УДК 911.52:502.4

Абдуганиев О.И., д.г.н., доцент
Ферганский государственный университет
Мамирова З.И., докторант кафедры географии
Ферганский государственный университет
Узбекистан, Фергана

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛЕЙ MSPA И MCR И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация: В статье систематизированы теоретические основы, алгоритмы и параметры морфологического анализа пространственной структуры (MSPA) и модели минимального кумулятивного сопротивления (MCR), применяемых для выделения экологических источников и коридоров. Показано, что MSPA выделяет потенциальные источники и связующие элементы по геометрии бинарного растра, а MCR моделирует пути наименьшей стоимости между ними по поверхности сопротивления. На примерах исследований в Испании, провинции Юньнань и аридном районе Чжундун (Синьцзян) обобщён четырёхэтапный интегрированный подход, дополненный индексами связности и теорией электрических цепей. Сформулированы рекомендации по адаптации подхода к оазисным и адырным ландшафтам Ферганской долины.

Ключевые слова: MSPA, MCR, экологический каркас, экологическая безопасность, экологический источник, экологический коридор, поверхность сопротивления, индекс dPC, теория электрических цепей, Ферганская долина.

Abduganiev O.I.,
Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor
Fergana State University
Mamirova Z.I.,
Doctoral Candidate, Department of Geography
Fergana State University
Uzbekistan, Fergana

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF MSPA AND MCR MODELS AND INTERNATIONAL EXPERIENCE OF THEIR APPLICATION

Abstract: The article systematizes the theoretical foundations, algorithms and parameters of Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) and the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model used to identify ecological sources and corridors. MSPA identifies potential sources and connecting elements from the geometry of a binary raster, while MCR models least-cost paths between them across a resistance surface. Based on case studies from Spain, Yunnan Province and the arid Zhundong region (Xinjiang), a four-stage integrated approach supplemented by connectivity indices and circuit theory is summarized. Recommendations are formulated for adapting the approach to the oasis and foothill landscapes of the Fergana Valley.

Keywords: MSPA, MCR, ecological framework, ecological security, ecological source, ecological corridor, resistance surface, dPC index, circuit theory, Fergana Valley.

Введение

В ландшафтной экологии связность (connectivity) определяется как степень, в которой структура ландшафта облегчает или затрудняет перемещение организмов [1]. Вместе с моделью «патч – коридор – матрица» [2] это понятие составляет теоретическую основу проектирования экологических сетей и экологического каркаса. Первый и ключевой этап формирования каркаса – выделение экологических источников (ядер) и связывающих их экологических коридоров. При традиционном подходе такие территории определяются экспертно или по административным критериям (например, по границам существующих охраняемых территорий). В результате их выделение субъективно и плохо воспроизводимо на другой территории.

В ответ на эту проблему в ландшафтной экологии сложилось несколько взаимодополняющих количественных подходов. Первый – теория графов, представляющая ландшафт как систему узлов (патчей) и рёбер (связей) [3]. Второй – морфологический анализ пространственной структуры (Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA), применяющий операции математической морфологии к ландшафтной мозаике [4; 5]. Третий – модель минимального кумулятивного сопротивления (Minimum Cumulative Resistance, MCR), учитывающая наряду с расстоянием сопротивление ландшафта перемещению [6; 7]. Четвёртый – теория электрических цепей, моделирующая случайное перемещение организмов как электрический ток [8].

С 2010-х годов, особенно в быстро урбанизирующихся регионах Китая, эти методы объединены в единую последовательность: источники выделяются с помощью MSPA и индексов связности, коридоры – с помощью MCR, а «узкие места» – с помощью теории электрических цепей [9]. Критерии применения подхода MSPA–MCR для Ферганской области уже рассматривались [10], однако параметры методов и их адаптация к

аридным оазисным ландшафтам освещены недостаточно, что и определяет актуальность статьи.

