

Оригинальная статья / Original article

УДК: 911.6 + 528.942

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-16



Гексагональная геопространственная модель ландшафтного разнообразия северного подрайона дельты реки Волга

Виктор В. Занозин¹, Александр Н. Бармин¹, Валерий В. Занозин¹, Станислав А. Ямашкин²,
Виктория А. Корень¹, Елена В. Занозина¹

¹Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, Астрахань, Россия

²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

Контактное лицо

Занозин Виктор Валерьевич, кандидат географических наук, доцент; кафедра экологии, природопользования, землеустройства и безопасности жизнедеятельности; ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева», 414056, Южный федеральный округ, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а.
Тел. +79885916078
Email victor_z94@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1854-516X>

Формат цитирования

Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В., Ямашкин С.А., Корень В.А., Занозина Е.В. Гексагональная геопространственная модель ландшафтного разнообразия северного подрайона дельты реки Волга // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 181-196. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-16

Получена 17 февраля 2024 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2024 г.

Принята 26 апреля 2024 г.

Резюме

Цель: проанализировать ландшафтное разнообразие (ЛР) северного подрайона дельты реки Волга с помощью ряда математических операций.

Работа основана на камеральных и полевых ландшафтных исследованиях. В работе использовались такие методы как описательный, геоинформационный, анализ данных дистанционного зондирования Земли.

Для северного подрайона ландшафта дельты Волги на основе математического аппарата был рассчитан набор индексов ландшафтного разнообразия, а также была оценена энтропийная сложность ландшафтного рисунка (или индекс разнообразия Шеннона) исследуемого региона. Результаты анализа позволили выявить на данной территории два ареала с достаточно высокими показателями ландшафтного разнообразия.

ЛР является одной из важнейших физико-географических характеристик территории, позволяет оценить устойчивость геосистем к антропогенным нагрузкам, отразить характер хозяйственного освоения и использования геосистем, их природоохранный потенциал. Сопоставление показателей ЛР и ретроспективного анализа хозяйственного освоения дельты Волги показало, что территории с низким показателем ландшафтного разнообразия чаще использовались в сельском хозяйстве, так как одно большое урочище легче адаптировать под хозяйственные нужды. Участки со сложной морфологической структурой, и, соответственно, высоким уровнем ландшафтного разнообразия, сильному антропогенному влиянию не подвержены.

Ключевые слова

дельта Волги, ландшафтное разнообразие, геосистема, урочище, гексагон, ландшафтный выдел, ландшафтный контур, ландшафтный рисунок, разнообразие.

Hexagonal geospatial model of landscape diversity in the northern sub-area of the Volga River Delta landscape, Russia

Victor V. Zanozin¹, Alexander N. Barmin¹, Valery V. Zanozin¹, Stanislav A. Yamashkin²,
Viktoriya A. Koren¹ and Elena V. Zanozina¹

¹Tatishchev Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

²Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Principal contact

Zanozin Victor Valerievich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Chair of Ecology, Nature Management, Land Management and Life Safety, Tatishchev Astrakhan State University; 20a Tatishchev St, Astrakhan, Astrakhan Region, Russia 414056.
Tel. +79885916078
Email victor_z94@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1854-516X>

How to cite this article

Zanozin V.V., Barmin A.N., Zanozin V.V., Yamashkin S.A., Koren V.A., Zanozina E.V. Hexagonal geospatial model of landscape diversity in the northern sub-area of the Volga River Delta landscape, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(2):181-196. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-16

Received 17 February 2024

Revised 14 April 2024

Accepted 26 April 2024

Abstract

The aim is to analyse the landscape diversity (LD) of the northern sub-area of the Volga River delta landscape using a series of mathematical operations.

The work is based on full-stack landscape works including field experiments. Descriptive method, GIS-analysis and remote sensing data were used in the work.

A set of landscape diversity indices was calculated for the northern sub-area of the Volga Delta landscape on the basis of mathematical apparatus and the entropic complexity of landscape pattern (or Shannon diversity index) of the studied region was estimated. The results of the analysis made it possible to identify two habitats with rather high landscape diversity indices in this region

LD is one of the most important geographical characteristics of the region and allows assessment of the stability of geosystems to anthropogenic loads, reflection on the nature of economic development and use of geosystems and their conservation potential. By comparing HR indicators and retrospective analysis of economic development of the Volga River Delta, it was found that areas with low landscape diversity index were more often used for agriculture, as single large tracts are easier to adapt to economic needs. Areas with a complex morphological structure and, accordingly, a high level of landscape diversity are generally not subject to most types of economic impact.

Key Words

Volga River Delta, landscape diversity, geosystem, landscape unit, hexagon, landscape allotment, landscape contour, landscape pattern, diversity.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение как биологического, так и ландшафтного разнообразия имеет в настоящее время важное теоретическое и прикладное значение в области устойчивого развития регионов. Высокие показатели разнообразия помогают стабилизировать экологическую ситуацию, уменьшить влияние негативного антропогенного воздействия на геосистемы.

Формирование ландшафтно-экологического каркаса является актуальной задачей в связи с принятием Стратегии развития сети ООПТ в России до 2030 года. Территории, обладающие высокими показателями ландшафтного разнообразия, признаны стать ядерными объектами экологического каркаса. Такие территории должны сконцентрировать в себе все природные эталоны физико-географических провинций [1].

Ландшафтная структура территории имеет большое значение, так как определяет ландшафтное разнообразие и влияет на устойчивость гео- и экосистем. Эти факторы сильно влияют на многие экологические процессы и являются важными для сохранения природной среды [2; 3].

Актуальность анализа ландшафтного разнообразия подтверждается и в последних теоретических ландшафтных исследованиях [4]. Оценка ландшафтного разнообразия (далее – ЛР) является неотъемлемой частью изучения экологических проблем и составления планов устойчивого развития регионов [5].

В последнее время, несмотря на широкий спектр исследований, посвящённых как пространственно-временной организации геосистем для реализации стратегии устойчивого развития, так и по анализу ландшафтного разнообразия [6–8], само “ландшафтное разнообразие” (landscape diversity) как термин, по утверждениям исследователей [9; 10], не имеет чёткого общепринятого определения.

Анализируя работы зарубежных исследователей, исследователей советского и постсоветского пространства, можно проследить несколько подходов к определению разнообразия (в том числе и ландшафтного).

Согласно [11] существует три типа разнообразия: георазнообразие, биоразнообразие и разнообразие человеческой деятельности. Георазнообразие – это разнообразие абиотических систем, таких как рельеф или тип почвы. Согласно [12] георазнообразие выражается пятью различными показателями: геоморфологией, почвой, гидрологией, литологией и наличием минералов/полезных ископаемых. Оценка георазнообразия же зависит от цели анализа, типа ландшафта на исследуемой территории и его пространственном измерении, и, прежде всего, наличия пространственных данных в соответствующем масштабе, в том числе и в цифровой форме [13].

Ряд авторов выделяют прямые и косвенные методы анализа георазнообразия [14]. Прямые методы предполагают проведение полевых работ для расчёта ценности георазнообразия для конкретных компонентов природной среды, таких как почвы, горные породы, типы рельефа и т.д. При использовании косвенных методов производят расчёты по растровым или векторным данным в среде ГИС. Преимуществом использования косвенных методов

является экономия времени и средств за счёт сокращения полевых работ до минимума.

Особый подход для описания ландшафтного разнообразия, отмечаемый у западных исследователей, связан с представлением о трёх фундаментальных типах элементов для описания ландшафтной структуры: *patches* – патчи, *corridors* – коридоры и *matrix* – матрицы [15], когда исследователи для оценки разнообразия опираются на анализ дешифрирования данных дистанционного зондирования и применяют метрики ландшафтной экологии [16]. Понятие разнообразия и его оценка является одной из ключевых концепций экологии вообще и ландшафтной экологии в частности.

Другой подход заключается в том, что в понятие биоразнообразия уже включено определение ландшафтного разнообразия. Ландшафт здесь – симбиоз элементов, таких как виды растений, животные, типы использования земель. Разнообразие ландшафтов представляется здесь как их – ландшафтов – число в изучаемой географической области [17].

У других авторов видим несколько показателей для оценки морфологической структуры ландшафтов: сложность, как проявление количества морфологических единиц в ландшафте; разнообразие, как проявление количества различных одноранговых геосистем в пределах одного ландшафта; дробность, как проявление количества обособленных геосистем в пределах ландшафта и характер рисунка – характер распределения более дробных геосистем в пространстве [18].

В свою очередь, ландшафтный рисунок – “пространственная мозаика, которую образуют на земной поверхности участки, соответствующие развитым на этой территории природным территориальным комплексам или микрообразованиям комплексного характера” [19].

Одно из первых официальных определений ландшафтного разнообразия даётся в Пан-европейской стратегии сохранения биологического и ландшафтного разнообразия от 25 октября 1995 г.: «Ландшафтное разнообразие – это внешняя форма выражения многочисленных взаимоотношений, существующих в определённый период между индивидуумами или социумом и топографически обозначенной территорией, появление (состояние) которой через какое-то время является результатом действия природного и человеческого факторов и их комбинаций» [20].

ЛР может стать сложным интегральным показателем в оценке иерархической организации ландшафтной структуры [21; 22]. В аналитической работе [10] выделяется четыре значения ЛР: структурно-функциональное или системное, геокомпонентное, геоэволюционное и социально-экономическое. Такой подход к пониманию ЛР затрагивает как структуру, иерархичность и функционирование ландшафта, эволюционные процессы в природе, так и особенности отношения человека к окружающей среде.

