



УДК 911.9:528.06(470.56)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.49>

Сравнительный анализ геоинформационных методов оценки комфортности урбанизированных территорий

С. А. Дубровская*

Институт степи УрО РАН, г. Оренбург, Россия

Аннотация. Представлены результаты методики оценки потенциала комфортности и перспектив развития зеленой инфраструктуры урбанизированных территорий на основе двух апробированных индексов. Выделены существенные различия в дифференциации ландшафтов при использовании гексагональной сетки при расчете уточненного геоинформационного индекса потенциала развития комфортности городской среды. Гексагональная решетка позволяет сравнить отдельные городские участки без учета площадного фактора. В уточненный геоинформационный индекс потенциала развития комфортности городской среды введены значения нормализованного разностного индекса застройки и нормализованного разностного вегетационного индекса, которые учитывают особенности развития хозяйственной и зеленой инфраструктуры урбанизированной территории. Последний учитывает всю зеленую инфраструктуру и состояние растительного покрова, а также оценивает существующий городской ландшафт как территорию, перспективную для развития или расширения рекреационной составляющей. Выделено два сектора для благоприятного развития рекреационных зон: северо-западная часть города, занимающая приводораздельные пространства Урало-Сакмарского междуречья и пойму р. Сакмары, и южная – высокая пойма, первая и вторая надпойменные террасы р. Урал. Эти городские пространства входят в максимальный и оптимальный уровень развития зеленой инфраструктуры по расчетам двух представленных индексов.

Ключевые слова: гексагональная решетка, городской ландшафт, зеленая инфраструктура, пространственная дифференциация, качество городской среды.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института степи УрО РАН № ГР 126013016160-7.

Для цитирования: Дубровская С. А. Сравнительный анализ геоинформационных методов оценки комфортности урбанизированных территорий // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 55. С. 49–60. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.49>

Original article

Comparative Analysis of Geoinformation Methods for Assessing the Comfort of Urbanized Areas

S. A. Dubrovskaya*

Institute of Steppe UB RAS, Orenburg, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a methodology for assessing the comfort potential and prospects for the development of green infrastructure in urbanized areas based on two proven indi-

ces. Significant differences in the differentiation of landscapes when using a hexagonal grid in the calculation of the updated geoinformation index of the potential for the development of urban comfort are highlighted. The hexagonal grid allows you to compare individual urban areas without taking into account the area factor. The values of the normalized difference building index and the normalized difference vegetation index have been introduced into the updated geoinformation index of the urban environment comfort development potential, which take into account the peculiarities of the development of the economic and green infrastructure of the urbanized territory. The latter takes into account the entire green infrastructure and the state of vegetation, and also evaluates the existing urban landscape as a promising area for the development or expansion of the recreational component. Two sectors have been identified for the favorable development of recreational areas – the northwestern part of the city, occupying the watershed spaces of the Ural-Sakmara interfluvium and the floodplain of the Sakmara River, and the southern – high floodplain, the first and second floodplain terraces of the Ural River. These urban spaces are included in the maximum and optimal level of green infrastructure development according to the calculations of the two indices presented.

Keywords: hexagonal grid, urban landscape, green infrastructure, spatial differentiation, quality of urban environment.

For citation: Dubrovskaya S.A. Comparative Analysis of Geoinformation Methods for Assessing the Comfort of Urbanized Areas. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 55, pp. 49-60. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.49> (in Russian)

Введение

Городской ландшафт – уникальная синтезированная среда, включающая в себя как природные, так и искусственные элементы, которые формируют единую систему и взаимодействуют между собой. Немаловажным фактором является гармоничное сочетание данных элементов, определяющих качество жизни человека, включая комфортные условия для его деятельности и проживания. Комфортная урбанизированная территория – это сложная динамическая социально-экологическая система, где физическая инфраструктура, природные компоненты и человеческое сообщество находятся в постоянном взаимодействии и коэволюции, а планирование и управление основаны не на инженерных нормативах, а на глубоком понимании человеческого поведения, принципах обеспечения экосистемных услуг с целью поддержки благополучия нынешнего и будущих поколений [Gehl, 2010]. Правильное управление городским пространством предполагает использование современных геоинформационных технологий (ГИС), позволяющих своевременно проводить сбор, обработку и анализ пространственных данных.

