связанность ландшафтов» [9; 19]. Во многих случаях термины «связанность ландшафтов» и «проницаемость ландшафтов» используются как синонимы. Фактически они различаются сферой использования, однако область применения термина «проницаемость ландшафтов» является более широкой.

Функциональная проницаемость отражает функциональные взаимосвязи между ландшафтами или участками сред обитания. Она учитывает поведенческие реакции видов на отдельные элементы ландшафтов и их пространственную конфигурацию. Функциональные связи, как правило, рассматриваются, когда речь идет о требованиях конкретных модельных видов к местообитаниям [6; 11]. Если такая информация отсутствует, для оценки возможности перемещения видов используется структурная проницаемость.

Снижение проницаемости сред обитания обуславливается в первую очередь ее фрагментацией – разделением на более мелкие разрозненные участки, которые постепенно теряют свой потенциал для выполнения первоначальных функций [10]. В умеренных широтах фрагментация связана с изменением характера землепользования на краевых участках. Проницаемость границ для распространения видов зависит от сходства соседних типов местообитаний, и, вероятно, она является более высокой при естественных границах раздела.

Связанность ландшафтов имеет ключевое значение для формирования коридоров между природными территориями. С точки зрения ландшафтной экологии в рамках модели *участок – коридор – мозаика* [20] коридор представляет собой территорию, которая связывает между собой места обитания диких животных и обеспечивает возможность их перемещения. Пространственно это отдельный элемент ландшафта (как правило, линейный). К коридорам относятся также и более широкие зоны – так называемые области связи, важные для поддержания экологических процессов и перемещения множества видов (уменьшения барьеров).

Существующие подходы к оценке проницаемости сред обитания и примеры их применения. В табл. 1 представлены существующие подходы к оценке проницаемости ландшафтов для животных.

³Improving ways of addressing connectivity in the conservation of migratory species [Electronic resource]. URL: https://www.cms.int/sites/default/files/document/cms_cop12_res.12.26_connectivity_e.pdf (date of access: 25.03.2021).

⁴The post-2020 biodiversity framework: targets, indicators and measurability implications at global and national level [Electronic resource]. URL: <https://www.oecd.org/environment/resources/biodiversity/post-2020-biodiversity-framework.htm> (date of access: 21.06.2021).

Таблица 1

Различные подходы к оценке проницаемости ландшафтов для животных

Table 1

Different approaches to assessing the permeability of landscapes for animals

Подход	Ключевые термины	Инструменты и методы	Исследователи
Видовой (эко-системно-видовой)	Вид, метапопуляция	Оценка пригодности сред обитания для конкретных видов	Р. Левинс, И. Хански, П. Бенер, Д. Майка и др.
Экосистемный (ландшафтный)	Острова и коридоры дикой природы	Количественная оценка структуры ландшафтов на основе индексов	Р. Х. Макартур, Э. О. Уилсон, Р. Т. Т. Форман, Л. Боитани и др.
Территориальный	Экологическая сеть и ее элементы (ядра и коридоры)	Пространственный анализ данных	Б. Б. Родоман, Р. Г. Г. Джонгман, Н. А. Юргенсон и др.

Видовой (эко-системно-видовой) подход. На видовом (эко-системно-видовом) уровне проницаемость выступает как условие, необходимое для сохранения жизнеспособных популяций отдельных видов на территории исследования. В рамках данного подхода оцениваются характер перемещений вида, вероятность существования препятствий для этих перемещений (барьеры) и возможность уменьшения воздействия данных препятствий на восстановление, сохранение и поддержание жизнеспособности популяции. Оценка проницаемости для различных видов диких животных зависит от их экологических требований к условиям обитания и характера перемещений.

Большинство моделей содержат те или иные факторы, связанные с деятельностью человека, которые чаще всего рассматриваются в качестве барьеров (степень освоения территории, характер и тип растительного покрова, уровень шумового загрязнения, фактор беспокойства и др.). Барьеры обладают различным уровнем проницаемости для разных видов [21], что является важной частью исследования. Для каждого конкретного вида животного существуют свои критерии барьеров.

Для стратегического планирования в аспекте изучения проницаемости сред возможно выявление мест расположения существующих переходов для животных с учетом зон разрыва, где их передвижения могут затрудняться (участки дорог с повышенным риском смертности, открытые сельскохозяйственные угодья и др.).

Оценка проницаемости сред может проводиться по аналогии с анализом пригодности сред обитания [22]. Прежде всего важно биологически интерпретировать результаты оценки пригодности мест обитаний и установить биологически значимые пороговые значения для разделения этих оценок на категории. Особое внимание уделяется порогу пригодности, который является необходимым для поддержания сред обитания, важных для осуществления жизненных циклов вида.