Вышеизложенное подтверждает актуальность проведения анализа ландшафтного разнообразия в современных исследованиях в сфере природопользования и охраны окружающей среды. В свете различных тенденций освоения ресурсного потенциала ландшафтов, их сохранения и защиты от

антропогенного воздействия, становится необходимым разработать специальный набор региональных экологических критериев для устойчивого развития. В этой связи, важным компонентом таких критериев является сохранение ЛР [23].

Итого выделяется два основных подхода к изучению ЛР. При первом варианте в работе используются преимущественно данные дистанционного зондирования Земли, когда на основе отражательных свойств ландшафта при анализе ЛР учитываются «размеры, форма и связанность различных экосистем на протяжении большой территории» [17]. При втором подходе ЛР анализируется как количественно (ведётся учёт каждой геосистемы с использованием математического аппарата и статистики), так и качественно, когда оперируют геосистемами разного иерархического уровня (фация, подурочище, урочище) или видами ландшафтов в пределах рода или ландшафтного района. В первом случае говорят о морфологическом аспекте, при втором – таксономическом. Также ЛР рассматривают в рамках элементов геометрической сетки (территориальный аспект) [24].

В рамках настоящего исследования ландшафтное разнообразие рассчитано через ряд математических операций, позволяющих оценить разнообразие природных территориальных комплексов (геосистем) уровня урочищ, составляющих пространственную структуру комплекса более высокого ранга – подрайона ландшафта дельты Волги, что представляет своего рода симбиоз морфологического и территориального аспектов. В ходе естественного развития, в дельте Волги сформировался неповторимый ландшафт со специфическим набором локальных геосистем, которые и создают ландшафтное разнообразие дельты Волги. В данной работе представлены результаты впервые выполненного анализа ландшафтного разнообразия северного подрайона ландшафта дельты Волги.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка ЛР проводилась на территорию северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. Работа по анализу границ дельты Волги продолжает ранее проводимые исследования [25], и в настоящей работе северный подрайон ландшафта дельты реки Волга имеет следующие границы (рисунок 1а).

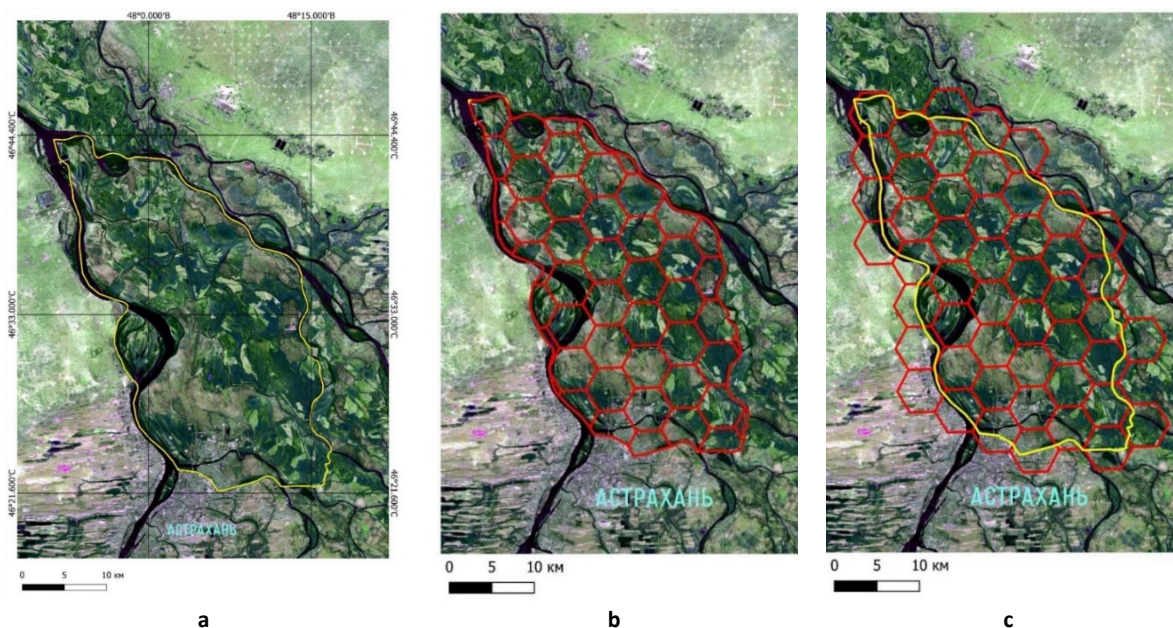


Рисунок 1. Снимок аппарата Sentinel 2A от 15.07.2022. а – территория северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. Покрывание территории исследования сеткой операционной территориальной единицы: б – дробным гексагоном, с – полноразмерным гексагоном. Граница северного подрайона указана жёлтой линией
Figure 1. Sentinel 2A image from 15.07.2022. а – Territory of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape. Coverage of the study area by the grid of the hexagon-operational-territorial-unit (b – fractional hexagon, c – full-size hexagon). The boundary of the northern area is indicated within the yellow line

Северный подрайон ландшафта дельты Волги начинается с приверха речного острова к юго-востоку от н.п. Верхнелебяжье, где по северо-восточной границе района, огибая о. Большой Осередок, от Волги отделяется рукав Бузан. Далее граница района идёт по правому берегу Бузана, параллельно Ахтубе. В районе острова Чистый Яр начинается восточная часть границы северного подрайона дельты по р. Шмагина до её впадения в р. Белый Ильмень. У села Раздор, где р. Быстрая впадает в Белый Ильмень, начинается юго-восточная граница северного подрайона, которая проходит по рукавам Быстрая и Бушма. Южная граница подрайона проходит по левобережью рукава Прямая

Болда. Началом западного рубежа можно считать место отделения от русла Волги рукава Кривая Болда. Здесь западная граница северного подрайона поднимается вверх по течению Волги, вдоль левого берега до приверха речного острова к юго-востоку от н.п. Верхнелебяжье.

Для выявления коренных природных территориальных комплексов северного подрайона ландшафта дельты реки Волга были проанализированы архивные картографические данные. Отдельно были проведены комплексные полевые маршрутные исследования, последовавшие после начальных камеральных исследований. Изучение ПТК

проводилось также и с применением геоинформационного метода, геоинформационных технологий (ГИС) и с привлечением данных дистанционного зондирования Земли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

До начала анализа ландшафтного разнообразия северного района ландшафта дельты Волги были проведены расчёты количества ландшафтных контуров или ландшафтных выделов (здесь и далее под “ландшафтным контуром”/“ландшафтным выделом” понимается одно обособленное урочище) и их площади внутри исследуемого региона.

Площадь северного подрайона (включая реки, водотоки, протоки) составила 789,588 км². Морфологически подрайон представлен только одной группой урочищ – русловых, но в эту группу входит несколько видов урочищ: русловые пологоволнистые, русловые гривистые, русловые плоские, русловые мелкогривистые, прирусловые валы [26].

При общей площади урочищ в 722,105 км² (без учёта рек, водотоков, протоков) количество ландшафтных выделов в границах северного подрайона ландшафта дельты реки Волга составило 115, из них 11 русловых урочищ высокого уровня (39,21 км²), 11 русловых гривистых урочищ среднего уровня (43,10 км²), 6 русловых гривистых урочищ низкого уровня (30,12 км²), 7 русловых пологоволнистых урочищ высокого уровня (31,77 км²), 9 русловых пологоволнистых урочищ среднего уровня (106,6 км²), 8 русловых пологоволнистых урочищ низкого уровня (78,88 км²), 9 русловых пологовогнутых урочищ низкого уровня (46,721 км²), 8 мелкогривистых русловых урочищ высокого уровня (42,42 км²), 6 мелкогривистых русловых урочищ среднего уровня (65,709 км²), 23 мелкогривистых русловых урочища низкого уровня (124,312 км²), 11 русловых плоских урочищ низкого уровня (102,783 км²), 2 русловых плоских урочища среднего уровня (7,47 км²), 1 русловое плоское урочище высокого уровня (1 км²) и 3 прирусловых вала (2 км²). По итогам работы над выявлением основных ПТК в среде ГИС был построен векторный слой, содержащий в себе пространственную и атрибутивную информацию о каждом урочище в пределах исследуемого региона.

Как было описано выше, в качестве областей, внутри которых может производиться анализ и оценка ЛР, могут быть административно-территориальные единицы (районы и области, сельские администрации), ландшафтные единицы (ландшафтные районы и провинции) [27]. Также применяются речные бассейны разного ранга, границы особо охраняемых природных территорий. Одна из последних работ по анализу ЛР была проведена внутри охранных зон островных территорий [28]. Также успешно применяют иной способ пространственного анализа, когда на территорию исследования накладывают элементы (ячейки) правильной геометрической сетки [29; 30] или, ОТЕ (операционных территориальных единиц). При таком способе достигается простота, удобство и экономичность анализа данных. При проведении пространственного анализа сеть правильных ячеек должна быть наложена на территорию так, чтобы каждый взаимодействующий между собой объект находился в границах одной определённой ячейки. Как показали исследования, такой подход может быть с

успешностью реализован в гексагональных ячейках геометрической сетки или эквиклеточных ОТЕ (от латинского «aequus» – «равный»), так как такие ячейки оптимальны и при автоматизации вычислительных работ, и при учёте точности и достоверности разрабатываемых на их основе ГИС-моделей [31].