Информационной основой для ГИС являются пространственные географические объекты, имеющие определенный набор свойств и географических характеристик местности. Пространственные данные природного или природно-антропогенного ландшафта представляют собой взаимосвязанные части топологически-геометрической и атрибутивной информации. Эффективными методами к ГИС-анализу являются автоматизированные классификации, которые проводятся либо по атрибутам (выделением классов), либо используется технология оверлей (совместная обработка нескольких слоев одного географического пространства), а также могут применяться методы функциональных измерений (индексы каналов) и геометрических сетей (решетки полигонов).

Проводя пространственную дифференциацию урбанизированной территории, в первую очередь опираются на морфометрические данные, которые

являются достоверной информацией о ландшафтной структуре города. В работе О. П. Ермолаева и Р. Н. Селиванова проведено геоморфометрическое районирование г. Казани на основе применения метода искусственных нейронных сетей [Yermolaev, Selivanov, 2014]. Данный метод картографирования является трудоемким, требующим время на этап предварительной обработки данных и процесс идентификации полученных классов и их верификации в полевых условиях на территории города, интерпретации полученных результатов картографирования, совмещение полученной модели с картографической основой функционального зонирования, которая предварительно прошла этап привязки и оцифровки. В связи с этим появилась необходимость создания более эффективного способа обработки результатов геоинформационных данных для городских ландшафтов.

Для проведения комплексных исследований городского пространства широко применяются геоинформационные методы картографирования, предоставляющие способы фиксации изменений, их обобщения и структурирования [Дугарова, Богданова, 2022]. Оптимальным вариантом передачи особенностей развития пространственной структуры городского ландшафта является картографический метод с использованием сетки полигонов квадратной или гексагональной формы.

Гексагональные сетки или решетки как метод мониторинга разных типов геосистем используются достаточно давно и довольно эффективны для картографирования территорий [Birch, Oom, Beecham, 2007; Piniarski, 2023; Крамаров, Митясова, 2020; Ахметов, Ахметова, 2016; Данилов, 2019; Занозин, Бармин, Валов, 2020; Dobryakova, Sulkarnaeva, 2021]. Геометрическая форма и размер ячейки определяются согласно поставленной цели в проводимом исследовании, т. е. выбором зависимостей между соседними участками. Для создания геоэкологических пространственных моделей окружающей среды чаще всего используют прямоугольные или шестиугольные решетки. Необходимость использования регулярной сетки, представляющей собой равносторонние геометрические фигуры, создающие мозаичное покрытие без пробелов на территории по типу равномерной сетки, обусловлено двумя причинами: во-первых, созданием упорядоченности географических объектов, во-вторых, уменьшением неоднородности в пределах географических границ районов, областей и пр.

Цель исследования – провести сравнительный анализ разработанных геоинформационных методов оценки комфортности пространственной структуры городского ландшафта, выявить преимущества и/или недостатки представленных подходов и определить варианты предложений по улучшению экологической обстановки.

Материалы и методы

Использование регулярной сетки дает возможность проведения подробного ГИС-анализа. Оптимальной геометрической фигурой для проведения такой оценки является шестиугольник – гексагон [Birch, Oom, Beecham, 2007; Beecham, Farnsworth, 1998; Her, 1995; Sheridan, Hintz, Alexander, 2000], который по своим свойствам приближен к окружности и позволяет о каждой

точке на плоскости внутри этой фигуры получить естественный ряд данных и лучше выделить определенные закономерности между соседними участками в сетке и их группами, чем при использовании островершинных многоугольников (квадраты, треугольники и др.). В связи с этим нами была использована шестиугольная сетка для проведения оценки комфортности городской среды и выполнено сравнение с индексными значениями, отражающими потенциал развития комфортности городской среды (City Development Potential Index, CDPI). Представленный индекс был впервые разработан и апробирован для городов Волгоград и Оренбург [Дубровская, Ряхов, Павлейчик, 2022]. В целом произведена оценка потенциала развития комфортности и оптимизации городского ландшафта на основе представленного геоинформационного индекса CDPI девяти городов Российской Федерации.

Для расчета индекса CDPI необходима комплексная информация по распределению функциональных зон и ландшафтных структур. В разработанной формуле используется показатель общей площади техногеосистем исследуемой территории, состоящий из суммы площадей отдельных функциональных зон:

$$S_{gts} = S_{ra} + S_{pb} + S_{ind} + S_{tr} + S_{sp} + S_{pd}, \quad (1)$$

где S_{gts} – площадь техногеосистем; S_{ra} – селитебных зон; S_{pb} – общественно-деловой застройки; S_{ind} – зон промышленного назначения; S_{tr} – транспортной инфраструктуры; S_{sp} – земель специального назначения; S_{pd} – зон потенциальной застройки, в том числе территорий, включенных в программу реновации.