Исследования, основанные на видовом подходе, как правило, связаны с изучением наиболее чувствительных к фрагментации видов, которые либо предъявляют высокие требования к размеру ареала, либо имеют тенденцию к регулярной или случайной миграции [6; 22]. Среди модельных видов часто рассматриваются крупные хищники (волк (*Canis lupus*), европейская рысь (*Lynx lynx*), бурый медведь (*Ursus arctos*)) и копытные животные. Модельные виды, как правило, представляют собой таксоны с высоким статусом охраны как на национальном, так и на международном уровне. Охрана этих видов станет эффективной только в том случае, если будут оберегаться как места их постоянного обитания, так и территории, по которым они перемещаются (расселяются, мигрируют).

Таким образом, в рамках видового (эко-системно-видового) подхода проницаемость сред обитания для модельных видов диких животных рассматривается с учетом их экологических требований к условиям обитания и характера их перемещений. В публикациях, базирующихся на этом подходе, обычно оценивается пригодность сред обитания для конкретного вида и устанавливается минимальный размер его популяции. Для видового (эко-системно-видового) подхода важность пространственного параметра является не такой явной, как для других подходов.

Экосистемный (ландшафтный) подход. Оценка проницаемости сред на экосистемном (ландшафтном) уровне предполагает определение ключевых характеристик экосистем и типов мест обитания, важных для выживания вида, а также установление степени их целостности на основе данных о структуре, функциях и связанности ландшафтов.

Данный подход применяется в основном в работах по островной биогеографии Р. Х. Макартура и Э. О. Уилсона, а также в публикациях представителей североамериканской школы ландшафтной эко-

логии, в основе которой лежит модель *участок – коридор – мозаика* [20]. В этой модели особое значение для обеспечения связей между элементами, важных для оценки проницаемости, имеют коридоры – линейные структуры, объединяющие участки со сходной растительностью и отличающиеся от мозаики. Ключевыми характеристиками коридоров являются процент территорий, покрытых естественной растительностью, их связанность и уровень фрагментации.

В рамках экосистемного (ландшафтного) подхода для оценки ландшафтной структуры широко используются возможности дистанционного зондирования Земли и геоинформационного моделирования на различных масштабных уровнях. На региональном уровне применяются разновременные мультиспектральные снимки среднего пространственного разрешения (например, снимки, полученные со спутников Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8 Геологической службы США [11], либо геометрически правильные сетки квадратной формы [23]).

Для характеристики структуры ландшафта широко применяются ландшафтные индексы (метрики) [11–13; 24]. Существуют различные классификации индексов [12; 25; 26], однако нужно принимать во внимание условный характер любой классификации. Обзор наиболее распространенных индексов приведен в табл. 2. На рисунке представлены примеры графического отображения отдельных групп индексов.

Таблица 2

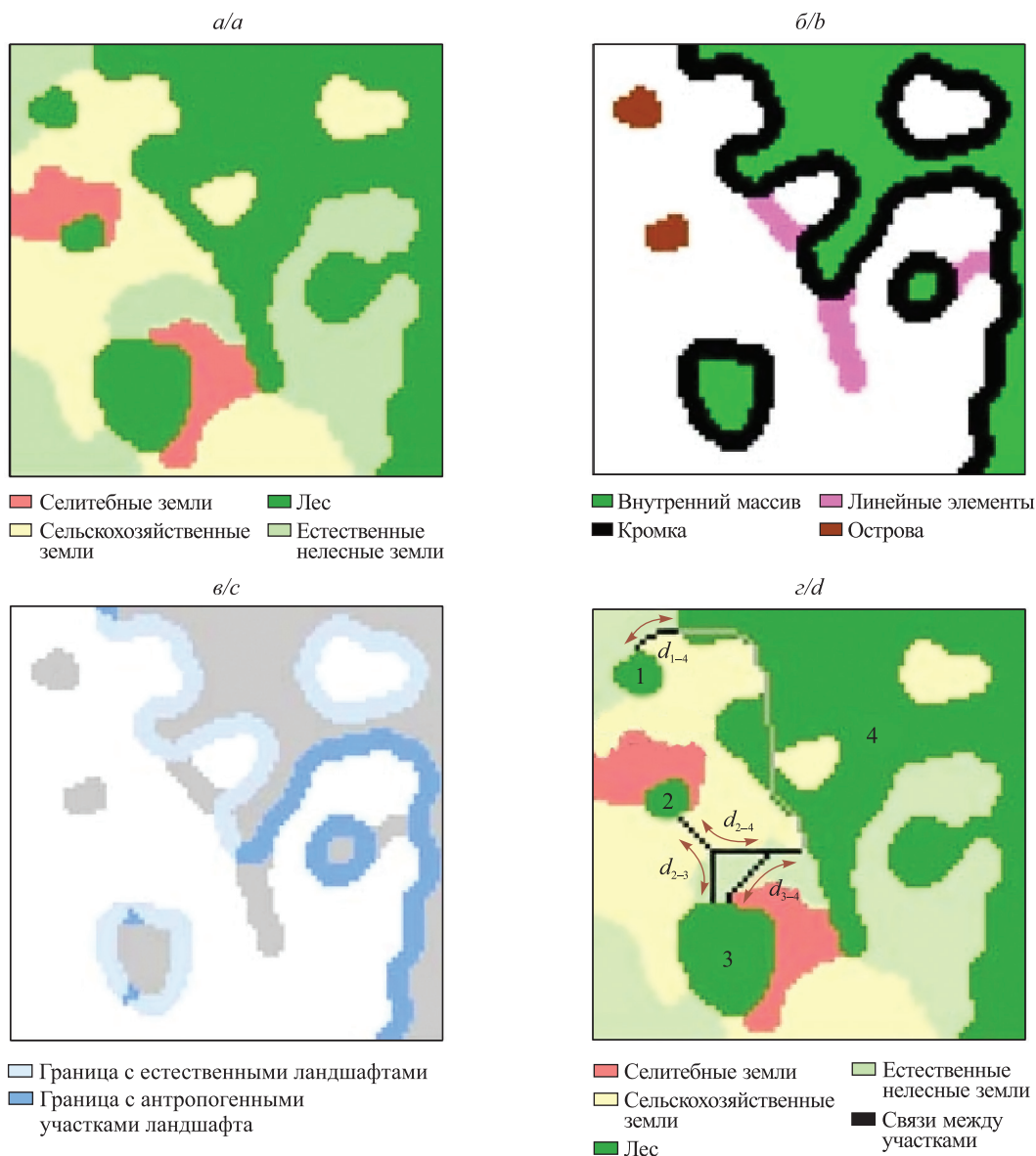
Индексы, которые используются для количественной оценки ландшафтной структуры

