

В.В. Занозин¹, А.Н. Бармин², С.А. Ямашкин³, А.А. Ямашкин⁴

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЛАНДШАФТНОГО РАЗНООБРАЗИЯ В МОРФОЛОГИЧЕСКОМ АСПЕКТЕ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ВОЛГИ

АННОТАЦИЯ

В статье представлена методика оценки ландшафтного разнообразия, позволяющая получить комплексную численную характеристику географической среды, интегрирующую в себе свойства её устойчивости, определяющую особенности хозяйственного использования. Выявление и анализ ландшафтного разнообразия природно-территориальных комплексов представляет собой актуальную задачу, стоящую в центре внимания современных ландшафтных исследований. На основе анализа существующих цифровых ландшафтных карт, изучения результатов экспериментальных исследований системных связей, обеспечивающих функционирование природно-социально-производственных систем, а также обзора структурно-генетических ландшафтных исследований впервые проделана попытка оценить ландшафтное разнообразие центральной части ландшафта дельты р. Волги. В настоящей работе представлен ряд основных ландшафтных метрик, используемых при оценке ландшафтного разнообразия для территории центральной части ландшафта дельты р. Волги. Среди них: средняя площадь ландшафтных выделов, индекс ландшафтной дробности, индекс ландшафтной сложности, коэффициент ландшафтной раздробленности, индекс ландшафтной мозаичности, индекс относительного богатства, индекс Менхиника. Для создания схем ландшафтного разнообразия был апробирован малоиспользуемый в отечественном ландшафтном картографировании способ сеток в виде гексагонов. Проведённое исследование и оценка ландшафтного разнообразия коренных урочищ центральной части дельты р. Волги даёт возможность выбора правильных решений при организации территории. Оно приобретает ведущее значение в обосновании хозяйственной деятельности в регионе и является необходимой составляющей ландшафтного проектирования. Как показали выполненные исследования, наибольшее количество ненарушенных естественных природных территориальных комплексов отмечается на участках с высокой степенью ландшафтного разнообразия. Многие из них территориально совпадают или находятся вблизи участков со статусом особо охраняемых природных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дельта Волги, ландшафтное разнообразие, ландшафтные индексы, ландшафтная метрика, инфраструктура пространственных данных

¹ Астраханский государственный университет, Геолого-географический факультет, пл. Шаумяна, д. 1, 414000, Астрахань, Россия; *e-mail*: victorzan44@gmail.com

² Астраханский государственный университет, Геолого-географический факультет, пл. Шаумяна, д. 1, 414000, Астрахань, Россия; *e-mail*: abarmin60@mail.ru

³ Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, ул. Большевикская, д. 68, 430005, Саранск, Российская Федерация; *e-mail*: yamashkinsa@mail.ru

⁴ Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, ул. Большевикская, д. 68, 430005, Саранск, Российская Федерация; *e-mail*: yamashkin56@mail.ru

**Victor V. Zanozin¹, Aleksandr N. Barmin², Stanislav A. Yamashkin³,
Anatoly A. Yamashkin⁴**

**METHODS AND ALGORITHMS FOR ASSESSING LANDSCAPE DIVERSITY
IN MORPHOLOGICAL TERMS ON THE EXAMPLE OF THE CENTRAL PART
OF THE VOLGA RIVER DELTA**

ABSTRACT

The article presents a methodology for assessing landscape diversity, which allows to obtain a comprehensive numerical characteristic of the geographical environment, integrating the properties of its stability, which determines the characteristics of economic use. The identification and analysis of the landscape diversity of natural-territorial complexes is an urgent task that is in the center of attention of ecological and geographical research. On the basis of digital landscape maps, the results of experimental studies of system relationships of functioning of natural-social-production systems and structural-genetic landscape studies for the first time landscape diversity of the central part of the landscape of the Volga River delta was made. In this paper, we analyzed a number of basic landscape metrics used in assessing landscape diversity for the territory of the central part of the landscape of the Volga River Delta. Among them: the average area of landscape sections, the index of landscape fragmentation, the index of landscape complexity, the coefficient of landscape fragmentation, the index of landscape mosaic, the index of relative wealth, the Menninik index. To create schemes of landscape diversity, the method of nets in the form of hexagons, which is hardly used in domestic landscape mapping, was tested. The study and assessment of the landscape diversity of the indigenous tracts of the central part of the Volga River Delta proves that such a study makes it possible to choose the right decisions when organizing the territory. It takes on leading significance in the justification of economic activity and is a necessary component of design. Studies have shown that the largest number of undisturbed natural territorial complexes is found in areas with a high degree of landscape diversity. Many of them territorially coincide or are close to sites with the status of specially protected natural areas.

KEYWORDS: Volga Delta, landscape diversity, landscape indexes, landscape metrics, spatial data infrastructure

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость решения научной проблемы повышения эффективности анализа закономерностей пространственно-временной организации сложных динамических геосистем для реализации стратегии устойчивого развития, прогнозирования природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций представляет собой актуальный вызов современности [Касимов и др., 2004]. Ключом к комплексному решению обозначенного вопроса выступает разработка теории и методологии создания цифровых инфраструктур пространственных данных (ИПД), основанных на эффективных геопортальных системах, комплексной интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), цифровых ландшафтных карт и иной информации, синтезируемой посредством анализа системных связей и закономерностей функционирования и развития природно-социально-

¹ Astrakhan State University, Shaumyan Square, 1, 414000, Astrakhan, Russia; *e-mail*: victorzan44@gmail.com

² Astrakhan State University, Shaumyan Square, 1, 414000, Astrakhan, Russia; *e-mail*: abarmin60@mail.ru

³ N.P. Ogarev Mordovia State University, Bolshevistskaya str., 68, 430005, Saransk, Russia;
e-mail: yamashkinsa@mail.ru

⁴ N.P. Ogarev Mordovia State University, Bolshevistskaya str., 68, 430005, Saransk, Russia;
e-mail: yamashkin56@mail.ru

производственных систем (ПСПС) для принятия управленческих решений в области устойчивого развития регионов России.

