

УДК: 912.4

Т. Б. Акынжанов<sup>1</sup>

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-3-31-258-272

## ОКРАИНЫ ГОРОДОВ-МИЛЛИОННИКОВ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН: МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ

### АННОТАЦИЯ

В условиях ускоренной урбанизации крупных городов Казахстана, таких как Астана, Алматы и Шымкент, особенно остро встает вопрос пространственного анализа городских окраин. Эти территории характеризуются высокой степенью социально-экологической неоднородности, неустойчивым землепользованием и недостаточной обеспеченностью инфраструктурой. В настоящей статье предложена методика выделения городской окраины, основанная на интеграции геоинформационного анализа и ландшафтных индексов. В качестве внешней границы окраины рассматривается совмещение административной границы и границы «реального города», полученной на основе данных ночной освещенности (VIIRS) и застроенной поверхности (GHS-BUILT). Для выявления внутренней границы применен индекс разнообразия Шеннона, рассчитанный по данным о земном покрове GlobeLand30 с использованием скользящего окна 960 м. Вся территория была агрегирована в регулярную гексагональную сетку с элементами площадью около 1 км<sup>2</sup>, что позволило провести детальный пространственный анализ мозаичности землепользования. Результаты исследования показали четкое разделение на три типа территорий: центральную часть города, городскую окраину и субцентры на окраине. Городские окраины занимают более 80 % площади исследуемых городов, что подчеркивает их значимость для градостроительного планирования. Методика демонстрирует универсальность и применимость как для равнинных, так и для горных территорий, обеспечивая высокую точность и воспроизводимость результатов. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации инфраструктуры, управления землепользованием и разработки стратегий устойчивого развития городских территорий. Дальнейшие исследования будут направлены на углубленный анализ социально-экономических и экологических аспектов окраинных зон, а также на адаптацию методики для других городов с учетом их специфики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городская окраина, урбанизация, пространственный анализ, индекс Шеннона, дистанционное зондирование

Tolegen B. Akynzhanov<sup>2</sup>

## URBAN FRINGES OF MILLION-PLUS CITIES IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN: A METHODOLOGY FOR DELINEATION

### ABSTRACT

In the context of rapid urbanization in major cities of Kazakhstan — such as Astana, Almaty, and Shymkent — the need for spatial analysis of the urban fringe has become increasingly pressing. These areas are characterized by pronounced socio-environmental heterogeneity,

---

<sup>1</sup> Казахстанский филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, кафедра экологии и природопользования, ул. Кажымукана, д. 11, Астана, Республика Казахстан, 010000, *e-mail*: [akynzhanovtb@my.msu.ru](mailto:akynzhanovtb@my.msu.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Kazakhstan Branch, Department of Ecology and Environmental Management, 11, Kazhymukana str., Astana, 010000, Kazakhstan, *e-mail*: [akynzhanovtb@my.msu.ru](mailto:akynzhanovtb@my.msu.ru)

unstable land use patterns, and insufficient infrastructure provision. This study proposes a methodological framework for delineating the urban fringe based on the integration of geoinformation analysis and landscape metrics. The outer boundary of the fringe is defined as the intersection of the administrative boundary and the “real city” boundary, derived from nighttime light data (VIIRS) and built-up surface data (GHS-BUILT). To identify the inner boundary, the Shannon Diversity Index was calculated using GlobeLand30 land cover data within a 960 m moving window. The entire study area was aggregated into a regular hexagonal grid with cells of approximately 1 km<sup>2</sup>, enabling detailed spatial analysis of land use mosaic patterns. The results revealed a clear division into three territorial types: the city core, the urban fringe, and peripheral subcenters. Urban fringes occupy more than 80 % of the total area of cities studied, highlighting their significance for urban planning. The proposed methodology demonstrates both universality and applicability across flat and mountainous terrains, ensuring high accuracy and reproducibility of results. The findings can inform infrastructure optimization, land use management, and the development of sustainable urban development strategies. Future research will focus on a more in-depth analysis of the socio-economic and environmental characteristics of fringe areas, as well as on adapting the methodology to other cities with consideration of their specific contexts.

**KEYWORDS:** urban fringe, urbanization, spatial analysis, Shannon index, remote sensing

## **ВВЕДЕНИЕ**

Города все время увеличиваются в своих размерах. Эта динамика представляет собой актуальное явление и для городов Казахстана, причем наблюдаемые тенденции роста обусловлены различными факторами. Так, Астана расширяется за счет приобретения статуса столицы, Шымкент — в результате естественного прироста, а Алматы — благодаря миграционному приросту. На фоне этого процесса города постоянно занимают новые территории, интегрируя их в свою структуру, поэтому окраины городов подвергаются постоянным изменениям и расширению, что приводит к возникновению разнообразных социальных и экологических проблем.