Размер ячейки гексагональной сети в настоящем исследовании, как и в случае с анализом ландшафтного разнообразия в центральном подрайоне ландшафта дельты реки Волга [32], подбирался экспериментальным путём. Необходимо было не допустить, во-первых, сопоставления наименьшего по размеру урочища с размером гексагональной ячейки, и, во-вторых, не использовать слишком большие размеры ячеек, так как в них может войти множество урочищ. Исходя из этого, площадь целой ячейки гексагональной сети составила 21,65 км² (рисунок 1с). При анализе были исключены лишние ячейки, которые не легли на границы северного подрайона дельты Волги. Также были созданы дробные части ячеек гексагональной сети для последующего геопространственного анализа (рисунок 1б). В работе использовались как операционная территориальная единица в виде дробного гексагона, так и в виде целого гексагона.

Для того, чтобы можно было приступить к расчетам ландшафтного разнообразия, в среде ГИС были совершены операции оверлея, по итогам которых данные по пространственному положению урочищ вошли в слой операционных территориальных единиц в виде гексагона. Далее были произведены сами расчеты по ландшафтному разнообразию и визуализации полученных данных. Для удобства восприятия была применена классификация естественных границ (оптимизация по Дженксу). Разрывы в полученных данных определялись через выбор границ классов, которые наилучшим образом создали группы схожих показателей и максимизировали разницу между значениями расчётов ЛР. Результаты были поделены на классы, границы которых устанавливались там, где встречались относительно большие различия между значениями данных в расчётах ЛР.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сам расчёт ЛР был произведён на основе простых ландшафтных показателей исследуемой территории. Показатели (индексы) ЛР можно разбить на несколько групп. В первую группу включены показатели, которые зависят как от площади, так и от количества (ландшафтных выделов и территории исследования). В такую группу входят индекс ландшафтной дробности, индекс ландшафтной сложности и оценка ЛР по индексу Менхиника. Во вторую группу относятся индексы, зависящие только от площадных показателей. К таким индексам можно отнести, например, коэффициент ландшафтной раздробленности. В третью группу относятся индексы, которые опираются только на показатели количества ландшафтных выделов. К такой группе можно отнести, например, индекс относительного богатства.

Индекс ландшафтной дробности (или индекс дробности ландшафтных контуров) показывает число ландшафтных контуров (выделов) на определённую площадь, в случае настоящего исследования – на одну операционную территориальную единицу в виде гексагона. Опираясь на ранее выполненные работы

[33; 34], формула, применяемая для расчётов, имела вид:

$$L_{dr} = \frac{n}{S}, \quad (1)$$

где n – количество ландшафтных контуров (выделов) внутри одной ячейки гексагональной сети, S – площадь одной ячейки гексагональной сети. Результаты анализа ландшафтной дробности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 2.

Индекс ландшафтной сложности означает отношение количества ландшафтных выделов (контуров) на среднюю площадь ландшафтных выделов внутри гексагона. С учётом ранее выполненных исследований [33; 35], математическая интерпретация индекса, применяемая в настоящей работе, может быть представлена следующей формулой:

$$L_{sl} = \frac{n}{S_{ncp}}, \quad (2)$$

где n – количество ландшафтных контуров (выделов) внутри одной ячейки гексагональной сети, S_{ncp} – средняя площадь ландшафтных выделов.

Средняя площадь ландшафтных выделов представляет собой отношение общей площади исследуемой территории к количеству ландшафтных выделов в ней и, на основе работы [35], может быть представлена формулой:

$$L_{ncp} = \frac{S}{n}. \quad (3)$$

Результаты анализа ландшафтной сложности северного района ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 3.

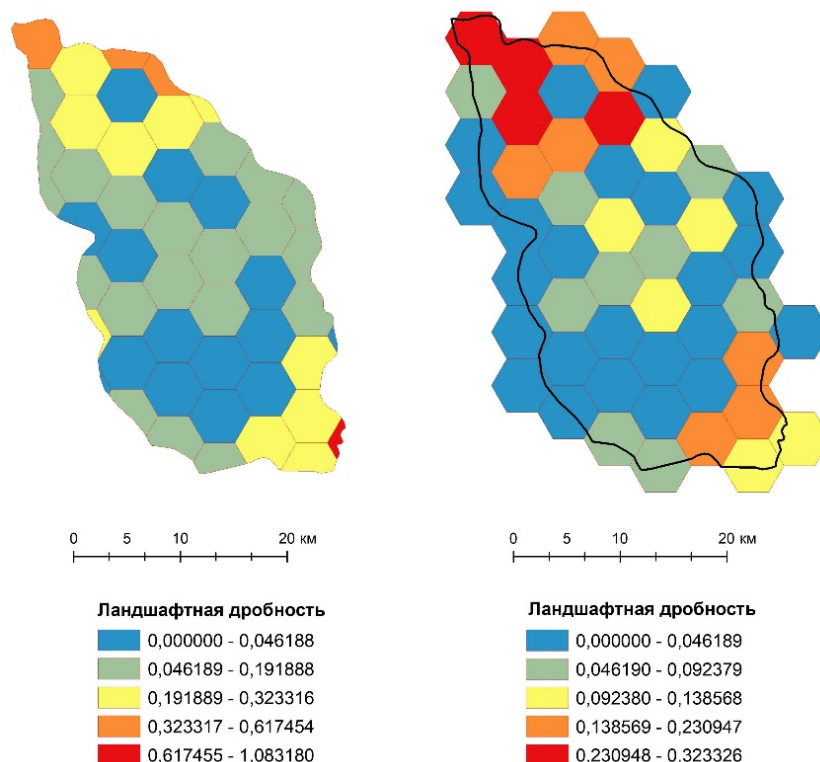


Рисунок 2. Схема показателей ландшафтной дробности северного района ландшафта дельты реки Волга
 Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона
 (чёрной линией указана граница северного района)

Figure 2. Scheme of landscape fractional indicators for the northern sub-area of the Volga River Delta landscape.
 On the left – application of the operational territorial unit (OTU) in the form of a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU in the form of a whole hexagon (the black line indicates the border of the northern region)

Индекс ландшафтной раздробленности позволяет оценить средний размер площади конкретного природного территориального комплекса к площади исследуемой территории (гексагональной ячейки). Опираясь на исследования [35; 36], математическая интерпретация индекса, применяемая в настоящей работе, может быть представлена следующей формулой:

$$L_{rd} = \frac{S_{ncp}}{S}. \quad (4)$$

Этот индекс хоть и рассчитывается на основе площадных показателей, но мера дифферен-

цированности все же главным образом зависит от количества ландшафтов, или, как в случае настоящего исследования, количества ландшафтных выделов. Если допустить, что в ячейке гексагональной сети всего один ландшафтный выдел, средняя площадь которого близка к площади территории исследования, то коэффициент превращается в единицу, и ландшафтная раздробленность отсутствует. Когда же количество выделов в исследуемом районе возрастает, то средняя площадь ландшафтных выделов становится все более и более малой величиной, и, следовательно, исходя из формулы, коэффициент раздробленности идёт по индексу к минимуму, но, в целом, – в пространстве –

идёт к своему максимуму. Чтобы увеличение ЛР по данному индексу сопровождалось увеличением значения показателя, начальную формулу (4) можно преобразовать в вид:

$$L_{rd} = 1 - \frac{S_{ncp}}{S} \quad (5)$$

Результаты анализа ландшафтной раздробленности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга по математической интерпретации (5) показаны на рисунке 4.

Индекс ландшафтной мозаичности отражает отношение количества видов природно-территориальных комплексов выделов на количество ландшафтных контуров внутри исследуемой территории. Математическая интерпретация данного индекса, на основе работ [37; 38], имеет вид:

$$L_m = \frac{m}{n} \quad (6)$$

где m – количество видов природно-территориальных комплексов внутри гексагональной ячейки, n – количество ландшафтных контуров (выделов) внутри гексагональной ячейки.

По аналогии с преобразованием формулы ландшафтной раздробленности, исходную математическую запись ландшафтной мозаичности можно преобразовать в следующем виде:

$$L_m = 1 - \frac{m}{n} \quad (7)$$

Значение показателя внутри ячейки гексагональной сети, таким образом, увеличивается, так как при использовании данной формулы результат отнимается от единицы. Вероятность появления большого количества ландшафтных контуров при высоком уровне их видового состава возрастает в том случае, если фиксируется повышение значения показателей в ячейке гексагональной сети, а при снижении значения – видовой состав и плотность контуров в ячейке ниже. Результаты анализа ландшафтной мозаичности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 5.

Индекс относительного богатства в данном исследовании показывает долю числа видов ПТК в пределах ячейки-гексагона от числа видов ПТК на территории северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. На основе работ [37; 38], математическая интерпретация индекса в данной работе имеет вид:

$$L_b = \frac{m}{M} \quad (8)$$

где m – количество видов природно-территориальных комплексов внутри гексагональной ячейки, M – общее количество видов природно-территориальных комплексов внутри северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. Визуализацию результатов анализа по расчетам относительного богатства можно наблюдать на рисунке 6.