В данном контексте краеугольное значение приобретает целесообразность создания и экспериментального обоснования новых геоинформационных методов и алгоритмов комплексной интерпретации данных ДЗЗ, цифровых карт и вспомогательной пространственно-временной информации с использованием глубокого машинного обучения (Deep Learning), позволяющих проводить высокоточный автоматизированный мониторинг систем природопользования, закономерностей проявления природных и природно-техногенных чрезвычайных экологических ситуаций в системе цифровых ИПД. Автоматизированный анализ мультимодальных пространственных данных должен быть фундаментализирован на экспериментальном исследовании системных связей и закономерностей функционирования и развития ПСПС с последующей разработкой новых высокоточных алгоритмов прогнозирования развития пространственно-временных процессов на основе анализа больших массивов ретроспективных, текущих и экспертных данных цифровой ИПД с комплексным применением нейронных сетей и апробацией результатов исследований на тестовых полигонах. Высокий потенциал имеет применение электронных ландшафтных карт и результатов структурно-генетических ландшафтных исследований (школа ландшафтоведения МГУ имени М.В. Ломоносова [Николаев, 1979; Хорошев и др., 2019]) наравне с машинным анализом мультиспектральных данных ДЗЗ, традиционно применяемых в России и зарубежных странах. Динамичное развитие глубокого обучения в последние годы — это время, когда результаты российских исследований в области ландшафтоведения смогут проявить себя на острие научно-технологического развития.

В естественных науках, где анализу подвергаются природная среда и её компоненты, уже в XX в. проявилась тенденция рассматривать объекты исследования как системы — совокупностей компонентов, закономерно связанных друг с другом в единое целое. Такой подход исследования объектов природной среды можно проследить и в системе наук о Земле, в частности, в ландшафтоведении, в котором можно выделить концепцию «ландшафтного разнообразия» (“landscape diversity”). Однако, несмотря на частое использование данного термина в отечественных и зарубежных научных работах, он, как утверждают исследователи, не имеет общепринятого определения [Ганзей, Иванов, 2012; Соколов, 2014].

Появление первых теоретических и практических разработок в области анализа ландшафтных метрик, в т.ч. и ландшафтного разнообразия, можно проследить в отечественном ландшафтоведении прошлого столетия [Ивашутна, Николаев, 1969; Викторов, 1986]. Индексы, применяемые для расчёта ландшафтного разнообразия, используются и в ландшафтной экологии [McGarigal, Mark, 1995; André, 2006]. Анализ ландшафтного разнообразия стал одним из направлений ландшафтных исследований, позволяющих получить новые научные и практические результаты в области природопользования и охраны окружающей среды и в настоящее время [Идрисова, 2004]. Актуальность анализа ландшафтного разнообразия подтверждается и в последних теоретических ландшафтных исследованиях [Хорошев и др., 2019].

Ландшафтное разнообразие, отражающее сложные сочетания и взаимосвязи между природно-территориальными комплексами и компонентами природной среды, является основой сохранения экологической стабильности, устойчивого развития территорий, определяет характер использования географической среды [Бондур и др., 2008]. Оно является не только необходимым условием разнообразия видов, сообществ, таксономических групп и т.д., но и имеет самостоятельное значение как предпосылка для оптимизации деятельности человека [Слепокуров, 2000].

Ландшафт дельты Волги, являясь уникальным регионом, «оазисом» среди окружающей его пустыни, обладает специфичным геолого-геоморфологическим

строением, мозаичностью почвенно-растительного покрова, территориальной изрезанностью водотоками. Однако именно центральная часть дельты Волги претерпела существенные изменения, обусловленные как природными, так и социально-экономическими факторами. Именно здесь пересеклись интересы разных видов природопользования: сельскохозяйственного, рыбопромыслового, добычи полезных ископаемых и рекреационного.

Несмотря на значительное количество научных публикаций, посвящённых различным проблемам устья Волги (засоления, состояния почвенно-растительного покрова, изменения гидрологического режима и другим вопросам), в настоящее время не выявлено работ, посвящённых анализу ландшафтного разнообразия дельты Волги.

Объектом выполненного исследования является центральная часть ландшафта дельты р. Волги (рис. 1). **Предметом** исследования является ландшафтное разнообразие рассматриваемого региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретические аспекты исследования

Ландшафтное разнообразие можно рассматривать в 2-х аспектах — ландшафтно-компонентном и ландшафтно-геосистемном. В первом варианте анализу подвергается разнообразие строения и состава каких-либо природных компонентов, например, биоразнообразие как степень разнообразия видов и численности растительного и животного компонентов ландшафта [Пурдик и др., 2008]. Во втором случае разнообразие исследуется на геосистемном уровне как разнообразие природных комплексов (геосистем) разного уровня, слагающих пространственно-временную структуру комплексов более высокого ранга.

Разнообразие компонентов системы, которое рассматривается со стороны системного подхода, обуславливает разнообразие её иерархической организации, а разнообразие ПТК характеризует разнообразие ландшафта. Концепция ландшафтного разнообразия, базирующаяся на системном подходе, позволяет рассматривать территорию любой размерности как хорошо структурированную систему с чётко организованным соподчинением природно-территориальных комплексов. Следовательно, системный подход позволяет рассматривать ландшафтное разнообразие как показатель иерархической организации ландшафтной сферы и ландшафтной структуры любой территории. Таким образом, ландшафтное разнообразие формируется в зависимости от структурно-динамических, экологических и функциональных особенностей ландшафта, что в свою очередь обусловлено системной организацией этого природного комплекса. Таким образом, ландшафтное разнообразие следует рассматривать в качестве сложного интегрального показателя, содержащего информацию о системной организации ландшафта и особенностях выполнения им природных и социальных функций [Марцинкевич, 2005; 2007 (а)]. Такое понимание и получило название «ландшафтное разнообразие» (далее ЛР) и в данной работе предметом анализа является именно второй аспект.

Подходы и методы изучения ландшафтного разнообразия

Как отмечают исследователи [Ганзей, Иванов, 2012; Соколов, 2016; Позаченюк, Агиенко, 2017], для оценки ландшафтного разнообразия в ландшафтоведении выделено два основных направления. Первый вариант заключается в качественной и количественной оценке ландшафтного разнообразия с использованием ландшафтных карт и ряда статистических коэффициентов [Николаев, 1979; Марцинкевич, 2007 (б)]. В этом случае под ЛР понимается число и частота встречаемости природных территориальных комплексов (ПТК) в пределах какого-либо региона, являющихся отражением структурно-генетической неоднородности территории, связанной главным образом со свойствами литогенной основы. При этом рассматриваться может вариабельность морфологических

единиц (урочищ, фаций) в пределах ландшафта (морфологический аспект), разнообразие видов ландшафтов в пределах рода или ландшафтного района (таксономический аспект) [Марцинкевич, 2007 (б)], вариабельность видов и родов в пределах административно-территориальных единиц либо иных территорий, например, особо охраняемых природных территорий (ООПТ) или элементов геометрически правильной сетки (территориальный аспект).