Table 2

Landscape metrics that are used to quantify landscape structure

Индексы	Единица измерения	Значение
<i>Индексы площади и структуры</i>		
Area	га	Площадь лесного массива (в контуре)
CA	га	
NP	ед.	Общее число участков (в контуре)
Pland	%/км ²	Доля лесных земель на единицу площади (лесная мозаика)
Area_MN	га	Средняя площадь лесного массива (в контуре)
LPI	га	Отношение площади самого большого участка к общей площади контура
<i>Индексы конфигурации</i>		
PAR, P/A	м/м ²	Отношение периметра участка к площади, при котором форма участка смешивается с его размером
Shape*	—	Нормализованное отношение периметра участка к площади, в котором сложность формы участка сравнивается со стандартной формой (квадратом) того же размера, тем самым облегчает проблему зависимости размера от индекса PAR
Frac*	—	Нормализованный индекс формы, основанный на соотношении периметра и площади, мера изрезанности границы участка по отношению к квадрату
LSI*	—	Индекс формы ландшафта, основанный на несоответствии между фактическими и изодиаметрическими формами (круги для векторных карт и квадраты для растровых карт), индикатор сложности ландшафта
<i>Индексы контрастности</i>		
TE	м	Общая длина края или плотность края лесных участков
ED	м/га	
ECon	%	Степень максимального контраста по краю между двумя пятнами, сумма по уровню участка, класса или ландшафта
<i>Индексы связности</i>		
PC*	—	Индекс связанности
IsoSI*	—	Индекс изоляции

Примечание. Разработано на основе источников [11; 12; 25; 27–29]; знаком * отмечены те индексы, по отношению к которым стандартные единицы измерения не применяются (в качестве единиц измерения используется диапазон значений).



Примеры графического представления стандартизованных индексов (на единицу ландшафта площадью 25×25 км): *a* – индексы площади и структуры; *б* – индексы конфигурации; *в* – индексы контрастности; *г* – индексы связности (цифрами 1–4 обозначаются зоны; индекс d_{1-4} относится к зонам 1 и 4, индекс d_{2-3} – к зонам 2 и 3, индекс d_{2-4} – к зонам 2 и 4, индекс d_{3-4} – к зонам 3 и 4; значение индекса d_{1-2} равняется сумме значений индексов d_{1-4} и d_{2-4} , значение индекса d_{1-3} равняется сумме значений индексов d_{1-4} и d_{3-4}) (разработано на основе источника [11])

Examples of graphical representation of standardised metrics (per landscape unit 25×25 km): *a* – area metrics; *b* – shape metrics; *c* – contrast and edge metrics; *d* – connectivity metrics (numbers 1–4 indicate zones; index d_{1-4} refers to zones 1 and 4, index d_{2-3} – to zones 2 and 3, index d_{2-4} – to zones 2 and 4, index d_{3-4} – to zones 3 and 4; the value of the index d_{1-2} is equal to the sum of the values of the indices d_{1-4} and d_{2-4} , the value of the index d_{1-3} is equal to the sum of the values of the indices d_{1-4} and d_{3-4}) (based on source [11])

Для определения ландшафтной структуры используются также индексы PSI (*patch shape index*), PD (*patch density*), PR (*patch richness*), Core (*patch core area*), EAR, или E/A (*edge to area ratio*), NN (*nearest neighbour*) и их варианты [13]. Следует отметить, что при изучении проницаемости среды обитания для различных видов животных особое внимание уделяется индексам связности.