Геоинформационный индекс потенциала развития комфортности городской среды рассчитывается по следующей формуле:

$$CDPI = \frac{S_{ls} - S_{gts} - S_g}{S_{ls}} - \frac{S_{gts} - S_g}{S_{ls} \cdot \left(1 + \frac{S_{gts} + S_g}{S_{ls}}\right)}, \quad (2)$$

где S_g – площадь зеленых зон общего пользования и естественные лесные массивы; S_{ls} – площадь единицы ландшафтной структуры.

Следующий этап – проведение расчета нормализованного разностного индекса застройки (Normalized difference built-up index, NDBI) [Zha, Gao, Ni, 2003; Mapping ... , 2022; Alia, Hasim, Abidin, 2019]:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}, \quad (3)$$

где $SWIR$ – Short Wavelength Infrared, коротковолновый инфракрасный диапазон спутников серии Landsat (1,560–1,660 мкм); NIR – Near Infrared, ближний инфракрасный диапазон спутников серии Landsat (0,845–0,885 мкм).

Этот индекс широко применяется для градостроительной оценки урбанизированных территорий. Он позволяет дифференцировать застроенную территорию от окружающих геосистем. Одной из особенностей показателя является его реакция на озелененность городских районов (зеленые насаждения вызывают проседание значений индекса).

Для оценки зеленых зон городских территорий традиционно применяют нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [A commentary ... , 2021; Pettorelli, 2015; Zhao, Qu, 2024]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (4)$$

где *RED* – красный диапазон спутников серии Landsat (0,630–0,680 мкм).

Основой для расчета индексов *NDVI* и *NDBI* является мультиспектральное изображение со спутника Landsat-9 от 31 мая 2024 г. второго уровня обработки (Level-2).

Далее было применено совмещение индексов *NDVI* и *NDBI*. Для удобства использования разработанной формулы (*CDPI 2*) принят обратный индекс застройки (*-NDBI*), исключая отрицательные значения (*NDVI + 1*, *-NDBI + 1*). Это позволит равномерно распределить по шкале показатели и провести сравнительный анализ с результатами расчета индекса *CDPI*.

Для оценки комфортности городской среды важен морфометрический параметр городской территории. Высота и экспозиция расположения населенного пункта хоть и оказывают влияние на деятельность человека, но в равнинных степных геосистемах носят незначительный характер. Важной характеристикой является расчлененность рельефа, в частности, угол уклона поверхности. Данный параметр напрямую влияет как на удобство размещения хозяйственных и селитебных зон, так и на удобство использования рекреационных. Для этого по данным о высоте поверхностного уровня Земли (SRTM 1 Arc-Second Global) проведен расчет и собраны средние значения уклона поверхности в пределах гексагональной решетки.

С учетом вышеперечисленных параметров разработанная модификация индекса *CDPI* апробирована на примере г. Оренбурга. Внесенные изменения основываются на расчетах индексных значений, полученных по результатам дешифрирования оперативных данных со спутников серии Landsat, и рассчитываются по формуле:

$$CDPI\ 2 = \frac{(-NDBI + 1) \cdot (NDVI + 1)}{Slope}, \quad (5)$$

где *CDPI 2* – уточненный геоинформационный индекс потенциала развития комфортности городской среды; *NDBI* – средние значения нормализованного разностного индекса застройки на единицу площади; *NDVI* – средние значения нормализованного разностного вегетационного индекса на единицу площади; *Slope* – средние значения уклона поверхности на единицу площади.

При расчете индекса *CDPI 2* числовые показатели в пределах гексагона положительные – чем выше значение, тем выше потенциал развития зеленой инфраструктуры и ниже антропогенная нагрузка. И наоборот, чем ниже количественный показатель, тем выше техногенная составляющая, следовательно, ниже уровень перспективности развития рекреационных зон. Шкала индексных значений на данном этапе исследований соответствует получен-

ным количественным показателям для г. Оренбурга. Для определения градации по представленному модифицированному геоинформационному индексу *CDPI 2* необходим комплекс исследований на других урбанизированных территориях.

При использовании гексагональной сетки по оценке этого же показателя была выбрана площадь гексагона, охватывающая небольшой ландшафтный участок, исключая попадания в площадь шестигранников из других различных по функциональному и ландшафтному типу территорий. В данном случае сторона геометрической фигуры составила 0,6204 км, площадь – 1 км².

Результаты и обсуждение

Построены картосхемы (рис.), отражающие дифференциацию природно-антропогенных компонентов г. Оренбурга по регулярной гексагональной решетке полигонов.