*Рис. 1. Схема центральной части ландшафта дельты р. Волги
(по [Занозин, Бармин, 2018])*

*Fig. 1. Scheme of the central part of the Volga River Delta landscape
(by [Zanozin, Barmin, 2018])*

Второе направление анализа ландшафтного разнообразия связано с использованием космических снимков и материалов дистанционного зондирования Земли. В этом случае под ЛР понимается «размеры, форма и связанность различных экосистем на протяжении большой территории», обусловленные прежде всего отражательными свойствами ландшафта [Лузаченко, 2002].

В качестве территорий, являющихся объектом оценки ландшафтного разнообразия, могут выступать административные единицы (районы и области), ландшафтные единицы (ландшафтные районы и провинции), речные бассейны разного ранга (согласно бассейновому подходу, когда географическая оболочка разделяется на систему иерархически соподчинённых геосистем, отделённых друг от друга геоморфологическими границами — линиями водоразделов), ООПТ. Также может быть использован популярный и хорошо зарекомендовавший себя в других областях ландшафтоведения [Михайлов, 2012;

Бодрова, 2018] способ анализа пространства — использование элементов геометрической правильной сетки в виде квадратов, в пределах каждого из которых рассчитывается показатель.

Методика выполнения работ по исследованию ландшафтного разнообразия центральной части ландшафта дельты Волги

Комплексные полевые исследования, анализ фондовых, литературных и картографических материалов, а также данных дистанционного зондирования Земли позволили спроектировать ландшафтную карту центральной части ландшафта дельты реки Волга. Таким образом, методика, использованная в данной работе, основывается на надёжном методе изучения ландшафтного разнообразия при геосистемном подходе — картографическом, а сам анализ ЛР проводился на уровне именно коренных урочищ (морфологический аспект), пространственное исследование которых выполнялось в процессе полевых исследований, которые продолжаются с 2015 г.

Цикл исследования, начиная от моделирования природных-территориальных комплексов и заканчивая расчётами ландшафтных метрик, выполнялся в программном комплексе ArcMap 10.4.1 с привлечением дополнительных расширений Patch Analyst v.5.2.0.16 и Patch Grid v.5.1.0.7 (Ontario Ministry of Natural Resources), а также Python-расширения ZonalMetrics.

Как было отмечено ранее, в исследованиях могут быть использованы регулярные сетки. Они используются по многим причинам, в частности, для уменьшения неоднородности полигонов неправильной формы (какими по своей сущности и являются природные территориальные комплексы). Регулярные сетки могут состоять только из равносторонних треугольников, квадратов или шестиугольников, т.к. только такая геометрия полигонов позволяет создавать мозаичное замощение (совокупность одинаковых фигур, охватывающую всю область без пробелов и перекрытий), чтобы получить равномерную сетку.

Хотя сетка квадратов является основным типом геометрии в ГИС-анализе и тематической картографии, в данном исследовании была апробирована сетка шестиугольников-гексагонов (рис. 2а), успешно применённая при географических исследованиях на др. территориях [Griffith et al., 2000; Schindler et al., 2008; Braun, Hochschild, 2017]. Выбор гексагональной сетки обусловлен рядом причин [Birch et al., 2007]:

- шестиугольники позволили уменьшить смещение выборки из-за краевых эффектов, вызванных геометрией сетки, что связано с низким значением отношения периметра к площади шестиугольника. Наименьшее соотношение имеет окружность, но окружности не могут создать замощение в виде непрерывной сетки. Шестиугольники обладают наиболее близкой к окружности геометрией и могут складываться в мозаику, формируя равномерную сетку;

- при сравнении полигонов с равными площадями выявлено, что чем ближе форма полигона к окружности, тем ближе к центроиду оказываются точки у границ (особенно рядом с вершинами). Это означает, что любая точка внутри шестиугольника находится ближе к его центроиду, чем любая точка в квадрате или треугольнике аналогичной площади (из-за более острых углов квадрата и треугольника по сравнению с шестиугольником). Данное положение учитывалось при анализе количества выделов внутри ячейки-гексагона;

- в мировой практике использование шестиугольников более предпочтительно, т.к. в этом случае в анализ пространственной структуры включались аспекты связности;

- из-за линейной природы прямоугольников регулярные сетки формируют прямые параллельные линии, что может скрывать от наблюдателя закономерности, имеющиеся в данных. Шестиугольники позволили разбить эти линии, тем самым дали

возможность легче наблюдать закономерности в данных, имеющих криволинейную форму, какими и обладают в т.ч. ПТК в дельте Волги. Это позволило прервать искусственные прямолинейные закономерности и снизить смещение по расположению, которое может проявляться в регулярных сетках.

После построения гексагональной сетки необходимо было выполнить исключение из решётки лишних ячеек, не пересекающих территорию исследования. Для этого осуществлена выборка объектов (ячеек) по расположению, и, соответственно, очистка слоя, т.е. исключение лишних ячеек для получения регулярной геометрической сетки, покрывающей только территорию исследования (рис. 2а). Площадь целой ячейки гексагона составила 21,65 км². Для дробных частей минимальная площадь составила 1,56 км², максимальная — 21,63 км². Оптимальный размер ячейки подбирался экспериментальным путём, т.к. необходимо было исключить как совпадения размера ячейки с минимальным размером ПТК, так и включение в ячейку лишь части одного ПТК, а также исключить слишком крупные размеры ячеек, которые могли бы включить в себя очень большое количество ландшафтных контуров (рис. 2б).

Подготовительные работы расчётов метрик ЛР начались с выявления простых числовых показателей, таких как: набор видов ПТК, количества ландшафтных контуров (или ландшафтных выделов) и их площади внутри исследуемого региона. Более сложным пространственно-статистическим процессом стало выявление количества ландшафтных контуров и их площади внутри ячейки-гексагона.

В ходе подготовительных работ по оценке ЛР центральной части ландшафта дельты р. Волги общей площадью 3899,44 км²:

а) выделяется 5 групп урочищ, каждая из которых отличается своим генезисом: русловые; култучные; бугровые; урочища, сформировавшиеся на основе морских островов; урочища гидрологические (ильмени);

б) установлено, что общее количество видов ПТК в пределах исследуемого региона составляет 31, из них: 11 видов ПТК, входящих в группу русловых урочищ; 7 видов ПТК, входящих в группу култучных урочищ; 5 видов ПТК, входящих в группу бугровых урочищ; 3 вида ПТК, входящих в группу урочищ, сформированных на основе морских островов; 5 видов ПТК, входящих в группу гидрологических урочищ (без учёта рек и водотоков);

в) количество ландшафтных выделов (ландшафтных контуров) в пределах исследуемого региона составило 2712, из них: 858 ландшафтных выделов группы русловых урочищ; 597 ландшафтных выделов группы култучных урочищ; 1044 ландшафтных выделов группы бугровых урочищ; 12 ландшафтных выделов группы урочищ, сформированных на основе морских островов; 201 ландшафтных выделов группы гидрологических урочищ.