Примерами применения экосистемного (ландшафтного) подхода являются экологические сети в Бельгии, Нидерландах, Италии [14; 15], разработанные на основе исследований Р. Т. Т. Формана.

Таким образом, для экосистемного (ландшафтного) подхода характерен анализ экологических характеристик природных территорий. Этот подход получил широкое развитие в связи с совершенствованием механизмов геоинформационного моделирования и использования данных дистанционного зондирования Земли.

Территориальный подход. Широкий практический интерес в рамках изучения проницаемости сред обитания и их фрагментации представляет планирование коридоров, в рамках которого применяется территориальный подход.

Теоретической основой территориального подхода является концепция поляризованного ландшафта, предложенная Б. Б. Родоманом [30]. Она базируется на функциональном зонировании природных территорий, которые противопоставляются территориям интенсивного использования. Концепция Б. Б. Родомана получила развитие в ряде национальных и региональных разработок, главным образом с сильными традициями территориального планирования. К подобным разработкам относятся экологические сети и коридоры Чехии, стран Балтии и др. [14; 31].

Большое значение в рамках этой традиции имеет анализ непрерывных территориальных структур, состоящих из природных территорий и территорий, которые являются близкими к ним и имеют различные ограничения по использованию.

Таким образом, в отличие от экосистемного (ландшафтного) подхода в рамках территориального подхода меньше учитываются экологические характеристики природных территорий. Более важное значение придается анализу размещения территорий, подлежащих специальной охране, и изучению различных режимов их охраны и использования.

Национальная экологическая сеть Беларуси также разработана на основе территориального подхода⁵. На данном этапе для ее развития интерес представляют исследование эффективности применения имеющихся коридоров для расселения и миграции видов и выявление при необходимости альтернативных вариантов коридоров.

Изученность проблемы в Беларуси. Исследованию ландшафтной структуры посвящены работы отечественных ученых А. С. Скачковой, Д. М. Курловича, Л. В. Катковского [32], А. П. Гусева [29] и др. Однако проницаемость ландшафтов как сред обитания для отдельных видов животных ранее не анализировалась. Следует рассмотреть проекты и инициативы, направленные на сохранение биоразнообразия животного мира, которые были реализованы в Беларуси за последнее время.

В 2001–2002 гг. с участием национальных экспертов была разработана индикационная карта Панъевропейской экологической сети для стран Центральной и Восточной Европы (в том числе Беларуси), отражающая центры биоразнообразия, а также экологические коридоры международного значения [23]. Оценка территорий проводилась на основе списка из 449 приоритетных видов, который был составлен в рамках Конвенции об охране дикой фауны и флоры и природных сред обитания, принятой 19 сентября 1979 г. в Берне (Швейцария), и зафиксирован в Директиве Европейского союза по охране диких птиц от 2 апреля 1979 г. и Директиве Европейского союза об охране природных мест обитания, дикой флоры и фауны от 21 мая 1992 г. Кроме того, учитывались виды, включенные в национальные красные книги. В качестве модельных видов рассматривались птицы и млекопитающие, поскольку они являются наиболее требовательными к размерам территории, необходимой для осуществления их жизненных циклов. Однако подходы, применяемые в Западной Европе, были не вполне адаптированы к условиям Беларуси. Проект не предполагал оценку проницаемости сред обитания.

Указом Президента Республики Беларусь от 13 марта 2018 № 108 «Об экологической сети» была утверждена национальная экологическая сеть. Она была разработана на основе территорий со специальными режимами природопользования (водоохранные и курортные зоны, прибрежные полосы рек и водоемов, типичные и редкие биотопы и др.) [33]. В то же время в действующем природоохранном законодательстве отсутствует практика выделения некоторых природных территорий, подлежащих специальной охране. В частности, к ним относятся территории, имеющие значение для размножения, нагула, зимовки и (или) миграции диких животных.

Одной из важных целей национальной экологической сети является обеспечение возможности расселения и миграции видов посредством экологических коридоров, связывающих элементы экологической сети друг с другом. При разработке сети проницаемость сред для конкретных видов животных не изучалась.