Расчет геоинформационного индекса *CDPI* в пределах выделенных ландшафтных единиц на территорию г. Оренбурга показал обобщенные результаты, отражающие потенциал развития комфортности городской среды для возможностей озеленения. Гексагональная решетка имеет равные показатели площади для всех полигонов, что сказывается на количественных данных расчета индекса. Гексагоны, расположенные на участках с высокой плотностью антропогенных ландшафтов, резко выделяются минимальными значениями индекса. Аналогичный процесс происходит с территориями, где плотность техногенной составляющей минимальна. Таким образом, территория г. Оренбурга дифференцируется на два крупных кластера, расположенных по разным сторонам гистограммы распределения статистических значений, с минимальной буферной зоной в местах их соприкосновения (рис., *а*).

При помощи нормализованного разностного индекса застройки (*NDBI*) территория делится на застроенные и незастроенные участки. Индексные значения находятся в диапазоне от -1 до $+1$, где отрицательные данные – это не занятые искусственными сооружениями ландшафты, положительные – высокая плотность застроенности. На северо-востоке города прослеживается четкая дифференциация, связанная с ведением агрохозяйственной деятельности, и значения индекса *NDBI* принимают положительные значения, так как он не отделяет открытую почву, в данном случае распаханную от застроенных (рис., *б*). По этой причине в разработанном индексе применялись обратные значения индекса *NDBI*, которые позволили оценить степень озелененности территории и вычленили городские сооружения.

Значения *NDVI* варьируют в пределах от -1 до 1 и используются нами для оценки состояния растительного покрова городской территории. Отрицательные значения соответствуют искусственным покрытиям (стекло, бетон, асфальт, водные поверхности). Показатели от $0,1-0,25$ относят к открытой почве, $0,25-0,35$ – угнетенное состояние растительности (составляет 282 км²), выше $0,35$ – средняя степень развития растительности, удовлетворительное состояние (2 км²) (рис., *в*). Чем выше значение вегетационного индекса, тем эффективнее проведение мероприятий по улучшению качества

городской среды. Показатель уклона поверхности отражает необходимость в дополнительных затратах ресурсов для повышения качества жизни в городе при высоких значениях.