Далее, используя информацию о простых ландшафтных показателях исследуемой территории, был рассчитан ряд сложных показателей (табл. 1, рис. 3.), хорошо зарекомендовавших себя при исследовании ландшафтного разнообразия различных регионов [Пурдик и др., 2008; Ганзей, Иванов, 2012; Помазкова, Фалейчик, 2013; Викторов, 2014; Позаченюк, Агиенко, 2017; Чепурнов и др., 2017].

Индекс ландшафтной дробности (или индекс дробности ландшафтных контуров) показывает среднее количество контуров (выделов) на заданную территорию исследования, в данном случае гексагон. Индекс ландшафтной сложности означает отношение количества выделов (контуров) на среднюю площадь ландшафтных выделов внутри гексагона, тогда как средняя площадь ландшафтных выделов — это отношение общей площади исследуемой территории к количеству ландшафтных выделов в ней. Коэффициент ландшафтной раздробленности позволяет оценить средний размер площади конкретного природного территориального комплекса к площади исследуемой территории (гексагона). Индекс ландшафтной мозаичности отражает среднее количество

выделов на одну группу ПТК в пределах шестиугольника. Индекс относительного богатства в данном исследовании показывает долю числа видов ПТК в пределах ячейки-гексагона от числа видов ландшафтов на территории центральной части дельты р. Волги.

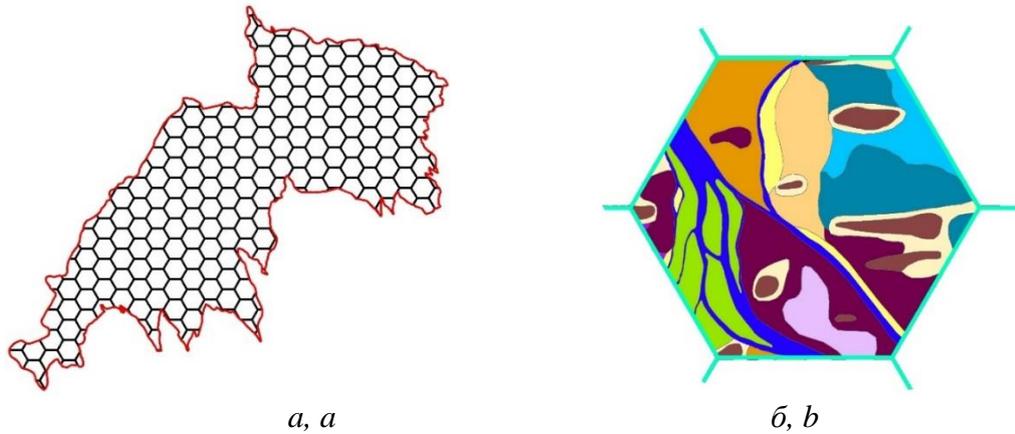


Рис. 2. а) покрытие территории исследования сеткой гексагонов;
 б) масштаб одной ячейки гексагона
 Fig. 2. a) covering the study area with a grid of hexagons;
 b) scale of one hexagon cell

Табл. 1. Используемые индексы в оценке ландшафтной раздробленности
 Table 1. Indexes used in assessing landscape fragmentation

Название индекса	Формула	Показатели/Примечания
Средняя площадь ландшафтных выделов	$S_{ncp} = \frac{S}{n}$	n — количество ландшафтных контуров (выделов) внутри ячейки-гексагона; S — площадь одной ячейки гексагона; m — количество видов природно-территориальных комплексов внутри ячейки-гексагона; M — общее количество видов природно-территориальных комплексов внутри исследуемой территории
Индекс ландшафтной дробности	$Ldr = \frac{n}{S}$	
Индекс ландшафтной сложности	$Lsl = \frac{n}{S_{ncp}}$	
Коэффициент ландшафтной раздробленности	$Lrd = \frac{S_{ncp}}{S}$	
Индекс ландшафтной мозаичности	$Lm = \frac{m}{n}$	
Индекс относительного богатства	$Lb = \frac{m}{M}$	
Индекс Менхеника	$Lmh = \frac{m}{\sqrt{S}}$	

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственно-статистический анализ ЛР показал, что в центральной части ландшафта дельты р. Волги можно выделить несколько характерных зон, отражающих различное пространственное распределение ЛР. Физическая интерпретация этих закономерностей вполне объяснима.

Рассмотрим более подробно картину результатов исследования, отражённую на рис. 3. Наиболее высокие показатели ландшафтной дробности (рис. 3а) и ландшафтной сложности (рис. 3б) отмечаются к югу от г. Астрахани, что объясняется большим

количеством ПТК, относящихся к группам бугровых и русловых урочищ. К юго-востоку от населённого пункта Володарский было выявлено большое количество урочищ в гексагоне, что обусловлено их малыми морфологическими показателями (длина и ширина) (рис. 4), что и повлияло на результаты расчётов индексов. Исключение составляет лишь небольшой «аномальный» фрагмент, расположенный фактически в центре рассматриваемого участка.