Существует проблема интеграции национальной экологической сети с Изумрудной сетью Беларуси – аналогом европейской экологической сети «Натура-2000» [34]. Одно из возможных решений этой проблемы состоит в создании коридоров на основе дальнейшего развития типологии подлежащих специальной охране природных территорий, на которые до сих пор не распространяется действие существующих нормативно-правовых актов в области природоохранного законодательства. Изучение проницаемости сред обитания модельных видов животных будет способствовать решению этой проблемы.

⁵Об экологической сети : Указ Президента Респ. Беларусь от 13 марта 2018 г. № 108 [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31800108&p1=1> (дата обращения: 17.02.2022).

В 2016 г. в Беларуси была разработана Схема основных миграционных коридоров модельных видов диких животных (далее – Схема миграционных коридоров)⁶. В качестве модельных видов рассматривались копытные, земноводные животные и водоплавающие птицы. В основе работы лежали выделение ядер из относительно естественного ландшафта и выявление коридоров, обеспечивающих связь между такими ядрами. Схема носила пробный характер и заложила фундамент для проведения дальнейших исследований, прежде всего в области транспортной экологии. В настоящее время подходы к составлению Схемы миграционных коридоров требуют большей детализации, поскольку возникает сложность ее применения на практике. Например, при проектировании различных строительных объектов (автомобильных и железных дорог, ветряных установок и др.), которые могут негативно влиять на жизнедеятельность модельных групп животных, важно уточнять место проведения природоохранных мероприятий и их тип. Многие виды копытных животных и амфибий не являются стенобионтными и часто используют фрагментированные и даже сельскохозяйственные ландшафты для перемещений, особенно в случае наличия там подходящих кормовых биотопов и мест размножения. Анализ проницаемости сред обитания для животных может стать инструментом, который позволит эффективно использовать Схему миграционных коридоров.

В 2021 г. в Научно-практическом центре НАН Беларуси по биоресурсам была начата работа «Моделирование проницаемости среды обитания (наличия коридоров и барьеров для перемещений) для модельных видов животных Белорусского Поозерья с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и программного инструментария геоинформационных систем (ГИС)». Ее цель заключается в поиске оптимальных подходов к оценке проницаемости сред обитания для разных групп лесных млекопитающих на территории Беларуси и формировании соответствующего инструментария. В дальнейшем планируется разработка предложений для выделения отдельных категорий природных территорий, подлежащих специальной охране и имеющих значение для размножения, нагула, зимовки и (или) миграции диких животных. Кроме того, результаты данной работы позволят оценить эффективность применения Схемы миграционных коридоров и рассмотреть альтернативные варианты обеспечения проницаемости сред обитания для животных.

Заключение

Проблема исследования проницаемости сред обитания для отдельных видов животных является одной из наиболее актуальных в аспекте сохранения биологического разнообразия на разных уровнях исследования. Развитие технологий расширяет спектр используемых методологий и подходов. Выделяются видовой (эко-системно-видовой), экосистемный (ландшафтный), территориальный подходы и их комбинации. Данные подходы применяются для решения различных практических задач по сохранению биологического разнообразия, в том числе для оценки эффективности экологической сети, формирования карт проницаемости охраняемых и ресурсных видов животных, оптимизации границ существующих особо охраняемых природных территорий и др.

В настоящее время на территории Беларуси развитие различных подходов к изучению проницаемости сред обитания для животных представляется необходимым в целях более эффективного осуществления, а также для оценки эффективности функционирования национальной экологической сети и реализации Схемы миграционных коридоров.

Библиографические ссылки

1. Cushman SA, McRae B, Adriaensen F, Beier P, Shirley M, Zeller K. Biological corridors and connectivity. In: MacDonald DW, Willis KJ, editors. *Key topics in conservation biology 2*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2013. p. 284–404. DOI: 10.1002/9781118520178.ch21.
2. Haber J, Nelson P. *Planning for connectivity: a guide to connecting and conserving wildlife within and beyond America's national forests* [Internet]. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation; 2015 [cited 2021 June 17]. 24 p. Available from: <https://defenders.org/sites/default/files/publications/planning-for-connectivity.pdf>.
3. Parks S, Harcourt A. Reserve size, local human density, and mammalian extinctions in U. S. Protected Areas. *Conservation Biology*. 2002;16(3):800–808. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2002.00288.x.
4. Prugh LR, Hodges KE, Sinclair ARE, Brashares JS. Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008;105(52):20770–20775. DOI: 10.1073/pnas.0806080105.
5. Pulsford I, Lindenmayer D, Wyborn C, Lausche B, Vasilijevic M, Worboys GL, et al. Connectivity conservation management. In: Worboys GL, Lockwood M, Kothari A, Feary S, Pulsford I, editors. *Protected Area Governance and Management*. Canberra: ANU Press; 2015. p. 851–888. DOI: 10.22459/PAGM.04.2015.27.
6. Okániková Z, Romportl D, Kluchová A, Hlaváč V, Strnad M, Papp C-R. *Methodology for identification of ecological corridors in the Carpathian countries by using large carnivores as umbrella species*. Stockholm: Interreg Europe; 2021. 82 p.