Цель статьи – систематизировать научно-методические основы моделей MSPA и MCR и проанализировать зарубежный опыт их применения. **Задачи:** 1) описать математико-морфологические основы, алгоритм классификации и параметры MSPA; 2) описать теоретическую основу, формулу MCR и способы построения поверхности сопротивления; 3) показать, как выбор источников уточняется индексами связности и дополняется теорией электрических цепей; 4) обобщить зарубежный опыт интегрированного подхода и определить перспективы его адаптации к условиям Ферганской долины.

Материалы и методы

Исследование выполнено в форме аналитического обзора. В анализ включены первоисточники, опубликованные авторами методов, описания широко используемых программных средств и прикладные исследования в различных природных условиях. Критерии отбора: соответствие теме, рецензируемость публикации, наличие в ней параметров и результатов метода. Всего проанализировано 22 источника: 16 посвящены теоретико-методическим основам методов и программных средств, 4 – прикладным исследованиям, 2 – общим теоретическим понятиям.

Применены сравнительно-аналитический метод, описательный анализ алгоритмов и сопоставление функциональных возможностей программных средств (GUIDOS Toolbox, ArcGIS Spatial Analyst, GRASS GIS, Conefor, Linkage Mapper, Circuitscape). Для иллюстрации принципа работы MCR на условном растре (60 × 100 ячеек) рассчитаны кумулятивное сопротивление и путь наименьшей стоимости. Расчёт выполнен в среде Python с использованием алгоритма MCP_Geometric библиотеки scikit-image.

Результаты и обсуждение

Научно-методические основы MSPA. Метод MSPA перенесён в ландшафтную экологию из математической морфологии и цифровой обработки изображений П. Фогтом, П. Суаем и соавторами [4; 5]. Исходные данные – бинарный растр, в котором передний план (foreground) составляет анализируемый покров (например, лес или естественная растительность), а фон (background) – все остальные типы покрова. С помощью операций эрозии, дилатации, открытия и закрытия пиксели переднего плана по взаимному расположению разделяются на семь непересекающихся классов (рис. 1, табл. 1).

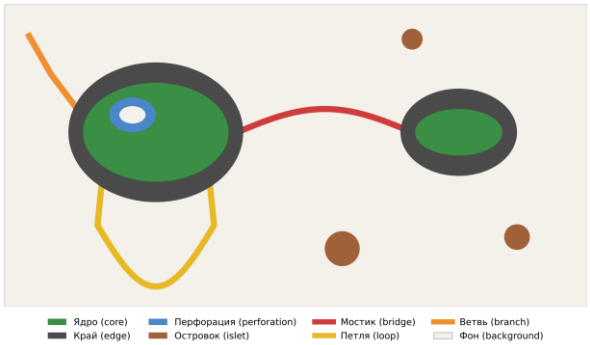


Рис. 1. Схема структурных классов, выделяемых методом MSPA (составлено автором)

Таблица 1

Классы MSPA и их экологическое значение

Класс	Определение	Экологическое значение
Ядро (core)	Внутренние пиксели, удалённые от фона более чем на ширину края	Потенциальный экологический источник; далее отбирается по площади и dPC
Край (edge)	Внешний слой ядра на границе с фоном	Зона краевого эффекта, рассматривается как буфер
Перфорация (perforation)	Слой вокруг участков фона внутри ядра	Внутреннее нарушение целостности ядра
Островок (islet)	Мелкий изолированный участок без ядра	Может служить промежуточной опорой (stepping stone)
Мостик (bridge)	Элемент, соединяющий два и более разных ядра	Структурный коридор, приоритет охраны
Петля (loop)	Элемент, соединяющий две точки одного ядра	Альтернативный путь перемещения внутри ядра
Ветвь (branch)	Элемент, одним концом примыкающий к ядру или мостику, другим свободный	Потенциал расширения, связи не обеспечивает

Источник: составлено автором по [4; 5; 11].