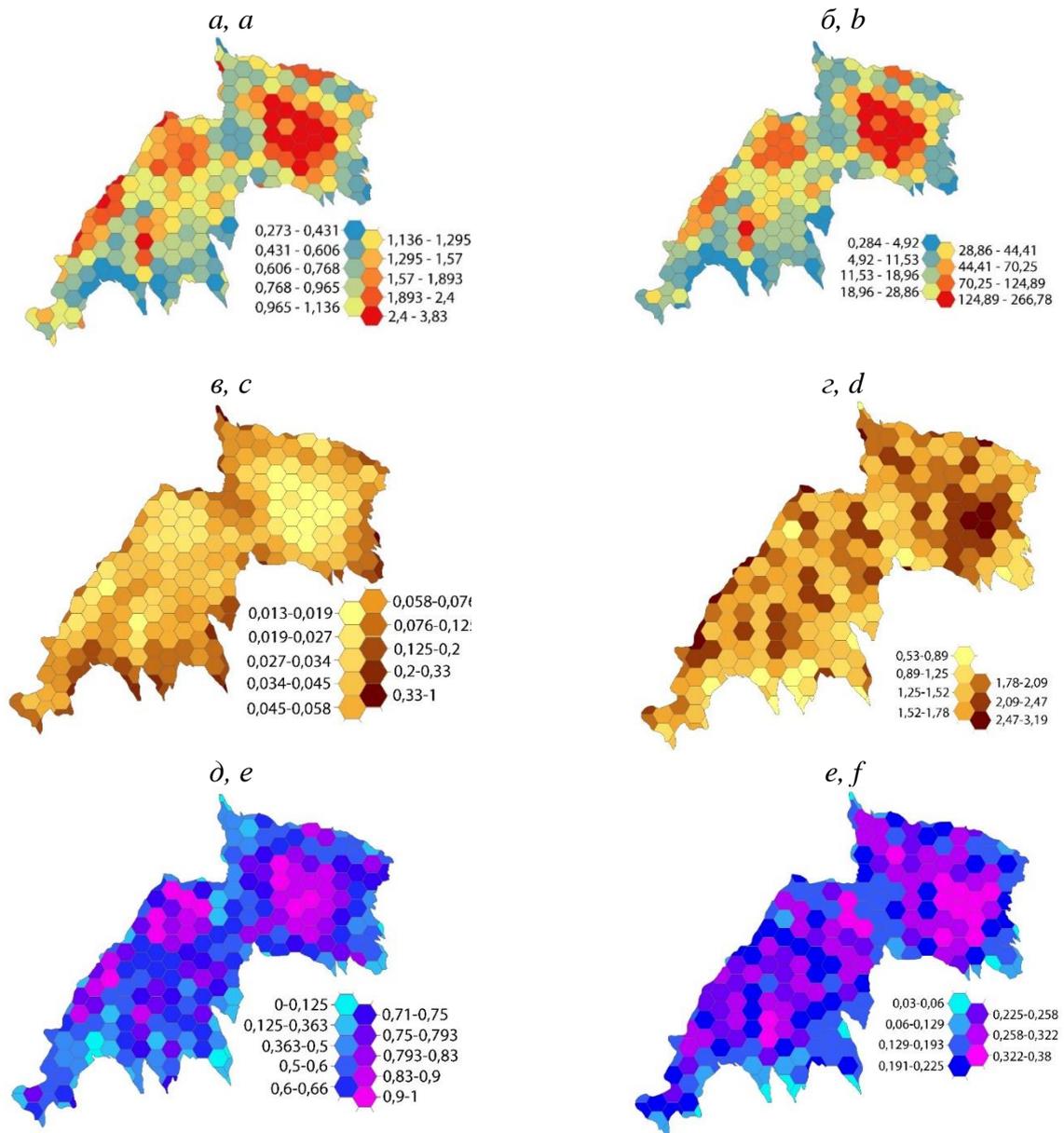


Рис. 3. Схемы центральной части ландшафта дельты р. Волги:
 а — ландшафтная дробность, б — ландшафтная сложность, в — ландшафтная
 раздробленность, г — ландшафтное разнообразие по индексу Менхиника,
 д — ландшафтная мозаичность, е — ландшафтное относительное богатство

Fig. 3. Schemes of the central part of the Volga Delta landscape:
 а — landscape fragmentation, б — landscape complexity, в — landscape fragmentation,
 д — landscape diversity according to the Menhinik Index, е — landscape mosaic,
 ф — landscape relative wealth

На схемах ландшафтной дробности и ландшафтной сложности также можно выделить ещё 3 характерных участка, имеющие высокие показатели по данным индексам: у населённого пункта Новые Булгары, севернее населённого пункта Образцово-Травино и к востоку и юго-востоку от населённого пункта Кривой Бузан. Комплексные ландшафтные исследования на одном из ключевых участков вблизи Образцово-Травино подтвердили полученные результаты. Здесь отмечаются практически все основные виды русловых и култучных урочищ, причём размеры их незначительны, что вызывает постоянную смену ПТК по линии профиля. Таким образом, на данных участках наблюдается высокая степень смены ландшафтных контуров (большое количество ландшафтных выделов) на заданную единицу территории (ячейка гексагона).



Рис. 4. Фрагмент ячеек-гексагонов с контурами урочищ юго-восточнее населённого пункта Володарский. Красным гексагоном отмечен «аномальный» участок с низким содержанием выделов ПТК

Fig. 4. Fragment of hexagon cells with contours of natural territorial complexes southeast of Volodarsky settlement. Red hexagon marked “abnormal” area with low content of natural territorial complexes

Результаты, полученные при анализе расчёта коэффициента ландшафтной раздробленности, несмотря на плавный цветовой градиент, в целом коррелируются с показателями индексов ландшафтной дробности и ландшафтной сложности (рис. 3в). Данный показатель напрямую зависит от отношения средней площади контура (выдела) ПТК к площади исследуемой ячейки регулярной сетки (гексагона): чем больше средняя площадь ландшафтных выделов, тем больше показатель коэффициента. Иными словами, если средняя площадь ландшафтных выделов стремится к площади ячейки, показатель коэффициента растёт, и наоборот. Высокие значения данного коэффициента отмечаются по периферии всего исследуемого региона, особенно его южной и юго-восточной части: здесь присутствуют большие по площади култучные урочища, а также особый вид групп урочищ, сформировавшихся на морских островах.

Формула коэффициента ландшафтной мозаичности из вида:

$$Lm = \frac{m}{n} \quad (1)$$

была преобразована в вид:

$$Lm = 1 - \frac{m}{n} \quad (2).$$

Таким образом, полученное в результате число отнимается от единицы, чтобы увеличение разнообразия сопровождалось, как и для других индексов, увеличением значения показателя. Чем выше значение коэффициента в ячейке регулярной сетки (гексагоне), тем больше вероятность, что здесь большое количество контуров при высоком видовом составе ПТК, и наоборот, чем меньше показатель, тем ниже видовой состав и плотность контуров в данной ячейке (рис. 5). Таким образом, показатели данного индекса также взаимосвязаны с результатами индексов ландшафтной дробности и ландшафтной сложности (рис. 3д).

Немного иное представление о пространственном расположении ПТК в центральной части дельты р. Волги даёт индекс относительного богатства. В отличие от предыдущих коэффициентов, где основными критериями были площади и количество выделов ПТК вообще, здесь основным фактором является именно количество видов ПТК. Низкие показатели данного индекса в целом характерны для периферии центральной части дельты. Средние значения индекса относительного богатства в окрестностях г. Астрахани связаны с преобладанием здесь группы бугровых урочищ. Наибольшее значение данного индекса характерно для юго-востока центральной части ландшафта дельты Волги, что обусловлено большим количеством выделов урочищ и их видовым разнообразием (рис. 6).