⁶Схема основных миграционных коридоров модельных видов диких животных [Электронный ресурс]. URL: <https://minskpriroda.gov.by/infotape/actually/diagram-of-the-main-migration-corridors-model-species-of-wild-animals> (дата обращения: 17.02.2022).

7. Ament R, Callahan R, McClure M, Reuling M, Tabor G. *Wildlife connectivity: fundamentals for conservation action*. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation; 2014. 28 p.
8. Hity J, Worboys GL, Keeley A, Woodley S, Lausche BJ, Locke H, et al. *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors*. Groves C, editor. Gland: International Union for Conservation of Nature; 2020. 140 p. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en.
9. Singleton PH, Gaines WL, Lehmkuhl JF. *Landscape permeability for large carnivores in Washington: a geographic information system weighted-distance and least-cost corridor assessment*. Portland: United States Department of Agriculture; 2002. 89 p. DOI: 10.2737/PNW-RP-549.
10. Turner MG, Gardner RH, O'Neill RV. *Landscape ecology in theory and practice: pattern and process*. New York: Springer; 2001. 420 p.
11. Estreguil C, Caudullo G, de Rigo D, San-Miguel-Ayanz J. *Forest landscape in Europe: pattern, fragmentation and connectivity: executive report*. Ispra: Institute for Environment and Sustainability; 2013. 18 p. DOI: 10.2788/77842.
12. McGarigal K. Landscape metrics for categorical map patterns [Internet]. Massachusetts: Massachusetts University; 2012 [cited 2021 April 19]. 77 p. Available from: <https://studylib.net/doc/7944344/landscape-metrics-for-categorical-map-patterns>.
13. Wu J. Landscape ecology. In: Leemans R, editor. *Ecological systems*. New York: Springer; 2013. p. 179–200. DOI: 10.1007/978-1-4614-5755-8_11.
14. Jongman RHG, Kristiansen I. *National and regional approaches for ecological networks in Europe*. Strasbourg: Council of Europe; 2001. 86 p.
15. Boitani L, Falcucci A, Maiorano L. *National ecological network: the role of the protected areas in the conservation of vertebrates*. Rome: University of Rome; 2003. 90 p.
16. Пузаченко ЮГ. *Методологические основы географического прогноза и охраны среды*. Москва: Университет Российской академии образования; 1998. 210 с.
17. Гродзинський МД. *Пізнання ландшафту: місце і простір*. Том 2. Київ: Київський університет; 2005. 503 с.
18. Suter W, Bollmann K, Holdereger R. Landscape permeability: from individual dispersal to population persistence. In: Kienast F, Wildi O, Ghosh S, editors. *A changing world: challenges for landscape research*. Dordrecht: Springer; 2007. p. 157–174. DOI: 10.1007/978-1-4020-4436-6_11.
19. Meiklejohn K, Ament R, Tabor G. *Habitat corridors & landscape connectivity: clarifying the terminology* [Internet]. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation; 2010 [cited 2021 May 5]. 6 p. Available from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.542.4218&rep=rep1&type=pdf>.
20. Forman RTT. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge: Cambridge University Press; 1995. 632 p.
21. Anděl P, Andreas M, Bláhová A, Gorčicová I, Hlaváč V, Mináriková T. *Protection of landscape connectivity for large mammals*. Anděl P, Mináriková T, Andreas M, editors. Liberec: Evernia; 2010. 134 p.
22. Beier P, Majka D, Jenness J. Conceptual steps for designing wildlife corridors [Internet]. San Francisco: Northern Arizona University; 2007 [cited 2021 December 10]. 90 p. Available from: <http://corridordesign.org/dl/docs/ConceptualStepsForDesigningCorridors.pdf>.
23. Bouwma IM, Jongman RHG, Butovsky RO, editors. *The indicative map of pan-European ecological network*. Tilburg: European Centre for Nature Conservation; 2002. 101 p.
24. Frazier AE, Kedron P. Landscape metrics: past progress and future directions. *Current Landscape Ecology Reports*. 2017;2: 63–72. DOI: 10.1007/s40823-017-0026-0.
25. Herzog F, Lausch A. Supplementing land-use statistics with landscape metrics: some methodological considerations. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2001;72:37–50. DOI: 10.1023/a:1011949704308.
26. Bender DJ, Tischendorf L, Fahrig L. Using patch isolation metrics to predict animal movement in binary landscapes. *Landscape Ecology*. 2003;18:17–39. DOI: 10.1023/A:1022937226820.
27. Cushman SA, McGarigal K, Neel MC. Parsimony in landscape metrics: strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*. 2008;8(5):691–703. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.12.002.
28. Santos JS, Leite CCC, Viana JCC, dos Santos AR, Fernandes MM, de Souza Abreu V, et al. Delimitation of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*. 2018;88:414–424. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.011.
29. Гусев АП. Фрагментация ландшафтного покрова как фактор деградации потенциала самовосстановления геосистем. *Весті БДПУ. Серія 3, Фізика. Математика. Інформатика. Біологія*. 2014;1:58–61.
30. Родоман ББ. Поляризация ландшафта как средство сохранения биосферы и рекреационных ресурсов. В: Комар ИВ, редактор. *Ресурсы, среда, расселение*. Москва: Наука; 1974. с. 150–162.
31. Sepp K, Kaasik A, editors. *Development of national ecological networks in the Baltic countries in the framework of the pan-European ecological network*. Warsaw: International Union for Conservation of Nature Office for Central Europe; 2002. 183 p.
32. Скачкова АС, Курлович ДМ, Катковский ЛВ. Структура и динамика земельного фонда Воложинского района Минской области за период с 1975 по 2010 г. (по результатам автоматизированного дешифрирования классов земных покрытий в Европейской номенклатуре Corine Land Cover). *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2013;1:98–103.
33. Юргенсон НА, Шушкова ЕВ, Шляхтич ЕА. Особенности формирования национальной экологической сети в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2015;2:99–106.
34. Юргенсон НА, Абрамчук АВ, Шушкова ЕВ. Проблемы и возможности интеграции национальной экологической сети и Изумрудной сети Беларуси. *Природные ресурсы*. 2018;1:127–137.