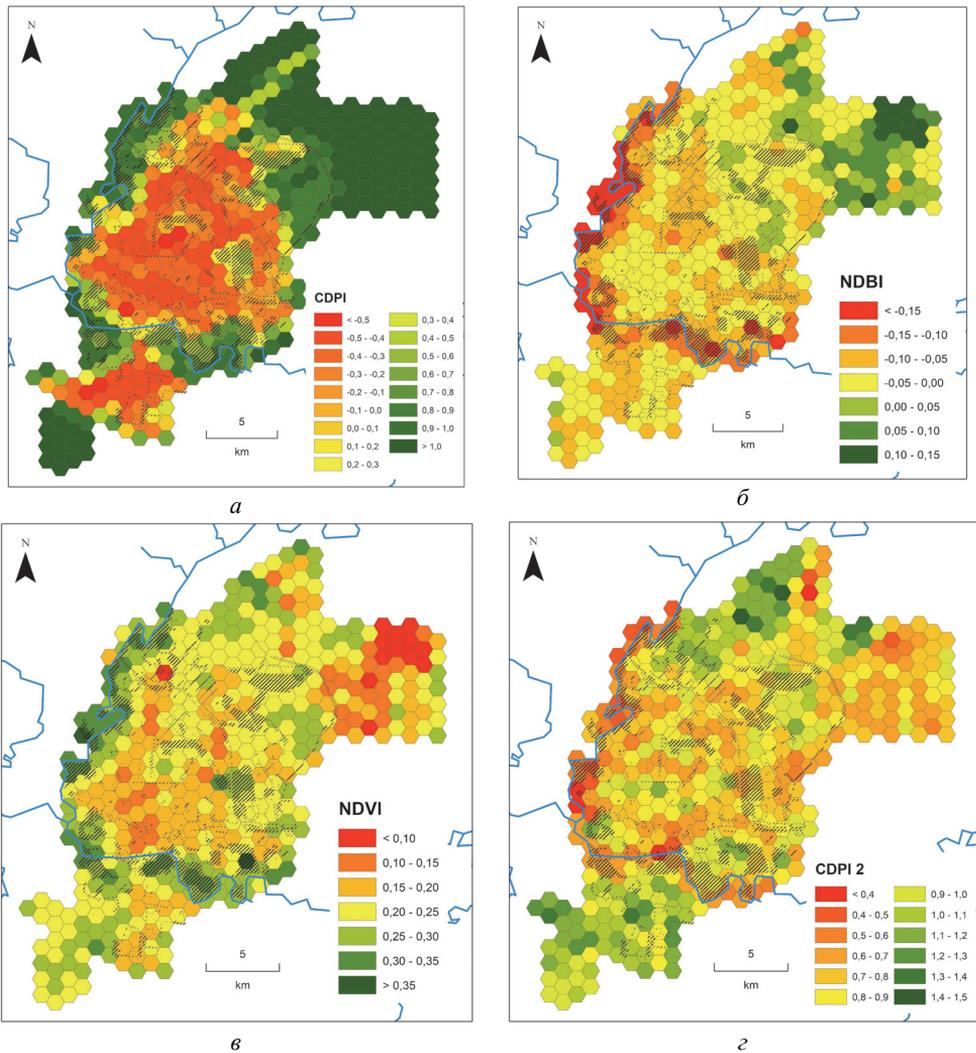


Рис. Картограммы результатов геоинформационного анализа территории г. Оренбурга по ячейкам гексагональной решетки: *а* – расчет средних значений геоинформационного индекса CDPI на основе генерального плана г. Оренбурга (см. формулы (1), (2)); *б* – средние значения нормализованного разностного индекса застройки (NDBI) (см. формулу (3)); *в* – средние значения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) (см. формулу (4)); *д* – средние значения, рассчитанные по уточненному геоинформационному индексу – CDPI 2 (см. формулу (5)). Штриховкой на картограммах указано расположение зеленых зон г. Оренбурга

Шкала значений при расчёте геоинформационного индекса CDPI 2 для г. Оренбурга варьирует от менее 0,4 до 1,5 (рис. 1, з). Городская территория на северо-западе, относящаяся к приводораздельным склонам Урало-Сакмарского междуречья и пойменному участку р. Сакмары [Дубровская, Ряхов, 2020], соответствует индексным значениям 1,1–1,5. Эти значения схожи с данными геоинформационного индекса CDPI (рис., а). Указанные территории дифференцируются как потенциально благоприятные для развития зеленой составляющей. Восточную часть водораздельного пространства со слабопологими приводораздельными склонами занимают сельскохозяйственные угодья и садово-дачные массивы, которые являются территориями с перспективным развитием зеленых зон при расчете индекса CDPI. Но в случае расчета индекса NDBI на этот участок получены положительные значения, которые обусловлены высокой сельскохозяйственной нагрузкой, что связано с наличием открытой почвы, и индексные значения CDPI 2 от 0,9 до 0,4 и менее. Такие низкие количественные показатели свидетельствуют о наличии высокой степени антропогенной нагрузки и отсутствии в перспективе рекреационной составляющей.

Показатели индекса CDPI для участка аккумулятивно-денудационного типа рельефа, представленного двумя обрывистыми склонами – городская набережная р. Урал и уклон более 7° на левом берегу р. Сакмары, положительные (до 0,74), позволяющие дифференцировать это городское пространство как подходящее для улучшения состояния зеленых зон. Средние значения по уточненному индексу CDPI 2 составили от 0,4 до 0,5 ед., что соответствует низкому уровню перспективности развития рекреационной инфраструктуры. Причиной расчетной разницы служит учет в новой формуле дополнительных индексных данных NDVI и NDBI, которые на рассматриваемых участках имеют высокую плотность застройки и угнетенное состояние растительности.

Аккумулятивный тип рельефа (пойменный комплекс рек Урал и Сакмары и их надпойменные террасы) относится к неперспективным территориям развития зеленых зон. Расчет индекса CDPI 2 показал невысокие значения (от 0,8 до менее 0,4). Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, присутствует многолетний древесно-кустарниковый покров, требующий санации. Во-вторых, участки низкой поймы периодически затапливаются в весенний период и несмотря на это ведется застройка территории коттеджными поселками вместо садово-дачных участков. В-третьих, надпойменные террасы относятся к старо освоенному городскому пространству с устоявшимся функциональным зонированием. Индекс CDPI 2 имеет высокие показатели в южной части города, его значение составляет от 0,9 до 1,3 ед. (территории высокой поймы р. Урал, первая и вторая надпойменные террасы р. Урал). Индексные показатели CDPI отрицательные (от $-0,2$ до $-0,5$) на участке высокой поймы и первой надпойменной террасы. Причинами различий являются корректировка на общее состояние растительного покрова (0,25–0,35) и плотность застройки (от 0 до $-1,0$). Здесь учитывается весь аспект зеленых насаждений и минимум расположенных искусственных сооружений.