Результат классификации зависит от нескольких параметров. **Первый** – правило соседства пикселей переднего плана (4 или 8 направлений). **Второй** – ширина края (edge width): она задаётся в пикселях и на местности равна произведению размера пикселя на ширину края. Например, при пикселе 10 м и ширине края 3 она составляет 30 м. **Третий** – параметр перехода (transition): он определяет, показывать ли участки мостиков и петель, пересекающие ядро, как край или как мостик. В зависимости от масштаба анализа (размер пикселя и ширина края) доля ядер и мостиков заметно меняется [12]. Поэтому параметры должны обосновываться чувствительностью изучаемого вида к краевому эффекту и проверяться анализом чувствительности.

Метод реализован в бесплатной программе GUIDOS Toolbox, разработанной Объединённым исследовательским центром Европейской комиссии [11]. Главное преимущество MSPA: результат зависит только от геометрии растра и параметров и полностью воспроизводим. Однако метод отражает лишь структурную связность. Для оценки функциональной связности результаты MSPA предложено анализировать совместно с дальностью расселения вида и методами теории графов [13].

Научно-методические основы MCR. Модель MCR основана на идее «стоимость – расстояние» (cost-distance). Её предложили Я.П. Кнапен и соавторы для оценки изоляции местообитаний [6]. Позднее Юй Кунцзянь развил её в концепции «экологического паттерна безопасности» (security pattern) [7]. Каждой ячейке ландшафта присваивается числовое значение сопротивления (resistance, friction), которое она оказывает перемещению организма или процесса. Минимальное кумулятивное сопротивление от источника до любой точки рассчитывается по формуле:

$$MCR = f \min \Sigma (D_{ij} \times R_i), \quad (1)$$

где D_{ij} – расстояние от источника j до ландшафтной единицы i; R_i – коэффициент сопротивления единицы i перемещению; f – неизвестная

монотонная функция, отражающая положительную связь кумулятивного сопротивления с экологическим процессом. На практике вид f не задаётся: относительная величина кумулятивного сопротивления показывает доступность источников. Сумма вычисляется по всем путям от источника до точки, и выбирается минимальное значение.

Расчёт выполняется инструментами «стоимость – расстояние» в ГИС: функциями Cost Distance и Cost Path модуля ArcGIS Spatial Analyst или модулем r.cost в GRASS GIS. Линия, проходящая через минимум кумулятивного сопротивления между двумя источниками, является путём наименьшей стоимости (least-cost path, LCP), то есть осью потенциального коридора (рис. 2).

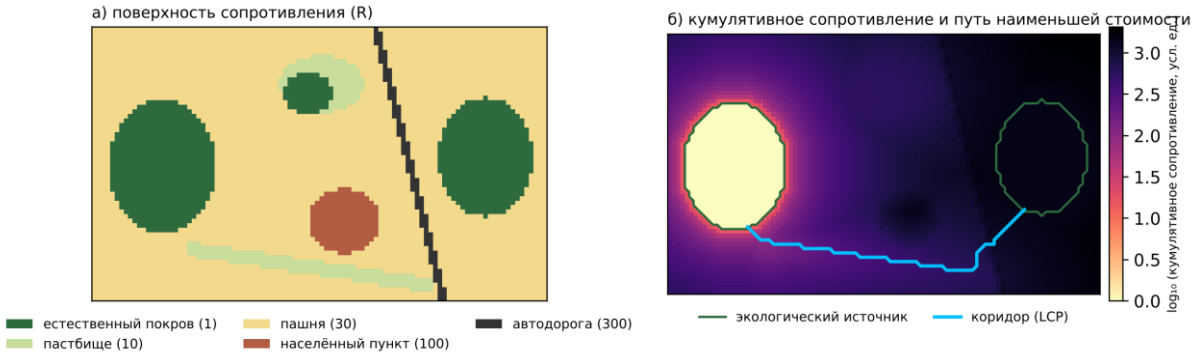


Рис. 2. Условный пример модели MCR: а) типы земного покрова и их коэффициенты сопротивления; б) кумулятивное сопротивление от источника А (логарифмическая шкала) и путь наименьшей стоимости до источника Б (расчёт автора)

В условном примере путь наименьшей стоимости проходит не по прямой, а по полосе пастбищ с низким сопротивлением. Он огибает населённый пункт и пересекает автодорогу в одной точке. В реальном ландшафте такое пересечение соответствует месту, где необходим экологический переход. Пример показывает, что направление коридора и места его пересечения с барьерами сильно зависят от коэффициентов сопротивления.