References

1. Cushman SA, McRae B, Adriaensen F, Beier P, Shirley M, Zeller K. Biological corridors and connectivity. In: MacDonald DW, Willis KJ, editors. *Key topics in conservation biology 2*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2013. p. 284–404. DOI: 10.1002/9781118520178.ch21.
2. Haber J, Nelson P. *Planning for connectivity: a guide to connecting and conserving wildlife within and beyond America's national forests* [Internet]. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation; 2015 [cited 2021 June 17]. 24 p. Available from: <https://defenders.org/sites/default/files/publications/planning-for-connectivity.pdf>.
3. Parks S, Harcourt A. Reserve size, local human density, and mammalian extinctions in U. S. Protected Areas. *Conservation Biology*. 2002;16(3):800–808. DOI: 10.1046/j.1523-1739.2002.00288.x.

4. Prugh LR, Hodges KE, Sinclair ARE, Brashares JS. Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008;105(52):20770–20775. DOI: 10.1073/pnas.0806080105.
5. Pulsford I, Lindenmayer D, Wyborn C, Lausche B, Vasilijevic M, Worboys GL, et al. Connectivity conservation management. In: Worboys GL, Lockwood M, Kothari A, Feary S, Pulsford I, editors. *Protected Area Governance and Management*. Canberra: ANU Press; 2015. p. 851–888. DOI: 10.22459/PAGM.04.2015.27.
6. Okániková Z, Romportl D, Kluchová A, Hlaváč V, Strnad M, Papp C-R. *Methodology for identification of ecological corridors in the Carpathian countries by using large carnivores as umbrella species*. Stockholm: Interreg Europe; 2021. 82 p.
7. Ament R, Callahan R, McClure M, Reuling M, Tabor G. *Wildlife connectivity: fundamentals for conservation action*. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation; 2014. 28 p.
8. Hity J, Worboys GL, Keeley A, Woodley S, Lausche BJ, Locke H, et al. *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors*. Groves C, editor. Gland: International Union for Conservation of Nature; 2020. 140 p. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en.
9. Singleton PH, Gaines WL, Lehmkuhl JF. *Landscape permeability for large carnivores in Washington: a geographic information system weighted-distance and least-cost corridor assessment*. Portland: United States Department of Agriculture; 2002. 89 p. DOI: 10.2737/PNW-RP-549.
10. Turner MG, Gardner RH, O'Neill RV. *Landscape ecology in theory and practice: pattern and process*. New York: Springer; 2001. 420 p.
11. Estreguil C, Caudullo G, de Rigo D, San-Miguel-Ayán J. *Forest landscape in Europe: pattern, fragmentation and connectivity: executive report*. Ispra: Institute for Environment and Sustainability; 2013. 18 p. DOI: 10.2788/77842.
12. McGarigal K. *Landscape metrics for categorical map patterns* [Internet]. Massachusetts: Massachusetts University; 2012 [cited 2021 April 19]. 77 p. Available from: <https://studylib.net/doc/7944344/landscape-metrics-for-categorical-map-patterns>.
13. Wu J. Landscape ecology. In: Leemans R, editor. *Ecological systems*. New York: Springer; 2013. p. 179–200. DOI: 10.1007/978-1-4614-5755-8_11.
14. Jongman RHG, Kristiansen I. *National and regional approaches for ecological networks in Europe*. Strasbourg: Council of Europe; 2001. 86 p.
15. Boitani L, Falcucci A, Maiorano L. *National ecological network: the role of the protected areas in the conservation of vertebrates*. Rome: University of Rome; 2003. 90 p.
16. Puzachenko YuG. *Metodologicheskie osnovy geograficheskogo prognoza i okhrany sredy* [Methodological basis of geography assessment and environmental protection]. Moscow: Universitet Rossiiskoi akademii obrazovaniya; 1998. 210 p. Russian.
17. Grodzyns'kyj MD. *Piznannja landshaftu: misce i prostir. Tom 2* [Landscape knowledge: place and space. Volume 2]. Kyiv: Kyivs'kyj universytet; 2005. 503 p. Ukrainian.