Центральная часть города (южный приуральский и северный присакмарский приводороздельный склоны Урало-Сакмарского междуречья, вторая надпойменная терраса правого берега р. Урал) максимально нагружена разными функциональными зонами хозяйственного назначения. Оба индекса фиксируют высокую техногенную нагрузку и низкую степень перспективности формирования зеленой зоны. Полученные геоинформационные показатели, рассчитанные для территории г. Оренбурга, можно ранжировать по потенциалу развития комфортности: 1,5–1,1 – максимальный уровень развития зеленой инфраструктуры; 1,1–0,7 – оптимальный уровень развития зеленой инфраструктуры; 0,7 – менее 0,4 – низкий уровень развития зеленой инфраструктуры.

Выводы

Уточненный геоинформационный индекс потенциала развития комфортности городской среды учитывает зеленую инфраструктуру и состояние растительного покрова, а также оценивает существующий городской ландшафт как территорию, перспективную для развития или расширения рекреационной составляющей. Особое внимание следует уделять участкам, индексные значения которых соответствуют оптимальному уровню развития, так как к ним относятся слабо озелененные районы с высокой плотностью застройки. Результаты, рассчитанные по уточненному индексу в сравнении с данными CDPI, показывают более высокую дифференциацию распределения зеленых насаждений и учитывают площадь выделенных ландшафтных единиц. Морфометрические параметры оказывают существенное влияние на неоднородность многокомпонентной городской структуры. Влияние площадного фактора минимизировано единым размером полигонов гексагональной решетки. Оперативные и объективные свойства мультиспектральных данных позволяют на постоянной основе вносить коррективы в генеральные планы городов, как документов, носящих формальный характер исполнения, что ведет к получению необъективного результата в градостроительных мероприятиях.

Основные результаты применения индекса CDPI 2 следующие:

1. Использование гексагональной решетки позволяет провести сравнение отдельных участков городской территории без учета влияния площадного фактора при расчетах.
2. Для расчета выбираются объективные геоинформационные данные.
3. Расчетное время полностью базируется на автоматизированном процессе.
4. Применение результатов расчета включает не только возможный потенциал размещения зеленой инфраструктуры, но и коррекцию размещения селитебных зон.

Полученная на основе рассчитанного индекса CDPI 2 картографическая модель для г. Оренбурга представляет возможность определения оптимальных вариантов создания новых рекреационных зон на участках, которые должны быть заранее выделены на этапе проектирования как элемент обязательного благоустройства селитебной территории для повышения микроклиматического комфорта. К сожалению, эти территории отсутствуют в новых плотно застроенных жилых микрорайонах города. После окончания

строительно-монтажных работ на небольших участках вокруг зданий проводится только минимальный комплекс обязательных работ – посев газона и посадка зеленых насаждений. Другим вариантом для создания зеленого пространства в условиях плотной застройки может быть размещение передвижных садов – контейнерное озеленение. Для этого используется посадочный материал деревьев, кустарников и цветников с учетом климатических условий (засухоустойчивость, зимостойкость). В исторической части г. Оренбурга следует провести реконструкцию старого жилого фонда, при этом сохранив территории историко-культурного и садово-паркового назначения, включая естественный пойменный участок леса в долинах рек Урал и Сакмары, выполняющий функцию природно-экологического каркаса всей урбанизированной территории.