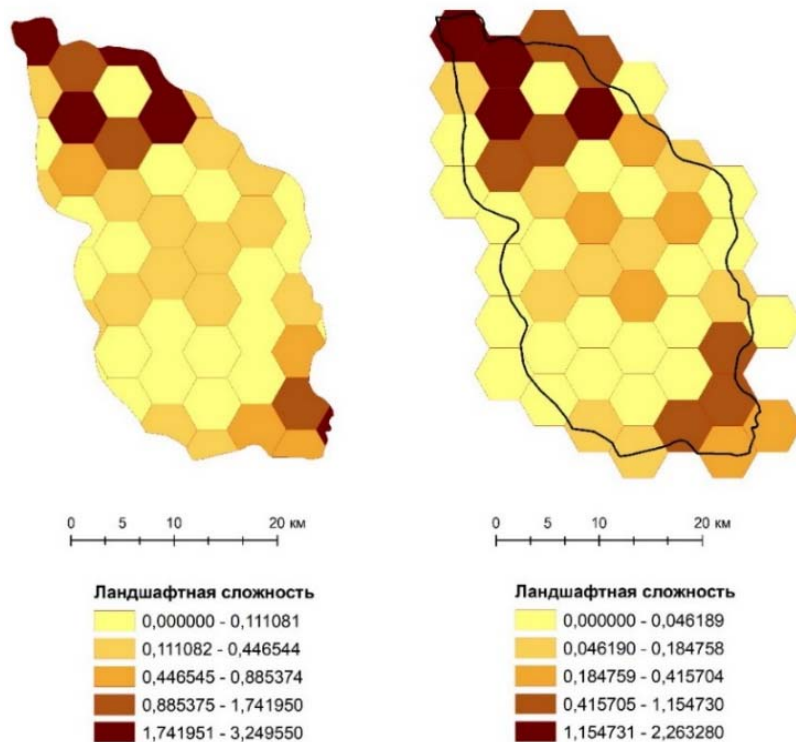


Рисунок 3. Схема показателей ландшафтной сложности северного района ландшафта дельты реки Волга Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 3. Scheme of landscape complexity indicators for the northern sub-area of the Volga River Delta landscape On the left – application of the OTU as a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU as a whole hexagon (the black line indicates the border of the northern region)

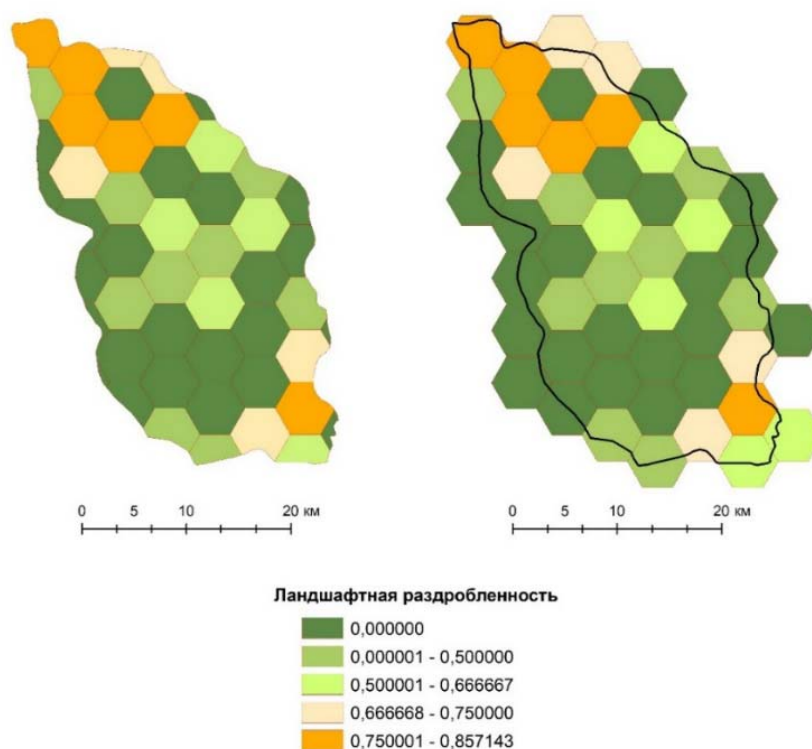


Рисунок 4. Схема показателей ландшафтной раздробленности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга
 Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона
 (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 4. Scheme of landscape fragmentation indicators for the northern area of the Volga River Delta landscape
 On the left – application of the OTU as a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU as a whole hexagon
 (the black line indicates the border of the northern region)

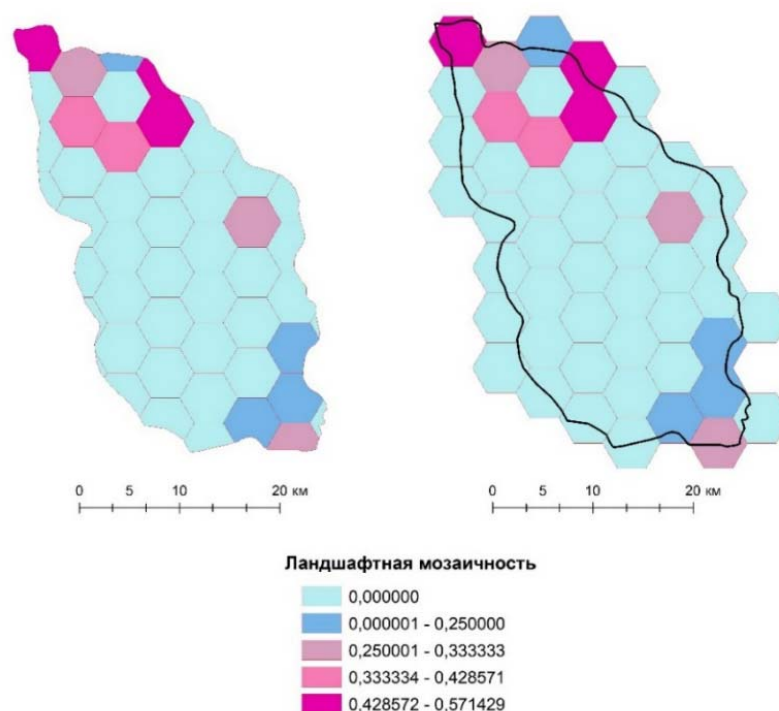


Рисунок 5. Схема показателей ландшафтной мозаичности северного подрайона ландшафта дельты реки Волга
 Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона
 (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 5. Scheme of landscape mosaic indicators for the northern sub-area of the Volga River Delta landscape
 On the left – application of the OTU as a fractional hexagon, on the right – full-size application of the OTU as a whole hexagon
 (the black line indicates the border of the northern region)

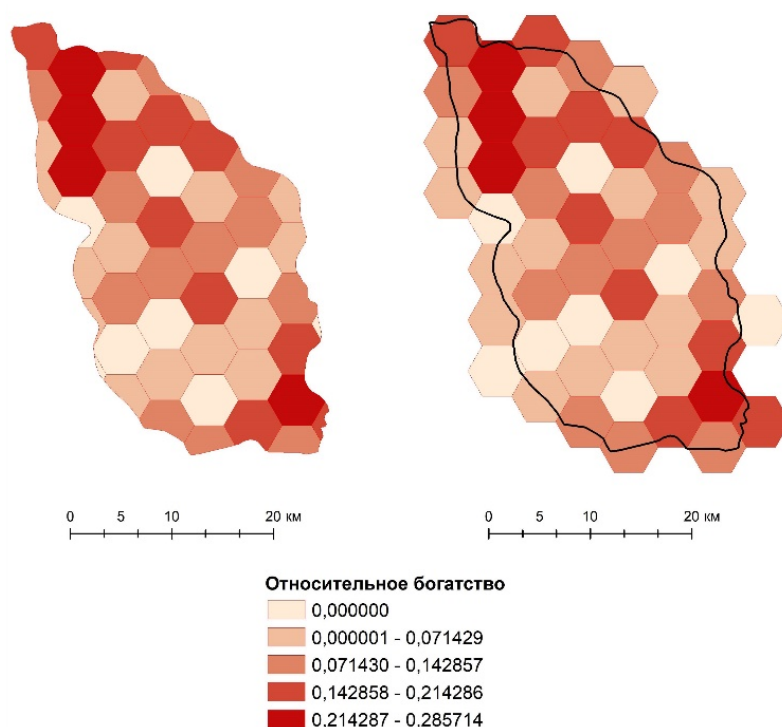


Рисунок 6. Схема показателей ЛР по индексу относительного богатства северного подрайона ландшафта дельты реки Волга

Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 6. Scheme of indicators according to the relative landscape richness index of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape

On the left – application of OTU in the form of fractional hexagon, on the right – full-size application of OTU in the form of whole hexagon (black line indicates the border of the northern area)

В экологии при оценке биоразнообразия определённое место отведено видовому богатству. Считается, что, если изучаемое сообщество нетрудно ограничить в пространстве и времени, а составляющие его виды определены и подсчитаны, то видовое богатство может стать чрезвычайно важной мерой разнообразия. При анализе числа выявленных видов и общим числом особей всех видов в анализе численности видов применяют достаточно простые индексы оценки видового богатства, например Индекс Менхиника [39]. Из экологии применение данного индекса плавно перешло и в ландшафтоведение. В призме оценки ЛР северного района ландшафта дельты реки Волга, индекс Менхиника показывает взаимосвязь количества видового разнообразия урочищ на заданной территории исследования (на одну операционную территориальную единицу в виде гексагона).

Опираясь на работы [21; 40; 41; 42], формула оценки ЛР по индексу Менхиника имеет вид:

$$L_{mh} = \frac{m}{\sqrt{S}}, \quad (9)$$

где m – количество видов природно-территориальных комплексов внутри ячейки гексагональной ячейки, S – площадь одной ОТЕ используемой при расчётах.

Результаты анализа ЛР северного подрайона ландшафта дельты реки Волга по индексу Менхиника показаны на рисунке 7. Отдельно стоит подчеркнуть, что количество видов ландшафтных контуров учитывалось в группе русловых урочищ.