18. Suter W, Bollmann K, Holderegger R. Landscape permeability: from individual dispersal to population persistence. In: Kienast F, Wildi O, Ghosh S, editors. *A changing world: challenges for landscape research*. Dordrecht: Springer; 2007. p. 157–174. DOI: 10.1007/978-1-4020-4436-6_11.
19. Meiklejohn K, Ament R, Tabor G. *Habitat corridors & landscape connectivity: clarifying the terminology* [Internet]. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation; 2010 [cited 2021 May 5]. 6 p. Available from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.542.4218&rep=rep1&type=pdf>.
20. Forman RTT. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge: Cambridge University Press; 1995. 632 p.
21. Anděl P, Andreas M, Bláhová A, Gorčicová I, Hlaváč V, Mináriková T. *Protection of landscape connectivity for large mammals*. Anděl P, Mináriková T, Andreas M, editors. Liberec: Evvernia; 2010. 134 p.
22. Beier P, Majka D, Jenness J. *Conceptual steps for designing wildlife corridors* [Internet]. San Francisco: Northern Arizona University; 2007 [cited 2021 December 10]. 90 p. Available from: <http://corridordesign.org/dl/docs/ConceptualStepsForDesigningCorridors.pdf>.
23. Bouwma IM, Jongman RHG, Butovsky RO, editors. *The indicative map of pan-European ecological network*. Tilburg: European Centre for Nature Conservation; 2002. 101 p.
24. Frazier AE, Kedron P. Landscape metrics: past progress and future directions. *Current Landscape Ecology Reports*. 2017;2: 63–72. DOI: 10.1007/s40823-017-0026-0.
25. Herzog F, Lausch A. Supplementing land-use statistics with landscape metrics: some methodological considerations. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2001;72:37–50. DOI: 10.1023/a:1011949704308.
26. Bender DJ, Tischendorf L, Fahrig L. Using patch isolation metrics to predict animal movement in binary landscapes. *Landscape Ecology*. 2003;18:17–39. DOI: 10.1023/A:1022937226820.
27. Cushman SA, McGarigal K, Neel MC. Parsimony in landscape metrics: strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*. 2008;8(5):691–703. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.12.002.
28. Santos JS, Leite CCC, Viana JCC, dos Santos AR, Fernandes MM, de Souza Abreu V, et al. Delimitation of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*. 2018;88:414–424. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.011.
29. Gusev AP. [Fragmentation of the land cover as a factor of degradation of geosystems restoration's potential]. *Vesci BDPU. Seryja 3, Fizika. Matjematyka. Infarmatyka. Bijalogija*. 2014;1:58–61. Russian.
30. Rodoman BB. [Landscape polarisation as a means of preserving the biosphere and recreational resources]. In: Komar IV, editor. *Resursy, sreda, rasselenie* [Resources, environment, resettlement]. Moscow: Nauka; 1974. p. 150–162. Russian.
31. Sepp K, Kaasik A, editors. *Development of national ecological networks in the Baltic countries in the framework of the pan-European ecological network*. Warsaw: International Union for Conservation of Nature Office for Central Europe; 2002. 183 p.
32. Skachkova AS, Kurlovich DM, Katkovskii LV. [Structure and dynamics of the land fund of the Volozhinsky district of the Minsk region for the period from 1975 to 2010 (based on the results of automated interpretation of land cover classes in the European Corine land Cover nomenclature)]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2013;1:98–103. Russian.
33. Yurgenson NA, Shushkova AV, Shliakhtsich AA. [Features of the formation of a National ecological network in Belarus]. *Natural resources*. 2015;2:99–106. Russian.
34. Yurgenson NA, Abramchuk AV, Shushkova AV. Challenges for integration of the National ecological network and the Emerald network in Belarus. *Natural resources*. 2018;1:127–137. Russian.