Список литературы

- Ахметов Р. Ш., Ахметова Н. И.* Геоинформационный анализ воздействия гидрографической сети на сельское расселение Оренбургской области // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2016. № 2. С. 91–96.
- Данилов И. А.* Гексагональная сетка как современный драйвер ментального освоения пространственной среды // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2019. Т. 2. С. 93–98.
- Дубровская С. А., Ряхов Р. В.* Применение метода искусственных нейронных сетей при картографировании урбанизированной территории степной зоны // География и природные ресурсы. 2020. № 2 (161). С. 161–167. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2\(161-167\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(161-167))
- Дубровская С. А., Ряхов Р. В., Павлейчик В. М.* Оценка потенциала развития комфортности урбанизированных геосистем Волгограда и Оренбурга // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 42. С. 29–40. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.42.29>
- Дугарова Г. Б., Богданов В. Н.* Особенности пространственной трансформации городских агломераций (на примере Иркутска и Улан-Батора) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 40. С. 14–26. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.14>
- Занозин В. В., Бармин А. Н., Валов М. В.* ГИС-анализ ландшафтной структуры и антропогенной преобразованности дельты Волги. Астрахань : Издат. Сорокин Р. В., 2020. 200 с.
- Крамаров С. О., Митясова О. Ю.* Отслеживание изменений топологии объектов добычи полезных ископаемых на прямоугольных и гексагональных решетках // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5, № 2. С. 154–161. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-154-161>
- A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing / S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy [et al.] // Journal of Forestry Research. 2021. Vol. 32. P. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Alia M. I., Hasim A. H., Abidinb M. R.* Monitoring the Built-up Area Transformation Using Urban Index and Normalized Difference Built-up Index Analysis // International Journal of Engineering. 2019. Vol. 32, N 5. P. 647–653. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.05b.04>
- Beecham J. A., Farnsworth K. D.* Animal foraging from an individual perspective: an object orientated model // Ecological Modelling. 1998. Vol. 113, Iss. 1–3. P. 141–156. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00139-2)
- Birch C. P. D., Oom S. P., Beecham J. A.* Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment, and simulation in ecology // Ecological Modelling. August 2007. Vol. 206, N 3–4. P. 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041>
- Carr D. B., Olsen A. R., White D.* Hexagon Mosaic Maps for Display of Univariate and Bivariate Geographical Data // Cartography and Geographic Information Systems. 1992. Vol. 19, N 4. P. 228–236. <https://doi.org/10.1559/152304092783721231>
- Dobryakova V. A., Sulkarnaeva L. D.* Modelling of ecosystem services “cooling effect” supply in the city of Tyumen // InterCarto InterGIS. 2021. Vol. 27, N 3. P. 196–209. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-196-209>
- Gehl J.* Cities for people. Island Press Publ., 2010. 283 p.

- Her I. Geometric transformations on the hexagonal grid // IEEE Transactions on Image Processing. 1995. Vol. 4, N 9. P. 1213-1222. <https://doi.org/10.1109/83.413166>
- Mapping build-up area density using normalized difference built-up index (ndbi) and urban index (ui) wetland in the city banjarmasin / M. Muhaimin, D. Fitriani, S. Adyatma, D. Arisanty // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 4th IGEOS: International Geography Seminar. 2022. Vol. 1089. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1089/1/012036>
- Piniarski W. Challenges of a GIS-based physical-geographical regionalization of Poland // Environ Monit Assess. 2023. Vol. 195. P. 1125. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11734-4>
- Pettorelli N. The Normalized Difference Vegetation Index. Oxford University Press, 2015. 206 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- Sheridan P., Hintz T., Alexander D. Pseudo-invariant image transformations on a hexagonal lattice // Image and Vision Computing. 2000. Vol. 18, Iss. 11. P. 907-917. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(00\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(00)00036-6)
- Yermolaev O. P., Selivanov R. N. The use of automated geomorphological clustering for purposes of urban planning (the example of the city of Kazan) // World Applied Sciences Journal. 2014. Vol. 11, N 30. P. 1648-1655. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.11.14229>
- Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 24, N 3. P. 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- Zhao Q., Qu Y. The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote-Sensing Observations // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, N 7. P. 1212. <https://doi.org/10.3390/rs16071212>