Возникнув в недрах термодинамики и став базисным понятием теории информации, энтропия также вошла и в физическую географию [43; 44]. В оценке ЛР также есть математический аппарат для анализа энтропийной сложности ландшафтного рисунка. Такой термин в основном встречается в отечественной литературе [19], а в зарубежных научных исследованиях обычно используют трактовку “Индекс разнообразия Шеннона” [45; 46].

Измеряя ландшафтное разнообразие, индекс разнообразия Шеннона зависит как и от числа ландшафтных выделов, так и, в значительной степени, от равномерности их распределения в пространстве. Если индекс равняется нулю, то в таком случае идёт увеличение доминирования отдельных геосистем, индекс Шеннона (энтропийная сложность) уменьшается – уменьшается и ЛР в целом. Возрастание значения индекса связано с пропорциональным увеличением числа контуров или их распределения.

Основываясь на работы [7; 38; 47], в настоящем исследовании формула оценки энтропийной сложности ландшафтного рисунка северного района ландшафта дельты реки Волга имеет следующую интерпретацию:

$$L_{entropy} = - \sum \frac{m_i}{n} \ln \frac{m_i}{n}, \quad (10)$$

где m_i – доля количества ландшафтных контуров (выделов) i -го вида внутри гексагональной ячейки, n – количество зафиксированных ландшафтных контуров (выделов) внутри гексагональной ячейки, $\ln$ – натуральный логарифм.

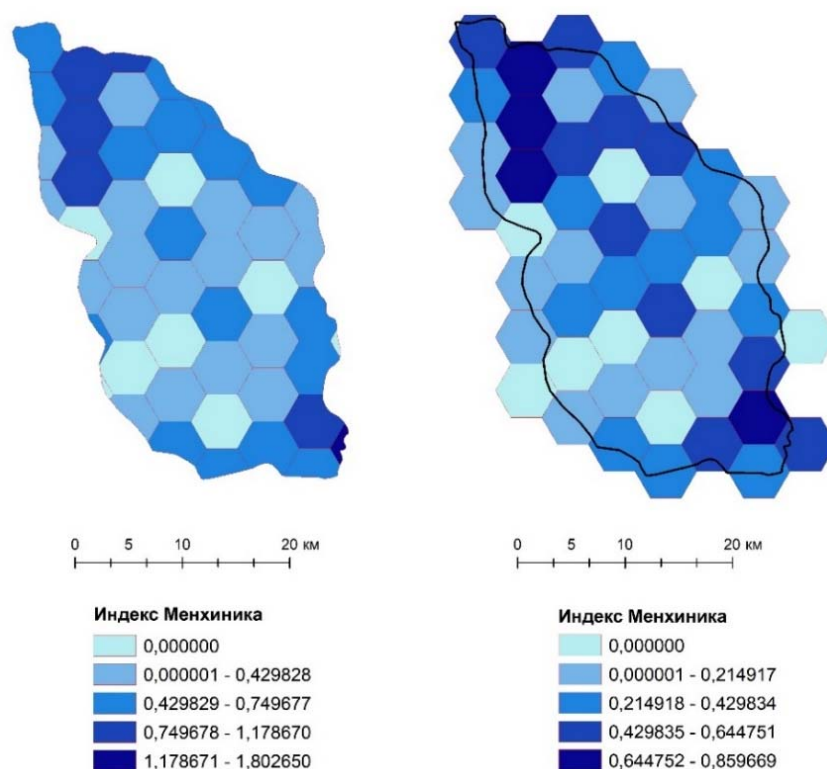


Рисунок 7. Схема показателей ландшафтного разнообразия северного подрайона ландшафта дельты реки Волга по индексу Менчиника

Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (чёрной линией указана граница северного подрайона)

Figure 7. Scheme of landscape diversity indicators of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape according to the Menchinik index

On the left – application of OTU in the form of a fractional hexagon, on the right – full-size application of OTU in the form of a whole hexagon (the black line indicates the border of the northern region)

Результаты анализа энтропийной сложности ландшафтного рисунка северного района ландшафта дельты реки Волга показаны на рисунке 8.

По сравнению с ландшафтными показателями центрального подрайона ландшафта дельты Волги [32], где было выделено более двух с половиной тысяч ландшафтных выделов при их 31 виде, северный подрайон достаточно скуден. В северном подрайоне ландшафта дельты Волги широкое распространение получила только лишь группа русловых урочищ, чей генезис тесно связан с действием многочисленных дельтовых водотоков. Относительно меженного уровня воды в водотоках рассматриваемые русловые урочища можно разделить на три высотных уровня: низкий, средний и высокий, что откладывает большой отпечаток на внешнем облике формирующихся ПТК. Разница относительных высот колеблется от 1–1,5 метров у урочищ низкого уровня до 2,5–3 метров у высокого уровня.

Пространственно-статистический анализ ЛР показал, что в северном подрайоне ландшафта дельты реки Волга можно выделить только две характерные зоны с высокими показателями ЛР. Физическая интерпретация этого вполне объяснима.

На самом севере подрайона – приверха речного острова к юго-востоку от н.п. Верхнелебяжье, – в ячейке гексагональной сети, содержащей о. Большой Осередок и о. Малый Осередок (рисунок 9, ячейка 1), начинается территория с высокими показателями ЛР, которая спускается южнее на две ячейки гексагональной сети. Высокие показатели ЛР здесь связаны с концентрацией

здесь мелкогивистых и гивистых урочищ высокого и среднего уровня, а также пологоволнистых русловых урочищ высокого уровня. Учитывая, что генезис русловых урочищ связан с рельефообразующей деятельностью водотоков, здесь ландшафтные выделы минимальны по размеру, часто сменяются по уровенной иерархии. Они могут располагаться параллельно друг другу или хаотично, что отражает динамичный характер мелких и средних водотоков, их формирующих. Здесь фиксируется высокие показатели ландшафтной дробности и ландшафтной сложности (рисунок 2 и 3). При высоких показателях ЛР здесь зависит от частоты смены ландшафтных выделов.

Так продолжается южнее (рисунок 9, ячейка 3), и такая тенденция переходит на восток, формируя своего рода один обособленный участок внутри выделенных ячеек с высоким показателем ЛР. На этом участке господство делают два больших ландшафтных выдела – русловое урочище низкого уровня, пологоволнистое и мелкогивистое русловое урочище низкого уровня. Аналогичная картина и в других гексагональных ОТЕ с относительно высокими показателями ЛР, особенно в юго-восточной части северного подрайона ландшафта дельты Волги (рисунок 2–8).

Фактически на всей территории с низкими показателями ЛР преобладают пологоволнистые и плоские русловые урочища среднего и низкого уровней. Такие урочища представлены крупными, вытянутыми вдоль водотоков массивами с достаточно плавными очертаниями. Такие ПТК являются

результатом деятельности как современных, так и древних крупных водотоков, что и нашло отражение в их морфологических особенностях. Также здесь

встречаются большие по размеру плоские русловые урочища низкого уровня.

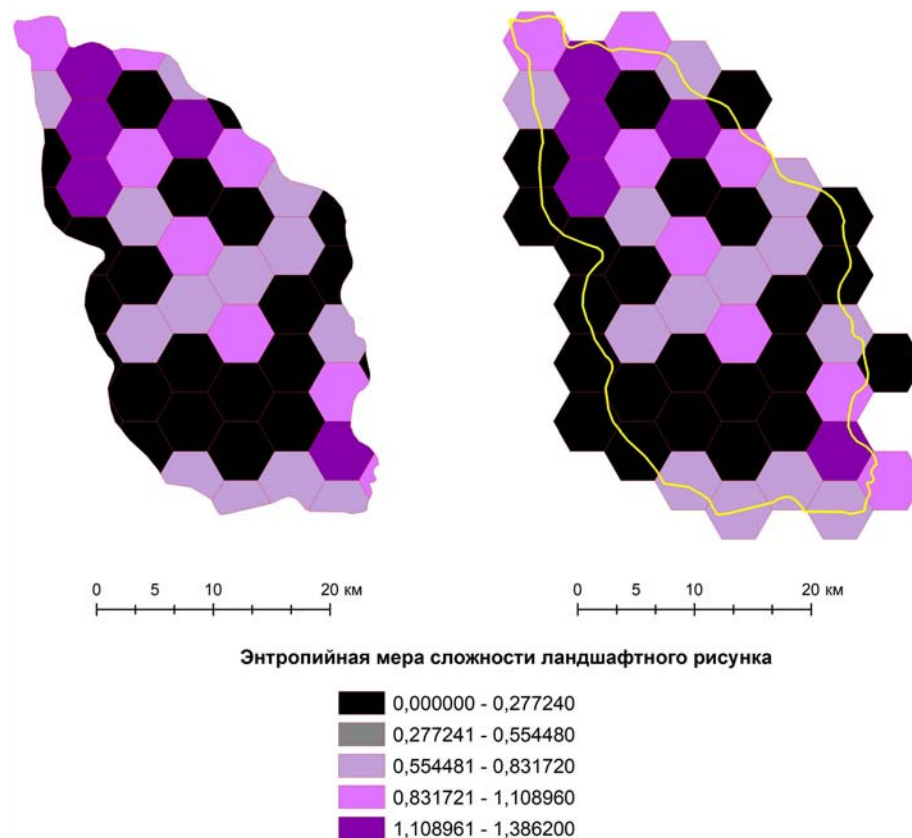


Рисунок 8. Схема показателей энтропийной сложности ландшафтного рисунка (индекса разнообразия Шеннона) северного подрайона ландшафта дельты реки Волга

Слева – применение ОТЕ в виде дробного гексагона, справа – полноразмерное применение ОТЕ в виде целого гексагона (жёлтой линией указана граница северного подрайона)

Figure 8. Scheme of entropic complexity indicators of landscape pattern (Shannon diversity index) of the northern sub-region of the Volga River Delta landscape

On the left – application of OTU in the form of fractional hexagon, on the right – full-size application of OTU in the form of whole hexagon (the yellow line indicates the border of the northern region)

Коэффициенты ландшафтной раздробленности также коррелируются с показателями индексов ландшафтной дробности и ландшафтной сложности. Ландшафтная раздробленность напрямую зависит от отношения средней площади выдела к площади исследуемой ячейки ОТЕ: показатель коэффициента тем больше, чем больше и средняя площадь ландшафтных выделов. Иными словами, если средняя площадь ландшафтных выделов стремится занять всю площадь ячейки, то значение коэффициента растёт, и наоборот.