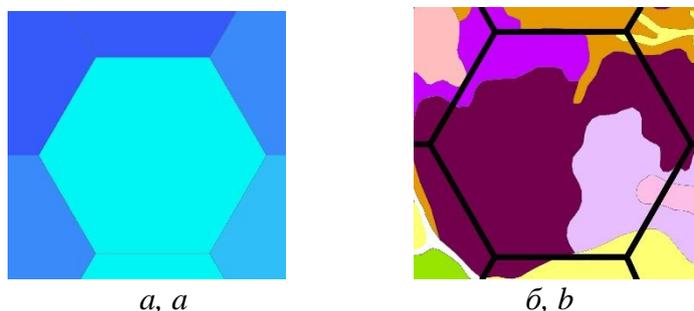


Рис. 5. Коэффициент ландшафтной мозаичности:

a — гексагон с низким показателем при расчёте коэффициента мозаичности;

б — фрагмент ландшафтной карты с контурами гексагона.

Видно, что большую часть ячейки занимает почти один выдел ПТК

Fig. 5. Coefficient of landscape mosaic:

a — a hexagon with a low index in the calculation of the coefficient of mosaic;

b — a fragment of a landscape map with hexagon contours.

It can be seen that the most part of the cell is occupied

by almost one branch of nature complex

В данном исследовании был также использован индекс, пришедший из биологических наук — индекс Менхиника [Menhinick, 1963], который ранее использовался при расчётах ЛР [Марцинкевич, 2005; Черных, 2011]. Показатели данного индекса зависят от количества видового разнообразия урочищ на заданной территории исследования (ячейка гексагона). Величины ландшафтного разнообразия по Менхинику хоть и не обнаруживают абсолютного соответствия с другими показателями, однако проследить корреляцию с результатами других индексов всё же возможно. На схеме

ландшафтного разнообразия по Менхинуку (рис. 3г) легко различимы области с высокими показателями на юго-востоке н.п. Володарский, а также к северо-западу от н.п. Образцово-Травино, что во многом соответствует значениям ранее рассмотренных коэффициентов.



a, a

б, b

Рис. 6. Окрестности населённого пункта Большой Могой с высокими значениями индекса относительного богатства, где разноуровневые русловые урочища (а) сменяются на култучные, переходя к бугровым (б)

Fig. 6. The outskirts of the Bolshoi Mogoi settlement with high values of the relative wealth index, where the multilevel channel gorges (a) are replaced by kultuk ones, passing to the hillock ones (b)

ВЫВОДЫ

Новые геоинформационные методы и алгоритмы глубокого автоматизированного анализа сложных геосистем должны быть основаны на информативных массивах пространственных данных, накапливаемых в цифровых ИПД. Важным источником аналитического материала для исследований выступают цифровые ландшафтные карты и результаты структурно-генетических ландшафтных исследований системных связей и закономерностей функционирования и развития ПСПС, которые с успехом могут быть использованы для обучения глубоких нейронных сетей. Высокая эффективность новых алгоритмов глубокого машинного обучения потенциально обеспечивается двумя направлениями исследований: синтез новых эффективных нейросетевых архитектур для эффективного анализа больших данных в цифровых ИПД и использование пространственно-временных данных нового типа для обучения и классификации. В данной статье сфокусировано внимание на втором аспекте: предложена методика оценки ландшафтного разнообразия, позволяющая получить комплексную численную характеристику природно-территориальных комплексов, интегрирующую в себе свойства её устойчивости, определяющие особенности хозяйственного использования.

Ландшафтное разнообразие является одной из важнейших физико-географических характеристик территории. С ним связана устойчивость ПТК к нагрузкам, особенности хозяйственного освоения и современного использования, биоразнообразие, природоохранный потенциал и ряд других важнейших свойств. Это позволяет использовать ландшафтное разнообразие как один из инструментов природоохранной

деятельности, а саму его концепцию как достаточно продуктивную теоретико-методологическую основу для эффективного принятия управленческих решений в области природопользования, заповедного дела, ландшафтного планирования и т.п.

В целом выявление ландшафтного разнообразия природных комплексов следует рассматривать как одно из направлений ландшафтного анализа, тесно связанное с ландшафтным картографированием, исследованием морфологической структуры ландшафта. Ландшафтный анализ при организации территории относится к современным, высокотехнологичным прикладным направлениям, опирающимся на математические методы, технологические средства ГИС и ДЗЗ.

Для оценки ландшафтного разнообразия в ландшафтоведении выделилось 2 основных направления: анализ ландшафтной карты с применением ряда статистических коэффициентов и с применением космических снимков и материалов дистанционного зондирования Земли. Методика, использованная в данной работе, в первую очередь основывается на картографическом методе исследования, но с применением данных ДЗЗ. Несмотря на то что анализ ЛР осуществлялся на основе созданной карты коренных ПТК, сама карта выполнялась в т.ч. путём детального изучения данных ДЗЗ, дешифрирования космических снимков. В то же время использование только лишь космической информации при оценке ЛР привело бы к тому, что анализировался бы современный ландшафтный покров, т.к. большинство ПТК подверглись сильному антропогенному воздействию. В работе было использовано 6 индексов для оценки ЛР. Однако, учитывая опыт научных разработок зарубежных исследователей [Nagenda, 2002], возможно расширение количества расчётов ЛР за счёт индекса Шеннона [Shannon, Weaver, 1949], индекса Симпсона [Simpson, 1949], коэффициента Маргалефа [Margalef, 1958], которые также перешли в географические науки из биологических. Расчёт тех или иных индексов ЛР в данной работе полностью коррелируется с проводимыми ландшафтными исследованиями региона.

В центральной части ландшафта дельты р. Волги можно отчётливо выделить ареалы как с большим количеством ландшафтных выделов (контуров), так и с количеством видов ПТК. В качестве операционных единиц, используемых для оценки ландшафтного разнообразия, был апробирован достаточно редко применяемый в отечественном ландшафтоведении способ анализа регулярной сетки в виде гексагонов. Использование др. операционных единиц в данном случае неприемлемо. Например, применение административных районов с их большими площадями привело бы к недостаточно ярко выраженной оценке ЛР. Речные острова данной части дельты также не подходят для проведения расчётов, т.к. имеют различные площадные показатели.