References

- Akhmetov R.Sh., Akhmetova N.I. Geoinformatsionnyi analiz vozdeistviya gidrograficheskoi seti na sel'skoe rasselenie Orenburgskoi oblasti [Geoinformation analysis of the impact of the hydrographic network on rural settlement in the Orenburg region]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya i geoekologiya* [Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology], 2016, no. 2, pp. 91-96. (in Russian)
- Danilov I.A. Geksagonalnaya setka kak sovremennyy draiver mental'nogo osvoeniya prostranstvennoi sredy [Hexagonal grid as a modern driver of mental development of spatial environment]. *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii FAD TOGU*. [New ideas of the new century: materials of the international scientific conference of the FAD TNU], 2019, vol. 2, pp. 93-98. (in Russian)
- Dubrovskaya S.A., Ryakhov R.V. Primenenie metoda iskusstvennykh neironnykh setei pri kartografirovani urbanizirovannoi territorii stepnoi zony [Application of the artificial neural network method in mapping the urbanized territory of the steppe zone]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2020, no. 2 (161), pp. 161-167. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2\(161-167\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-2(161-167)) (in Russian)
- Dubrovskaya S.A., Ryakhov R.V., Pavleichik V.M. Otsenka potentsiala razvitiya komfortnosti urbanizirovannykh geosistem Volgograda i Orenburga [Assessment of the development potential of comfort of urbanized geosystems of Volgograd and Orenburg]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2022, vol. 42, pp. 29-40. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.42.29> (in Russian)
- Dugarova G.B., Bogdanov V.N. Osobennosti prostranstvennoi transformatsii gorodskikh aglomeratsii (na primere Irkutskaya i Ulan-Batora) [Features of spatial transformation of urban agglomerations (on the example of Irkutsk and Ulaanbaatar)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2022, vol. 40, pp. 14-26. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.14> (in Russian)
- Zanozin V.V., Barmin A.N., Valov M.V. GIS-analiz landshaftnoi struktury i antropogennoi preobrazovannosti del'ty Volgi [GIS analysis of landscape structure and anthropogenic transformation of the Volga Delta]. Astrakhan, Sorokin R.V. Publ., 2020, 200 p. (in Russian)
- Kramarov S.O., Mityasova O.Yu. Otslezhivanie izmenenii topologii ob"ektov dobychi poleznykh iskopaemykh na pryamougolnykh i geksagonalnykh reshetkakh [Tracking Topology Changes in Mining Objects on Rectangular and Hexagonal Grids]. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining Science and Technology (Russia)], 2020, vol. 5, no. 2, pp. 154-161. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-154-161> (in Russian)

Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 2021, vol. 32, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

Alia M.I., Hasim A.H., Abidinb M.R. Monitoring the Built-up Area Transformation Using Urban Index and Normalized Difference Built-up Index Analysis. *International Journal of Engineering*, 2019, vol. 32, no 5, pp. 647-653. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.05b.04>

Beecham J.A., Farnsworth K.D. Animal foraging from an individual perspective: an object orientated model. *Ecological Modelling*, 1998, vol. 113, iss. 1-3, pp. 141-156. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00139-2)

Birch C.P.D., Oom S.P., Beecham J.A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment, and simulation in ecology, *Ecological Modelling*, 2007, vol. 206, no 3-4, pp. 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041>

Carr D.B., Olsen A.R., White D. Hexagon Mosaic Maps for Display of Univariate and Bivariate Geographical Data. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1992, vol. 19, no. 4, pp. 228-236. <https://doi.org/10.1559/152304092783721231>

Dobryakova V.A., Sulkarnaeva L.D. Modelling of ecosystem services “cooling effect” supply in the city of Tyumen. *InterCarto InterGIS*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 196-209. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-196-209>

Gehl J. Cities for people. *Island Press Publ.*, 2010, 283 p.

Her I. Geometric transformations on the hexagonal grid. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, vol. 4, no. 9, pp. 1213-1222. <https://doi.org/10.1109/83.413166>

Muhaimin M., Fitriani D., Adyatma S., Arisanty D. Mapping built-up area density using normalized difference built-up index (ndbi) and urban index (ui) wetland in the city Banjarmasin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4th IGEOS: International Geography Seminar, 2020, vol. 1089, 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1089/1/012036>

Piniarski W. Challenges of a GIS-based physical-geographical regionalization of Poland. *Environ Monit Assess*, 2023, vol. 195, 1125. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11734-4>

Pettorelli N. *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press Publ., 2015, 206 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>

Sheridan P., Hintz T., Alexander D. Pseudo-invariant image transformations on a hexagonal lattice. *Image and Vision Computing*, 2000, vol. 18, iss. 11, pp. 907-917. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(00\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(00)00036-6)

Yermolaev O.P., Selivanov R.N. The use of automated geomorphological clustering for purposes of urban planning (the example of the city of Kazan). *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 11, no. 30, pp. 1648-1655. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.11.14229>

Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003, vol. 24, no 3, pp. 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>

Zhao Q., Qu Y. The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote-Sensing Observations. *Remote Sensing*. 2024, vol. 16, no 7, 1212. <https://doi.org/10.3390/rs16071212>

Сведения об авторе

Дубровская Светлана Александровна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Институт степи УрО РАН
Россия, 460000, г. Оренбург,
ул. Пионерская, 11
e-mail: skaverina@bk.ru

Information about the author

Dubrovskaya Svetlana Aleksandrovna
Candidate of Sciences (Geography)
Senior Research Scientist
Institute of Steppe UB RAS
11, Pionerskaya st., Orenburg, 460000
Russian Federation
e-mail: skaverina@bk.ru

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 06.02.2026; принята к публикации 13.03.2026

The article was submitted September, 24, 2025; approved after reviewing February, 06, 2026; accepted for publication March, 13, 2026