Наиболее уязвимое звено модели – поверхность сопротивления. В большинстве исследований коэффициенты назначаются экспертно или по

литературным данным. Однако обзор 96 работ показал, что оценки на основе эмпирических данных (встречи видов, траектории перемещения, генетические данные) надёжнее [14]. Основные факторы, формирующие поверхность сопротивления, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные факторы, учитываемые при построении поверхности сопротивления

Фактор	Влияние на сопротивление	Источник данных
Тип земного покрова и землепользования	Низкое для естественного покрова, высокое для пашни и застройки	Классификация снимков Landsat, Sentinel-2
Уклон и высота рельефа	Растёт с увеличением уклона (зависит от вида)	Цифровая модель рельефа (SRTM, ALOS)
Расстояние до дорог и населённых пунктов	Растёт по мере приближения	Топографические и инфраструктурные слои
Вегетационный индекс (NDVI)	Снижается с увеличением густоты растительности	Мультиспектральные снимки
Водные объекты и каналы	Барьер для наземных видов, коридор для водных и околоводных	Гидрографические слои

Источник: составлено автором по [14; 15; 9].

Отбор источников и теория электрических цепей. Не все ядра, выделенные MSPA, становятся экологическими источниками. Обычно их отбирают по двум критериям: пороговой площади и вкладу в связность. Для оценки вклада применяются индексы теории графов. Индекс вероятности связности (PC) рассчитывается так [16]:

$$PC = (\Sigma_i \Sigma_j a_i a_j p^*_{ij}) / A_L^2, \quad (2)$$

где a_i, a_j – площади патчей; p^*_{ij} – максимальная вероятность расселения между патчами i и j (напрямую или через другие патчи); A_L – общая площадь исследуемой территории. Значимость каждого патча оценивается по снижению индекса при его удалении:

$$dPC_k = 100 \times (PC - PC_{k,remove}) / PC. \quad (3)$$

По той же логике, но на основе бинарной модели связи рассчитывается интегральный индекс связности IIC [17]. Индексы вычисляются в бесплатной программе Conefor [18]. При этом задаются пороговое расстояние, соответствующее дальности расселения вида, и

вероятность расселения на этом расстоянии (чаще 0,5). Сочетание MSPA с анализом графов позволило выявить небольшое число ядер и мостиков, обеспечивающих основную часть связности лесной сети [19].

Теория электрических цепей представляет ландшафт как сеть резисторов и моделирует перемещение случайно блуждающего организма как электрический ток [8]. Если MCR указывает единственный оптимальный путь, то карта плотности тока показывает все альтернативные пути и «узкие места» (pinch-points), где концентрируется перемещение. Метод выявления барьеров количественно оценивает, восстановление какого участка сильнее всего повысит связность [20]. Обзор 459 работ, ссылающихся на теорию цепей и Circuitscape, показал, что подход применяется от изучения перемещений животных и потока генов до распространения пожаров и водных потоков [21]. MCR, графовый анализ и теория цепей объединены в наборе инструментов Linkage Mapper [22].

Интегрированный подход MSPA–MCR: зарубежный опыт. В рассмотренных исследованиях интегрированный подход включает четыре этапа (рис. 3). На первом этапе по карте земного покрова выполняется MSPA и выделяются ядра. На втором они ранжируются по площади и индексам dPC/IIC и отбираются в качестве экологических источников.