Корреляция показателей ландшафтной дробности, ландшафтной сложности и ландшафтной раздробленности достигается тем, что в данных индексах используются почти одинаковый набор переменных. Иное же представление о пространственном расположении ландшафтных выделов в северном подрайоне ландшафта дельты реки Волга и, следовательно, о ЛР, дают индекс относительного богатства и индекс Менхеника. Это связано с тем, что при расчёте индекса относительного богатства основным фактором является именно количество видов ландшафтных выделов. Показатели индекса по Менхенику зависят от количества видового

разнообразия урочищ на территории ячейки гексагональной сети.

Совершенно иная картина ЛР, представляется по индексу ландшафтной мозаичности (рисунок 5). Здесь фиксируются только два ареала, описанных ранее (рисунок 9), с высокими показателями ЛР. Низкие показатели фактически по всей площади напрямую связаны с “бедностью” видов природно-территориальных комплексов в северном подрайоне ландшафта дельты Волги и их зафиксированном количестве в гексагональной ОТЕ.

Оценка показателей энтропийной сложности ландшафтного рисунка является своего рода финальным штрихом в оценке ЛР северного подрайона ландшафта дельты Волги. Энтропийная сложность, в целом, схожа по результатам оценки ландшафтной дробности, ландшафтной сложности и ландшафтной раздробленности, также можно проследить схожие результаты по итогам визуализации данных индекса Менхеника, особенно при использовании дробной ОТЕ.

Дополнительно для сопоставления результатов расчётов ЛР была составлена корреляционная матрица показателей ландшафтного разнообразия (рисунок 10). Необходимо отметить, что в работе использовались

индексы, в расчёт которых входили показатели площади одной используемой гексагональной ОТЕ,

поэтому необходимо было сопоставить результаты целой и дробной ячеек ОТЕ.



Рисунок 9. Ячейки гексагональной сети с высокими показателями ЛР (выделены голубой заливкой) В ячейке 1 расположены о. Большой Осередок и о. Малый Осередок. Снимок аппарата Sentinel 2A от 15.07.2022 г.
Figure 9. Cells of the hexagonal grid with high landscape diversity indices (highlighted in blue fill) Cell 1 contains the islands of Bolshoy Oseredok and Maly Oseredok. Sentinel 2A image from 15.07.2022

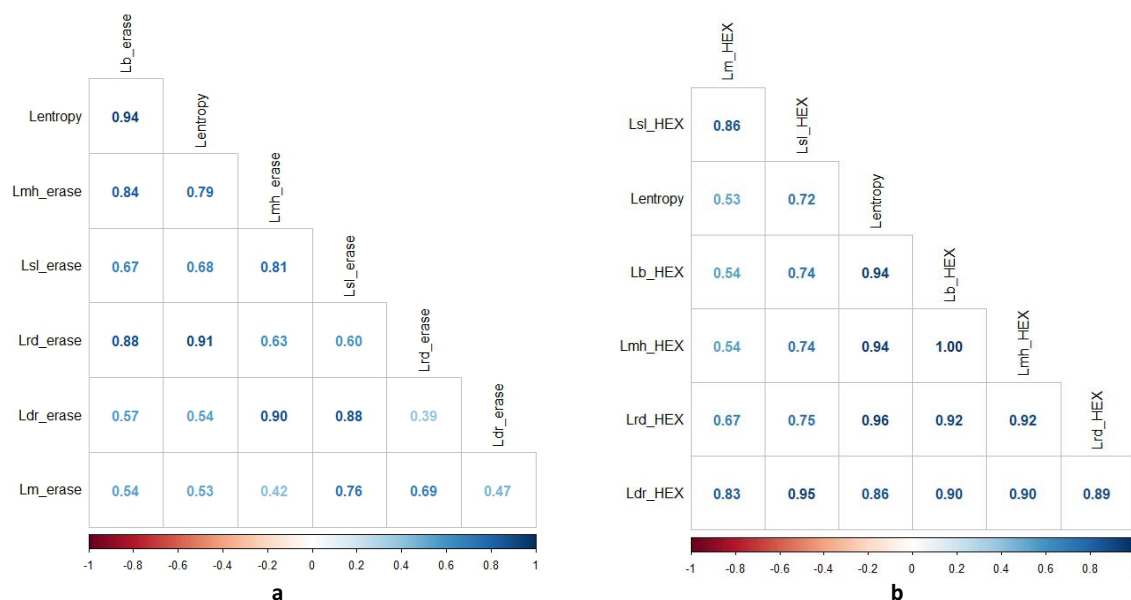


Рисунок 10. Корреляционная матрица показателей ландшафтного разнообразия северного подрайона ландшафта дельты реки Волга

a – матрица при применении операционной территориальной единицы в виде дробного гексагона, *b* – при полноразмерном применении операционной территориальной единицы в виде целого гексагона, где Lentropy – энтропийная сложность ландшафтного рисунка, Lmh – индекс Менхиника, Lsl – индекс ландшафтной сложности, Lrd – индекс ландшафтной раздробленности, Ldr – индекс ландшафтной дробности, Lm – индекс ландшафтной мозаичности

Figure 10. Correlation matrix of landscape diversity indicators of the northern sub-area of the Volga River Delta landscape
a – matrix when the operational territorial unit is applied as a fractional hexagon, *b* – when the full-size operational territorial unit is applied as a whole hexagon, where Lentropy – entropic complexity of landscape pattern, Lmh – Menkhinik index, Lsl – landscape complexity index, Lrd – landscape fragmentation index, Ldr – landscape fragmentation index, Lm – landscape mosaic index

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показала проведённая работа, лучшим способом анализа и визуализации ЛР достигается путём применения гексагональной сетки. Анализ схем ЛР и сопоставление полученных данных с тематическими материалами о природе и хозяйственном освоении исследуемого региона позволяет дать характеристику пространственной изменчивости ландшафтной дифференциации территории и факторах, её обуславливающих.

Так, например, территории с низким разнообразием при прочих равных условиях благоприятны для эффективного монофункционального хозяйства. В данном случае, сопоставляя ОТЕ с низкими показатели ЛР и ретроспективный анализ хозяйственного освоения дельты, видно, что такие территории чаще использовались в сельском хозяйстве, так как одно большое урочище легче адаптировать под хозяйственные нужды. Участки со сложной морфологической структурой ПТК, и, соответственно, высоким уровнем ландшафтного разнообразия, практически не подвергаются большинству видов хозяйственного воздействия.