Как показали выполненные исследования, наибольшее количество ПТК, слабо преобразованных человеком, отмечается на участках с высокой степенью ландшафтного разнообразия. Многие из них территориально совпадают или находятся вблизи участков со статусом особо охраняемых природных территорий. Это даёт возможность рекомендовать некоторым участкам с высоким показателем ландшафтной мозаичности, дробности и сложности придания статуса ООПТ или аналогичного, учитывая их природоохранное, рекреационное, эстетическое значение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70055.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 20-37-70055.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бодрова В.Н.* Картографирование лесистости острова Сарпинский Волгоградской области. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2018. № 3. С. 47–54.
2. *Бондур В.Г., Савин А.И., Тикунов В.С.* Основные задачи в области устойчивого развития территорий. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы Междунар. конф. Саратов, 2008. Т. 14. Ч. 1. С. 3–7.
3. *Викторов А.С.* Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
4. *Викторов А.С.* Рисунок ландшафта: анализ геометрических свойств ландшафта и его практическое применение. Изд. 2-е. М.: ЛЕНАНД, 2014. 184 с.
5. *Ганзей К.С., Иванов А.Н.* Ландшафтное разнообразие Курильских островов. География и природные ресурсы, 2012. № 2. С. 87–94.
6. *Занозин В.В., Бармин А.Н.* Особенности районирования дельтовых ландшафтов. Геология, география и глобальная энергия, 2018. № 3 (70). С. 134–142.
7. *Ивашутна Л.И., Николаев В.А.* К анализу ландшафтной структуры физико-географических регионов. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 1969. № 4.
8. *Идрисова Р.А.* Ландшафты Чеченской Республики: пространственная структура и особенности селитебной нагрузки. Автореф. дисс. ... канд. геогр. н. Нальчик, 2009. 23 с.
9. *Касимов Н.С., Мазуров Ю.Л., Тикунов В.С.* Концепция устойчивого развития: восприятие в России. Вестник Российской академии наук, 2004. Т. 74. № 1. С. 28–36.
10. *Марцинкевич Г.И.* Ландшафтоведение Беларуси: основные достижения и направления дальнейшего развития. Фокус, 2007 (а). № 2. С. 12–19.
11. *Марцинкевич Г.И.* Ландшафтоведение. Мн.: Издательство Белорусского университета, 2007 (б). 206 с.
12. *Марцинкевич Г.И.* Оценка ландшафтного разнообразия природных и природно-антропогенных комплексов Беларуси. Природопользование. Мн.: ОДО «Тонпик», 2005. № 11. С. 98–105.
13. *Михайлов В.А.* Оценка антропогенной преобразованности ландшафтов с помощью ГИС (на примере Крымского Присивашья). Современные научные исследования и инновации, 2012. № 10 (18). Электронный ресурс: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17103> (дата обращения 23.09.2019).
14. *Николаев В.А.* Проблемы регионального ландшафтоведения. М.: Издательство Московского университета, 1979. 160 с.
15. *Слепокуров А.С.* Геоэкологические и инновационные аспекты развития туризма в Крыму. Симферополь: СОНАТ, 2000. 100 с.
16. *Соколов А.С.* Ландшафтное разнообразие: теоретические основы, подходы и методы изучения. Геополитика и экогеодинамика регионов, 2014. Т. 10. № 1. С. 208–213.
17. *Позаченюк Е.А., Агиенко А.А.* Оценка ландшафтного разнообразия Алуштинского амфитеатра. Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология, 2017. Т. 3 (69). № 2. С. 102–116.
18. *Помазкова Н.В., Фалейчик Л.М.* Ландшафтное разнообразие территории Забайкальского края: количественная оценка. Вестник Забайкальского государственного университета, 2013. № 9. С. 23–36.
19. *Пузаченко Ю.Г.* Разнообразие ландшафта и методы его измерения. География и мониторинг биоразнообразия. М.: Издательство НУМЦ, 2002. С. 76–178.
20. *Пурдик Л.Н., Червяков В.А., Шибких А.А.* Факторы и картографический анализ ландшафтного разнообразия территории Алтайского края. География и природные ресурсы, 2008. № 1. С. 156–161.
22. *Хорошев А.В., Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н. и др.* Теория и методология ландшафтного планирования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2019. 444 с.

23. *Чепурнов Р.Р., Прокашев А.М., Мокрушин С.Л., Матушкин С.А.* Морфометрические и ландшафтно-эстетические особенности Атарского экотона в долине реки Вятки. *Advanced science*, 2017. № 2. Электронный ресурс: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Биологические/чепурнов-прокашев-мокрушин-матушкин.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Биологические/чепурнов-прокашев-мокрушин-матушкин.pdf) (дата обращения 20.11.2019).
24. *Черных Д.В.* Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая. *Известия Алтайского государственного университета*, 2011. № 3–2 (71). С. 60–65.
25. *Birch C.P.D., Oom S.P., Beecham J.A.* Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment, and simulation in ecology. *Ecological Modeling*, 2007. V. 206. No 3–4. P. 347–359.
26. *Botequilha-Leitão A.* Measuring landscapes: a planner's handbook. Island Press, 2006. 272 p.
27. *Braun A., Hochschild V.A.* SAR-based index for landscape changes in African savannas. *Remote Sensing*, 2017. V. 9. 359 p. DOI: 10.3390/rs9040359.
28. *Griffith J., Martinko E., Price K.* Landscape Structure analysis of Kansas at three scales. *Landscape and urban planning*, 2000. V. 52. P. 45–61. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00112-2.
29. *Margalef R.* Information theory in ecology. *General Systems*, 1958. No 3. P. 36–71.
30. *McGarigal K., Marks B.J.* Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Corvallis, Oregon: Oregon State University Forest Science Department, 1995.
31. *Menhinick E.F.* Estimations of insect populations density in herbaceous vegetation with emphasis on removal sweeping. *Ecology*, 1963. No 44. P. 617–622.
32. *Nagenda H.* Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 2002. V. 22. P. 175–185.
33. *Schindler S., Poirazidis K., Wrba T.* Towards a core set of landscape metrics for biodiversity assessments: A case study from Dadia National Park, Greece. *Ecological Indicators*, 2008. No 8. P. 502–514. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.06.001.
34. *Shannon C.E., Weaver W.* The mathematical theory of communication. Illinois: University of Illinois Press, 1949. P. 1–117.
35. *Simpson E. H.* Measurement of diversity. *Nature*, 1949. No 163. 688p.