На третьем строится поверхность сопротивления и с помощью MCR определяются потенциальные коридоры между источниками. На четвёртом с помощью теории электрических цепей выявляются узкие места и барьеры в коридорах, которые становятся приоритетными участками для восстановления и охраны. Результаты исследований в различных природных условиях сопоставлены в таблице 3. В центральной Испании сочетание MSPA и анализа графов позволило выявить ключевые ядра и мостики, обеспечивающие основную часть связности сети [19].

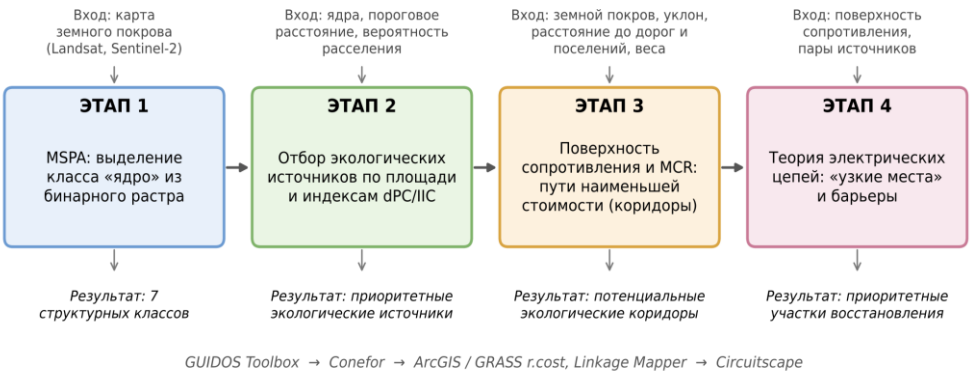


Рис. 3. Этапы интегрированного подхода MSPA – MCR – теория электрических цепей (составлено автором)

В провинции Юньнань (Китай) на основе экосистемных услуг выделено 66 экологических источников, а с помощью теории цепей – 186 коридоров, 24 узких места и 10 барьеров. Около 75,9 % существующих заповедников оказались внутри выделенных источников [9], что косвенно подтверждает надёжность метода.

Ближайший аналог для Центральной Азии – исследование в аридном районе Чжундун Синьцзян-Уйгурского автономного района [15]. В нём по снимкам Sentinel-2 с разрешением 10 м передним планом приняты водные объекты и растительность. Из ядер MSPA в качестве источников отобраны 10 с наибольшим dPC (пороговое расстояние 500 м, вероятность 0,5). Поверхность сопротивления построена по шести факторам: земной покров, NDVI, уклон, высота, расстояние до дорог и до угольных месторождений. Веса факторов определены методом анализа иерархий. Выявлено 38 коридоров общей длиной 1543,33 км в 2016 г. и 36 коридоров длиной 1328,78 км в 2021 г., что свидетельствует о сокращении экологической сети под влиянием промышленного освоения.

Таблица 3

Сравнительная характеристика исследований с применением MSPA, MCR и теории цепей

Исследование, территория	Выделение источников	Коридоры и ключевые участки	Основной результат
Saura и др. [19], центральная Испания (леса)	MSPA (GUIDOS) + индексы графов (Conefor)	Вклад мостиков и ядер в сеть	Небольшое число ключевых ядер и мостиков обеспечивает

			основную часть связности
Peng и др. [9], Юньнань, Китай	По экосистемным услугам	Теория цепей: плотность тока, узкие места, барьеры	66 источников, 186 коридоров, 24 узких места, 10 барьеров
Jiang и др. [15], Чжундун, Синьцзян (аридный район)	MSPA + dPC (500 м, p = 0,5), 10 источников	MCR, поверхность сопротивления по 6 факторам (AHP)	За 2016–2021 гг. число коридоров сократилось с 38 до 36, длина – с 1543 до 1329 км
McRae и др. [20], разработка метода	Заданные источники	MCR + выявление барьеров	Метод количественной оценки эффекта восстановления

Источник: составлено автором по указанным исследованиям.