Отдельно стоит подчеркнуть, что проведённая работа есть результат анализа показателей исключительно для и внутри территории северного подрайона ландшафта дельты реки Волга. С учетом сложности морфологической структуры всего ландшафта дельты Волги, масштабируя анализ ЛР до двух и более подрайонов дельты, необходимо будет учитывать ПТК всех этих территорий, что приведёт, соответственно, к изменению показателей. Такое исследование планируется провести после детального исследования морфологической структуры данного ландшафта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чибилев А.А. Ландшафтно-экологический каркас как территориальная основа устойчивого развития сельскохозяйственных регионов России // Юг России: экология, развитие. 2022. Т.17. N 2. С. 115–121. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-2-115-121>
2. Turner M. Landscape ecology: The Effect of Pattern on process // Annual Review of Ecology and Systematic. 1989. V. 20. P. 171–197.
3. Wu J. Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes // Princeton Guide to Ecology. 2009. P. 438–444.
4. Хорошев А.В., Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н., Иванов А.Н., Калуцков В.Н., Матасов В.М., Низовцев В.А., Сысуев В.В., Харитонов Т.И., Чинова В.П., Эрман Н.М., Лощинская Е.С. Теория и методология ландшафтного планирования. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2019. 444 с.
5. Витченко А.Н., Власов Б.П., Марцинкевич Г.И. Ландшафтно-экологические исследования как реализация стратегии устойчивого развития Беларуси // Вестник БГУ. 2009. N 1. Сер. 2. С. 81–88.
6. Осипов А.Г., Дмитриев В.В., Ковязин В.Ф. Методика анализа экосистемного разнообразия ландшафтов региона по материалам дистанционного зондирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. N 10. С. 49–57.
7. Соколов А.С. Количественная оценка ландшафтной репрезентативности охраняемых природных территорий регионов // Псковский регионологический журнал. 2021. Т. 17. N 4. С. 123–137. <https://doi.org/10.37490/S221979310017159-7>
8. Озгелдинова Ж., Бектемирова А., Мукаев Ж., Берденов Ж., Асылбеков К., Оспан Г. Ландшафтное разнообразие территории бассейна реки Тобол в пределах Костанайской области // Вестник КазНУ. Серия географическая. 2022. Т. 67. N 4. С. 20–27. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v67.i4.02>
9. Ганзей К.С., Иванов А.Н. Ландшафтное разнообразие Курильских островов // География и природные ресурсы. 2012. N 2. С. 87–94.
10. Соколов А.С. Ландшафтное разнообразие: теоретические основы, подходы и методы изучения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 208–213.
11. Leser H., Nagel P. Landscape Diversity – A Holistic Approach // Biodiversity: A Challenge for Development Research and Policy. Germany: Springer, 2001, pp. 129–143.
12. Dias M., Domingos J., dos Santos Costa S.S., Nascimento M., Silva M., Granjeiro L., Miranda R. Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil // Cartography and Quantitative Assessment. Geoheritage. 2021. V. 13. <https://doi.org/doi:10.1007/s12371-021-00532-4>
13. Zwoliński Z., Najwer A., Giardino M. Methods for Assessing Geodiversity // Geoheritage. 2018. P. 27–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>
14. Pellitero R., Manosso F.C., Serrano E. Mid- and large-scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Parana, Brazil): methodology and application for land management // Geografiska Annaler: Series A, Phys. Geogr. 2014. V. 97. P. 219–235.
15. Forman R.T.T., Godron M. Landscape ecology. New York: John Wiley&Sons, 1986. 619 p.
16. Leitro A.B., Miller J., Ahern J., McGarigal K. Measuring Landscape. Washington. Covelo. London: Island Press, 2009. 247 p.
17. Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. Разнообразие ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. С. 76–178.
18. Беручашвили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
19. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
20. Гафина Л.М. Правовая охрана ландшафтного разнообразия в Российской Федерации // Проблемы экономики и юридической практики. 2007. N 4. С. 279–282.
21. Марцинкевич Г.И., Счастлиная И.И. Оценка ландшафтного разнообразия природных и природно-антропогенных комплексов Беларуси // Природопользование. 2005. Вып. 11. С. 98–105.
22. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение Беларуси: основные достижения и направления дальнейшего развития // Фокус. 2007. N 2. С. 12–19.
23. Мирзеханова З.Г., Климина Е.М. Оценка ландшафтного разнообразия для разработки программ устойчивого развития Хабаровского края // Известия РАН. Серия географическая. 2017. N 4. С. 88–96. <https://doi.org/10.7868/S0373244417040089>
24. Марцинкевич Г.И. Ландшафтоведение. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 2007. 206 с.
25. Занозин В.В., Бармин А.Н. Особенности районирования дельтовых ландшафтов // Геология,

- география и глобальная энергия. 2018. Т. 70. N 3. С. 134–142.
26. Занозин В.В., Бармин А.Н., Занозин В.В. Особенности морфологической структуры северного подрайона ландшафта дельты Волги // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: материалы XIV Международной ландшафтной конференции, Воронеж, 2023. С. 105–107.
27. Матушкин А.С., Чепурнов Р.Р., Прокашев А.М. Структура древнеэоловых долинно-зандровых ландшафтов нижней Вятки // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2018. N 2. С. 172–181.
28. Борисов Р.В. Оценка сложности ландшафтной организации охранных зон острова Русский // Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке. 2019. Т. 1. С. 23–31. <https://doi.org/10.35735/tig.2019.93.88.002>
29. Михайлов В.А. Оценка антропогенной преобразованности ландшафтов с помощью ГИС (на примере Крымского Присивашья) // Современные научные исследования и инновации. 2012. N 10. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17103/> (дата обращения: 09.01.2024)
30. Бодрова В.Н. Картографирование лесистости острова Сарпинский Волгоградской области // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. N 3. С. 47–54.
31. Крупочкин Е.П., Дирин Д.А., Дунец А.Н., Рыгалов Е.В. Количественное обоснование параметров регулярно-ячеистых моделей как метода численной оценки и ГИС-картографирования территорий // Ползуновский вестник. 2016. N 4. С. 70–79.
32. Занозин В.В., Бармин А.Н., Ямашкин С.А., Ямашкин А.А. Методы и алгоритмы оценки ландшафтного разнообразия в морфологическом аспекте на примере центральной части дельты реки Волги // Материалы Междунар. конф. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий, М: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 4. С. 114–130. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-114-130>.
33. Ганзей К.С. Оценка ландшафтного разнообразия вулканически активных островов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. N 2. С. 61–70. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-61-70>
34. Борисов Р.В. Оценка сложности ландшафтной организации и устойчивости ландшафтов охранных зон островов архипелага Императрицы Евгении (залив Петра Великого, Японское море) // Региональные геосистемы. 2021. N 2. С. 144–154.
35. Позаченюк Е.А., Агиенко А.А. Оценка ландшафтного разнообразия Алуштинского амфитеатра // Учёные записки Крымского федерального университета имени Вернадского В.И. География. Геология. 2017. Т. 3. N 2. С. 102–116.
36. Юдина Ю.В. Морфологический и морфометрический анализ ландшафтной структуры Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43. N 3. С. 307–318. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-3-307-318>
37. Усова И.П., Токарчук С.М. Ландшафтное разнообразие природных комплексов Брестской и Могилевской областей // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навуки аб Зямлі. 2010. N 2. С. 120–127.
38. Соколов А.С. Картографический анализ региональных особенностей ландшафтного разнообразия Белоруссии // Псковский регионологический журнал. 2016. Т. 28. N 4. С. 59–70.
39. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 184 с.
40. Menhinick E.F. Estimations of insect populations density in herbaceous vegetation with emphasis on removal sweeping // Ecology. 1963. N 44. P. 617–622.
41. Whittaker R.H. Evolution of species diversity in land communities // Evol. Biol. 1977. N 10. P. 1–67.
42. Черных Д.В. Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2011. N 3–2. С. 60–65.
43. Рулев А.С., Рулева О.В., Юферев В.Г., Рулев Г.А. Термодинамика экотонных ландшафтов // Вестник Воронежского государственного университета. Научный журнал. Серия: География. Геоэкология. 2017. N 4. С. 5–14.
44. Пузаченко Ю.Г. Термостатические основания географии // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. N 5. С. 21–37. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-21-37>
45. Harini N. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity // Applied Geography. 2002. V. 22. Iss. 2. P. 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00002-4)
46. Dušek R., Popelková R. Theoretical view of the Shannon index in the evaluation of landscape diversity // AUC Geographica. 2017. N 47. P. 5–13. <https://doi.org/10.14712/23361980.2015.12>
47. Wolff S., Hüttel S., Nendel C., et al. Agricultural Landscapes in Brandenburg, Germany: An Analysis of Characteristics and Spatial Patterns // Int. J. Environ. Res. 2021. V. 15. P. 487–507. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00328-y>

REFERENCES

- Chibilev A.A. The landscape and ecological framework as a territorial basis for stable development in Russia's agricultural regions. *South of Russia: ecology, development*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 115–121. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-2-115-121>
- Turner M. Landscape ecology: The Effect of Pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematic*. 1989, vol. 20, pp. 171–197.
- Wu J. *Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes*. Princeton Guide to Ecology. 2009, pp. 438–444.
- Khoroshev A.V., Avessalomova I.A., D'yakonov K.N., Ivanov A.N., Kalutskov V.N., Matasov V.M., Nizovtsev V.A., Sysuev V.V., Kharitonova T.I., Chizhova V.P., Erman N.M., Loshchinskaya E.S. *Teoriya i metodologiya landshaftnogo planirovaniya* [Theory and methodology of landscape planning]. Moscow, KMK Scientific Press Publ., 2019, 444 p. (In Russian)
- Vitchenko A.N., Vlasov B.P., Martsinkevich G.I. Landscape-ecological research as the implementation of the strategy of sustainable development of Belarus. *Vestnik BGU [Bulletin of BSU]*. 2009, no. 1, ser. 2, pp. 81–88. (In Russian)
- Osipov A.G., Dmitriev V.V., Kovyzin V.F. Methods of analyzing landscape ecosystem diversity of a region based on remote sensing. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2020, vol. 331, no. 10, pp. 49–57. (In Russian)