REFERENCES

1. *Birch C.P.D., Oom S.P., Beecham J.A.* Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment, and simulation in ecology. *Ecological Modeling*, 2007. V. 206. No 3–2. P. 347–359.
3. *Bodrova V.N.* Mapping woodiness of Sarpinsky Island, Volgograd Region. *Herald of Moscow University. Series 5. Geography*, 2018. No 3. P. 47–54 (in Russian).
4. *Bondur V.G., Savin A.I., Tikunov V.S.* Main tasks in the field of sustainable development of territories. *InterCarto. InterGIS. GIS theory and practical experience: Proceedings of the International conference. Saratov, 2008. V. 14. Part 1. P. 3–7 (in Russian, abs English).*
5. *Botequilha-Leitão A.* Measuring landscapes: a planner's handbook. Island Press, 2006. 272 p.
6. *Braun A., Hochschild V.A.* SAR-based index for landscape changes in African savannas. *Remote Sensing*, 2017. V. 9. 359 p. DOI: 10.3390/rs9040359.
7. *Chepurnov R.R., Prokashev A.M., Mokrushin S.L., Matushkin S.A.* Morphometric and landscape aesthetic features of the Atarsk ecotone in the Vyatka River valley. *Advanced science*, 2017. No 2. Web-resource: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Biological/чепурнов-прокашев-мокрушин-матушкин.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Biological/чепурнов-прокашев-мокрушин-матушкин.pdf) (accessed 20.11.2019) (in Russian).
8. *Chernykh D.V.* Quantitative estimation of complexity and diversity of the landscape cover of the Russian Altai. *Izvestiya of Altai State University*, 2011. No 3–2 (71). P. 60–65 (in Russian).
9. *Griffith J., Martinko E., Price K.* Landscape structure analysis of Kansas at three scales. *Landscape and Urban Planning*, 2000. V. 52. P. 45–61. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00112-2.

10. *Hansey K.S., Ivanov A.N.* Landscape diversity of the Kuril Islands. *Geography and Natural Resources*, 2012. No 2. P. 87–94 (in Russian).
11. *Idrisova R. A.* Landscapes of the Chechen Republic: Spatial structure and peculiarities of the settlement load. Abstract thesis of PhD dissertation. Nalchik, 2009. 23 p. (in Russian).
12. *Ivashutna L.I., Nikolaev V.A.* To the analysis of landscape structure of the physical and geographical regions. *Herald of Moscow University. Series 5. Geography*, 1969. No 4 (in Russian).
13. *Kasimov N.S., Mazurov Yu.L., Tikunov V.S.* Concept of sustainable development: Perception in Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2004. V. 74. No 1. P. 28–36 (in Russian).
14. *Khoroshev A.V., Avessalomova I.A., Dyaconov K.N. et al.* Theory and methodology of landscape planning. Moscow: KMK Publishing House, 2019. 444 p. (in Russian).
15. *Margalef R.* Information theory in ecology. *General Systems*, 1958. No 3. P. 36–71.
16. *Martsinkevich G.I.* Landscape science of Belarus: main achievements and directions of further development. *Focus*, 2007 (a). No 2. P. 12–19 (in Russian).
17. *Martsinkevich G.I.* Landscape science. Minsk: Belarus University Publishing House, 2007 (b). 206 p. (in Russian).
18. *Martsinkevich G.I.* Assessment of landscape diversity of the natural and natural-anthropogenic complexes in Belarus. *Nature Management*. Minsk: Tonpik, 2005. No 11. P. 98–105 (in Russian).
19. *McGarigal K., Marks B.J.* Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Corvallis, Oregon: Oregon State University Forest Science Department, 1995.
20. *Menhinick E.F.* Estimations of insect populations density in herbaceous vegetation with emphasis on removal sweeping. *Ecology*, 1963. No 44. P. 617–622.
21. *Mikhailov V.A.* Assessment of the anthropogenic transformation of landscapes by means of GIS (on the example of the Crimean Prisivash region). *Modern Scientific Research and Innovations*, 2012. V.10 (18). Web-resource: <http://web.snauka.ru/issues/2012/10/17103> (accessed 23.09.2019) (in Russian).
22. *Nagenda H.* Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 2002. V. 22 P. 175–185.
23. *Nikolaev V.A.* Problems of regional landscape science. Moscow: Moscow University Press, 1979. 160 p. (in Russian).
24. *Pomazkova N.V., Faleichik L.M.* Landscape diversity of the Transbaikalian Territory: quantitative estimation. *Transbaikalian State University Journal*, 2013. No 9. P. 23–36 (in Russian).
25. *Pozachenjuk E.A., Agienko A.A.* Assessment of landscape diversity of Alushta amphitheatre. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 2017. V. 3 (69). No 2. P. 102–116 (in Russian).
26. *Purdik L.N., Cherviakov V.A., Shibkikh A.A.* Factors and cartographical analysis of landscape diversity of the Altai Territory. *Geography and Natural Resources*, 2008. No 1. P. 156–161 (in Russian).
27. *Puzachenko Y.G.* Variety of landscape and methods of its measurement. *Geography and biodiversity monitoring*. Moscow: Publishing House of Scientific and Educational-Methodical center (SEMC), 2002. P. 76–178 (in Russian).
28. *Schindler S., Poirazidis K., Wr̄bka T.* Towards a core set of landscape metrics for biodiversity assessments: A case study from Dadia National Park, Greece. *Ecological Indicators*, 2008. No 8. P. 502–514. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.06.001.
29. *Shannon C.E., Weaver W.* The mathematical theory of communication. Illinois: University of Illinois Press, 1949. P. 1–117.
30. *Simpson E.H.* Measurement of diversity. *Nature*, 1949. No 163. 688 p.

31. *Slepokurov A.S.* Geoecological and innovative aspects of tourism development in Crimea. Simferopol: SONAT, 2000. 100 p. (in Russian).
 32. *Sokolov A.S.* Landscape diversity: theoretical bases, approaches and methods of study. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 2014. V. 10. No 1. P. 208–213 (in Russian).
 33. *Victorov A.S.* Drawing of the landscape. Moscow: Mysl', 1986. 179 p. (in Russian).
 34. *Victorov A.S.* Landscape drawing: analysis of geometrical properties of the landscape and its practical application. Iss. 2. Moscow: LENAND, 2014. 184 p. (in Russian).
 35. *Zanozin V.V., Barmin A.N.* Peculiarities of the delta landscapes zoning. *Geology, Geography and Global Energy*, 2018. V. 3 (70). P. 134–142 (in Russian).
-