Главные преимущества интегрированного подхода – объективность, воспроизводимость и сравнительно небольшие требования к данным: достаточно растра земного покрова и таблицы коэффициентов сопротивления. Это позволяет применять его в разных масштабах, от локального до регионального, с использованием бесплатных программ (GUIDOS Toolbox, QGIS, GRASS GIS, Conefor, Circuitscape). Кроме того, этапы взаимно проверяют друг друга: мостики MSPA сопоставляются с коридорами MCR, а теория цепей показывает альтернативы единственному пути, выбранному MCR.

Таблица 4

Программные средства интегрированного подхода

Средство	Теоретическая основа	Функция в подходе
GUIDOS Toolbox [11]	Математическая морфология (MSPA)	Разделяет бинарный растр на семь структурных классов
Conefor [18]	Теория графов (IIC, PC, dPC)	Оценивает вклад ядер и патчей в связность
ArcGIS Spatial Analyst / GRASS r.cost	«Стоимость – расстояние» (MCR)	Рассчитывает кумулятивное сопротивление и пути наименьшей стоимости
Linkage Mapper [22]	MCR + графы + теория цепей	Картирует коридоры, выявляет узкие места и барьеры
Circuitscape [8; 21]	Теория электрических цепей	Рассчитывает плотность тока и узкие места

Вместе с тем у подхода есть ограничения. **Во-первых**, MSPA – структурный метод: он оценивает форму переднего плана, но не учитывает проницаемость матрицы для видов [13]. **Во-вторых**, результаты чувствительны к размеру пикселя и ширине края [12], поэтому необходим анализ чувствительности. **В-третьих**, коэффициенты сопротивления чаще

назначаются экспертно и не в полной мере отражают видоспецифичную функциональную связность [14]. **В-четвёртых**, методы разработаны преимущественно для урбанизированных территорий Китая и умеренных лесных ландшафтов Европы, а примеры их применения в аридных регионах немногочисленны [15].

При адаптации подхода к Ферганской долине необходимо учитывать следующие особенности. **Выбор переднего плана.** Орошаемая пашня в вегетационный период имеет высокий NDVI. Поэтому передним планом следует принимать не вегетационный индекс, а естественные и полуестественные типы покрова: тугаи, растительность адыров и предгорий, песчаные массивы, водно-болотные угодья. **Ширина края.** При разрешении Sentinel-2 (10 м) целесообразно выполнять анализ чувствительности, варьируя ширину края от 1 до 3 пикселей (10–30 м). **Поверхность сопротивления.** Основные антропогенные факторы – оросительная сеть (Большой Ферганский канал и др.), автодороги, населённые пункты и карьеры. Каналы служат барьером для наземных видов и коридором для водных и околоводных, поэтому поверхности сопротивления следует строить отдельно для групп видов. **Калибровка.** Коэффициенты необходимо проверять по местонахождениям видов Красной книги и полевым наблюдениям [14].

Ограничение данного исследования – его обзорно-аналитический характер: подход не апробирован на данных конкретной территории, а расчёт на рисунке 2 выполнен на условных данных. Апробация подхода на основе ландшафтной карты Ферганской области и данных дистанционного зондирования – задача дальнейших исследований.

Заключение

1. MSPA и MCR – взаимодополняющие инструменты воспроизводимого выделения экологических источников и коридоров.

MSPA выделяет источники по геометрии растра, MCR связывает их путями наименьшей стоимости по поверхности сопротивления.

2. Современная форма подхода включает четыре этапа: MSPA, отбор источников по индексам графов (dPC, IIC), MCR и теорию электрических цепей. Такая схема снижает субъективность выбора источников и указывает приоритетные точки восстановления (узкие места, барьеры).

3. Надёжность результатов определяется корректным выбором переднего плана, обоснованием ширины края и размера пикселя, а также калибровкой коэффициентов сопротивления по эмпирическим данным. Для Ферганской долины рекомендуется строить отдельные поверхности сопротивления для групп видов и учитывать двоякую роль каналов.