7. Sokolov A. Quantitative assessment of landscape representativity of regional protected natural areas. *Pskov Journal of Regional Studies*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 123–137. (In Russian) <https://doi.org/10.37490/S221979310017159-7>
8. Ozgeldinova Zh., Bektemirova A., Mukayev Zh., Yerkanova N.N., Berdenov Zh., Assylbekov Q., Ospan G.T. Landscape diversity of the territory of the Tobol river basin within the Kostanay region. *Bulletin of KazNU. Geographical Series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 20–27. (In Russian) <https://doi.org/10.26577/JGEM.2022.v67.i4.02>
9. Ganzei K.S., Ivanov A.N. Landscape diversity of the Kuril Islands. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources]. 2012, no. 2, pp. 87–94. (In Russian)
10. Sokolov A.S. Landscape diversity: theoretical foundations, approaches and methods of study. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2014, vol. 10, iss. 1, pp. 208–213. (In Russian)
11. Leser H., Nagel P. Landscape Diversity – A Holistic Approach. *Biodiversity: A Challenge for Development Research and Policy*. Germany, Springer Publ., 2001, pp. 129–143.
12. Dias M., Domingos J., dos Santos Costa S.S., Nascimento M., Silva M., Granjeiro L., Miranda R. Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. *Cartography and Quantitative Assessment. Geoheritage*, 2021, vol. 13. <https://doi.org/doi:10.1007/s12371-021-00532-4>
13. Zwoliński Z., Najwer A., Giardino M. Methods for Assessing Geodiversity. *Geoheritage*, 2018, pp. 27–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>
14. Pellitero R., Manosso F.C., Serrano E. Mid- and large-scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Parana, Brazil): methodology and application for land management. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2014, vol. 97, pp. 219–235.
15. Forman R.T.T., Godron M. *Landscape ecology*. New York, John Wiley&Sons Publ., 1986, 619 p.
16. Leitro A.B., Miller J., Ahern J., McGarigal K. *Measuring Landscape*. Washington. Covelo. London. Island Press Publ., 2009, 247 p.
17. Puzachenko Yu.G., D'yakonov K.N., Aleshchenko G.M. Landscape diversity and methods of its measurement. *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* [Geography and biodiversity monitoring]. Moscow, NUMC Publishing House, 2002, pp. 76–178. (In Russian)
18. Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of physiographic studies]. Moscow, MSU Publ., 1997, 320 p. (In Russian)
19. Viktorov A.S. *Risunok landshafta* [The Picture of Landscape]. Moscow, Mysl' Pybl., 1986, 179 p. (In Russian)
20. Gafina L.M. Legal protection of landscape diversity in the Russian Federation. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoi praktiki* [Problems of economics and legal practice]. 2007, no. 4, pp. 279–282. (In Russian)
21. Martsinkevich G.I., Schastnaya I.I. Assessment of landscape diversity of natural and natural-anthropogenic complexes of Belarus. *Prirodopol'zovanie* [Nature Management]. 2005, vol. 11, pp. 98–105. (In Russian)
22. Martsinkevich G.I. Landscape science of Belarus: main achievements and directions of further development. *Fokus* [Focus]. 2007, no. 2, pp. 12–19. (In Russian)
23. Mirzekhanova Z.G., Klimina E.M. Assessment of landscape diversity to develop programs of sustainable development of Khabarovsk Krai. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2017, no. 4, pp. 88–96. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0373244417040089>
24. Martsinkevich G.I. *Landshaftovedenie* [Landscape science]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2007, 206 p. (In Russian)
25. Zanozin V.V., Barmin A.N. Features of division into districts of deltoid landscapes. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, Geography and Global Energy]. 2018, vol. 70, no. 3, pp. 134–142. (In Russian)
26. Zanozin V.V., Barmin A.N., Zanozin V.V. Osobennosti morfologicheskoi struktury severnogo podraiona landshafta del'ty Volgi [Features of the morphological structure of the northern sub-area of the Volga Delta landscape]. *Teoreticheskie i prikladnye problemy landshaftnoi geografii. VII Mil'kovskie chteniya: materialy XIV Mezhdunarodnoi landshaftnoi konferentsii Voronezh, 2023* [Proceedings of the XIV International Landscape Conference VII Milkovskie readings: Theoretical and applied problems of landscape geography Voronezh, 2023]. Voronezh, 2023, pp. 105–107. (In Russian)
27. Matushkin A.S., Chepurnov R.R., Prokashev A.M. The structure of ancient eolian landscapes of the outwash terrain of the lower Vyatka basin. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Biologiya. Nauki o Zemle»* [Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]. 2018, no. 2, pp. 172–181. (In Russian)
28. Borisov R.V. Estimation of the complexity of the landscape organization of protection areas of the Russky Island. *Geographical and geocological investigations in the Far East*, 2019, vol. 1, pp. 23–31. (In Russian) <https://doi.org/10.35735/tig.2019.93.88.002>
29. Mihailov V.A. Evaluation of anthropogenic transformation of the landscape using GIS (on the example of the Crimean Sivash). *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation]. 2012, no. 10. (In Russian) Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17103/> (accessed 09.01.2024)
30. Bodrova V.N. Mapping of forest coverage of the Sarpinsky island (Volgograd oblast). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Episode 5. Geography]. 2018, no. 3, pp. 47–54. (In Russian)
31. Krupochkin E.P., Dirin D.A., Dunets A.N., Rygalov E.V. Quantitative substantiation of the parameters of regular-cell models as a method of numerical evaluation and GIS-mapping of territories. *Polzunovskii vestnik* [Polzunov Bulletin]. 2016, no. 4, pp. 70–79. (In Russian)
32. Zanozin V.V., Barmin A.N., Yamashkin S.A., Yamashkin A.A. Metody i algoritmy otsenki landshaftnogo raznoobraziya v morfologicheskoy aspekte na primere tsentral'noi chasti del'ty reki Volgi [Methods and algorithms for landscape diversity assessment in morphological aspect on the example of the central part of the Volga River delta]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territorii* [Proceedings of the International conference InterKarto. InterGIS. Geoinformation support of sustainable development of territories]. Moscow, Moscow University Press Publ., 2020, pp. 114–130. (In Russian) <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-114-130>
33. Ganzei K.S. Assessment of Landscape Diversity of Islands with Volcanic Activity. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2014, no. 2, pp. 61–70. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-61-70>

34. Borisov R.V. Estimation of complexity of the landscape organization and the sustainability of landscapes of the protected zones of islands of the Eugenie Archipelago (Peter the Great Gulf, Sea of Japan). *Regional'nye geosistemy [Regional geosystems]*. 2021, no. 2, pp. 144–154. (In Russian)
35. Pozachenyuk E.A., Agienko A.A., Assessment of landscape diversity of Alushta Amphitheater. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni Vernadskogo V.I. Geografiya. Geologiya [Scientific Notes of the Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology]*. 2017, vol. 3, no. 2, pp. 102–116. (In Russian)
36. Yudina Y.V. Morphological and morphometric analysis of landscape structure Belgorod region. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 307–318. (In Russian) <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-3-307-318>
37. Usova I.P., Tokarchuk S.M. Landscape Diversity of Natural Complexes of Brest and Mahilew Regions. *Bulletin of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*. 2010, no. 2, pp. 120–127. (In Russian)
38. Sokolov A.S. Cartographic analysis of regional features of landscape diversity in Belarus. *Pskovskii regionologicheskii zhurnal [Pskov Regional Journal]*. 2016, vol. 28, no. 4, pp. 59–70. (In Russian)
39. Megarran E. *Ekologicheskoe raznoobrazie i ego izmerenie [Ecological diversity and its measurement]*. Moscow, Mir Publ., 1992, 184 p. (In Russian)
40. Menhinick E.F. Estimations of insect populations density in herbaceous vegetation with emphasis on removal sweeping. *Ecology*. 1963, no. 44, pp. 617–622.
41. Whittaker R.H. Evolution of species diversity in land communities. *Evolutionary Biology*. 1977, no. 10, pp. 1–67.
42. Chernykh D.V. Quantitative Assessment of complexity and landscape diversity of the Russian Altai. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta [News of Altai State University]*. 2011, no. 3–2, pp. 60–65. (In Russian)
43. Rulev A.S., Ruleva O.V., Yuferev V.G., Rulev G.A. Thermodynamics of ecotone landscapes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauchnyi zhurnal. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]*. 2017, no. 4, pp. 5–14. (In Russian)
44. Puzachenko I.G. Thermostatical foundations of geography. *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2016, no. 5, pp. 21–37. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-21-37>
45. Harini N. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 2002, vol. 22, iss. 2, pp. 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00002-4)
46. Dušek R., Popelková R. Theoretical view of the Shannon index in the evaluation of landscape diversity. *AUC Geographica*, 2017, no. 47, pp. 5–13. <https://doi.org/10.14712/23361980.2015.12>
47. Wolff S., Hüttel S., Nendel C., et al. Agricultural Landscapes in Brandenburg, Germany: An Analysis of Characteristics and Spatial Patterns. *International Journal of Environmental Research*, 2021, vol. 15, pp. 487–507. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00328-y>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Виктор В. Занозин руководил общим научным исследованием, участвовал в полевых исследованиях, ГИС-анализе и визуализации данных, проведении расчётов ландшафтного разнообразия и написании текста рукописи. Александр Н. Бармин участвовал в статистической обработке данных, написании текста рукописи и редактировании текста рукописи. Валерий В. Занозин участвовал в полевых исследованиях, классификации природно-территориальных комплексов и написании текста рукописи. Станислав А. Ямашкин участвовал в статистической обработке данных, анализе полученных расчётов, написании и редактировании текста рукописи. Виктория А. Корень участвовала в картографировании выявленных урочищ в среде ГИС и статистической обработке данных. Елена В. Занозина участвовала в ГИС-анализе данных и статистической обработке данных. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Victor V. Zanozin supervised the scientific study, took part in field surveys, GIS-analysis and data visualisation, landscape diversity calculations and manuscript writing. Alexander N. Barmin participated in statistical data processing, writing and editing the manuscript text. Valery V. Zanozin participated in field studies, classification of natural territorial complexes and manuscript writing. Stanislav A. Yamashkin participated in statistical data processing, analysis of the obtained calculations, writing and editing of the manuscript. Viktoriya A. Koren participated in mapping of the identified geosystems in GIS and statistical data processing. Elena V. Zanozina participated in GIS-analysis and statistical processing of data. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Виктор В. Занозин / Victor V. Zanozin <http://orcid.org/0000-0002-1854-516X>
 Александр Н. Бармин / Alexander N. Barmin <http://orcid.org/0000-0002-6705-1553>
 Валерий В. Занозин / Valery V. Zanozin <http://orcid.org/0009-0006-6431-2283>
 Станислав А. Ямашкин / Stanislav A. Yamashkin <https://orcid.org/0000-0002-7574-0981>
 Виктория А. Корень / Viktoriya A. Koren <http://orcid.org/0009-0008-6124-2069>
 Елена В. Занозина / Elena V. Zanozina <http://orcid.org/0009-0002-4893-2141>