Список использованных источников

1. Taylor P.D., Fahrig L., Henein K., Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure // Oikos. – 1993. – Vol. 68, № 3. – P. 571–573.
2. Forman R.T.T. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. – Cambridge: Cambridge University Press, 1995. – 656 p.
3. Urban D., Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective // Ecology. – 2001. – Vol. 82, № 5. – P. 1205–1218.
4. Vogt P., Riitters K.H., Estreguil C., Kozak J., Wade T.G., Wickham J.D. Mapping spatial patterns with morphological image processing // Landscape Ecology. – 2007. – Vol. 22, № 2. – P. 171–177.
5. Soille P., Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns // Pattern Recognition Letters. – 2009. – Vol. 30, № 4. – P. 456–459.
6. Knaapen J.P., Scheffer M., Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning // Landscape and Urban Planning. – 1992. – Vol. 23, № 1. – P. 1–16.
7. Yu K. Security patterns and surface model in landscape ecological planning // Landscape and Urban Planning. – 1996. – Vol. 36, № 1. – P. 1–17.
8. McRae B.H., Dickson B.G., Keitt T.H., Shah V.B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation // Ecology. – 2008. – Vol. 89, № 10. – P. 2712–2724.
9. Peng J., Yang Y., Liu Y., Hu Y., Du Y., Meersmans J., Qiu S. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 644. – P. 781–790.
10. Komilova T.D. MSPA-MCR modeli asosida ekologik karkasni shakllantirish va optimallashtirish mezonlari [Критерии формирования и оптимизации экологического каркаса на основе модели MSPA–MCR] // FarDU ilmiy xabarlari. – 2025. – T. 31, № 6. – C. 274.

11. Vogt P., Riitters K. GuidosToolbox: universal digital image object analysis // European Journal of Remote Sensing. – 2017. – Vol. 50, № 1. – P. 352–361.
12. Ostapowicz K., Vogt P., Riitters K.H., Kozak J., Estreguil C. Impact of scale on morphological spatial pattern of forest // Landscape Ecology. – 2008. – Vol. 23, № 9. – P. 1107–1117.
13. Vogt P., Ferrari J.R., Lookingbill T.R., Gardner R.H., Riitters K.H., Ostapowicz K. Mapping functional connectivity // Ecological Indicators. – 2009. – Vol. 9, № 1. – P. 64–71.
14. Zeller K.A., McGarigal K., Whiteley A.R. Estimating landscape resistance to movement: a review // Landscape Ecology. – 2012. – Vol. 27, № 6. – P. 777–797.
15. Jiang J., Abulizi A., Abliz A., Zayiti A., Akbar A., Ou B. Construction of landscape ecological security pattern in the Zhundong Region, Xinjiang, NW China // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19, № 10. – 6301.
16. Saura S., Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study // Landscape and Urban Planning. – 2007. – Vol. 83, № 2–3. – P. 91–103.
17. Pascual-Hortal L., Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the priorization of habitat patches and corridors for conservation // Landscape Ecology. – 2006. – Vol. 21, № 7. – P. 959–967.
18. Saura S., Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity // Environmental Modelling & Software. – 2009. – Vol. 24, № 1. – P. 135–139.
19. Saura S., Vogt P., Velázquez J., Hernando A., Tejera R. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses // Forest Ecology and Management. – 2011. – Vol. 262, № 2. – P. 150–160.
20. McRae B.H., Hall S.A., Beier P., Theobald D.M. Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7, № 12. – e52604.
21. Dickson B.G., Albano C.M., Anantharaman R., et al. Circuit-theory applications to connectivity science and conservation // Conservation Biology. – 2019. – Vol. 33, № 2. – P. 239–249.
22. McRae B.H., Kavanagh D.M. Linkage Mapper Connectivity Analysis Software. – Seattle: The Nature Conservancy, 2011.