В научной литературе широко представлены исследования, посвященные городам, пригородным территориям, а также структуре городских агломераций. В данной статье особое внимание уделяется специфическому объекту исследования — окраинам. Этот тип территории характеризуется сложным комплексом социально-экологических проблем, которые требуют тщательного анализа. Для оценки этих проблем и разработки возможных путей их решения необходимо прежде всего определить окраину как самостоятельный объект экономико-географического исследования. Настоящая работа направлена на создание методологического подхода к идентификации окраинных зон городов и изучению особенностей их пространственной организации на примере крупнейших городов Казахстана.

Анализ процессов трансформации окраинных территорий играет ключевую роль при определении стратегических направлений развития современных агломераций, т. к. такие территории обычно имеют более сложную структуру, чем центр города.

Отсутствие стратегических приоритетов в развитии может привести к формированию чрезмерной нагрузки на мощности жилищно-коммунальной инфраструктуры, а также спровоцировать возникновение на городской окраине как экологически неблагоприятных зон (в результате выноса инфраструктуры управления отходами), так и социально-экономической маргинализации.

На окраине города наблюдается менее интенсивное использование земельных ресурсов, что представляет собой дополнительную проблему. Эта проблема тесно связана с эволюцией плотной застройки, поскольку на окраине доступно большое количество

относительно недорогих земельных участков, что может привести к нерациональному использованию этих ресурсов. Окраинные зоны городов часто характеризуются преобладанием частного жилого сектора, создающего районы с низкой плотностью заселения. Подобные жилые массивы обычно сталкиваются с проблемой недостаточного развития коммунальных сетей, в особенности систем водоотведения, что в значительной мере увеличивает расходы города на поддержание этих окраин. Помимо этого, в такие районы очень сложно проложить маршруты общественного транспорта (из-за низкой плотности населения), а это приводит к необходимости наличия автомобиля, что негативно скажется на городе.

Окраина города является передовой территорией в процессе «расширения городов» (особенно бурно развивающихся), т. е. наблюдаются быстрые изменения в землепользовании, которые часто сопровождаются конфликтами землепользования [Martin, 1975; Feng, 2004]. Так, например, расширение городских границ за счет возведения жилых комплексов на окраинах приводит к сокращению площадей, отведенных под сельхозугодья и места отдыха.

Разрастание города отрицательно сказывается и на транспортной системе города, потому что возникает зависимость от автомобиля, т. к. увеличивается расстояние и время в пути до центра, что приводит к увеличению количества автомобилей и, как следствие, к пробкам на дорогах. Именно поэтому транспортная система может пострадать в значительной мере, если город будет продолжать расширяться без должного планирования [Günay, 2007].

Методологические сложности изучения окраинных территорий обусловлены отсутствием единого теоретического подхода и разногласиями в научном сообществе. Наибольшие дискуссии вызывает вопрос демаркации границ переходной зоны между городом и сельской местностью. Окраина и границы представляют собой самостоятельные объекты экономико-географического исследования. Граница, в ее классическом понимании, выступает как элемент, который, с одной стороны, разделяет две территории, а с другой — соединяет их. Однако в данном исследовании речь идет не о традиционных границах между крупными территориями, а о подвижной внутригородской границе, формирующей структуру городской ткани. Такая граница отличается неопределенностью и динамичностью, не обладая функцией явного разделения или соединения, что придает ей особую значимость в контексте анализа городского пространства. Иными словами, граница в данном случае — лишь элемент городской окраины.

**Объект исследования** — граница окраинных районов трех городов-миллионников Республики Казахстан, **предмет** — разнообразие землепользования.

**Цель данного исследования** — разработка методики выделения границы окраинных районов городов-миллионников и ее адаптация для трех городов-миллионников Республики Казахстан. В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

- изучение критериев выделения окраинных районов в мировом опыте;
- определение внешней границы окраины;
- определение внутренней границы окраины.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Внешняя граница окраины городов

Один из подходов состоит в том, чтобы определить внешнюю границу городской окраины с учетом административной границы города, что согласуется с методикой, представленной в канадском исследовании [Martin, 1975]. На рис. 1 показаны административные границы городов-миллионников Республики Казахстан.

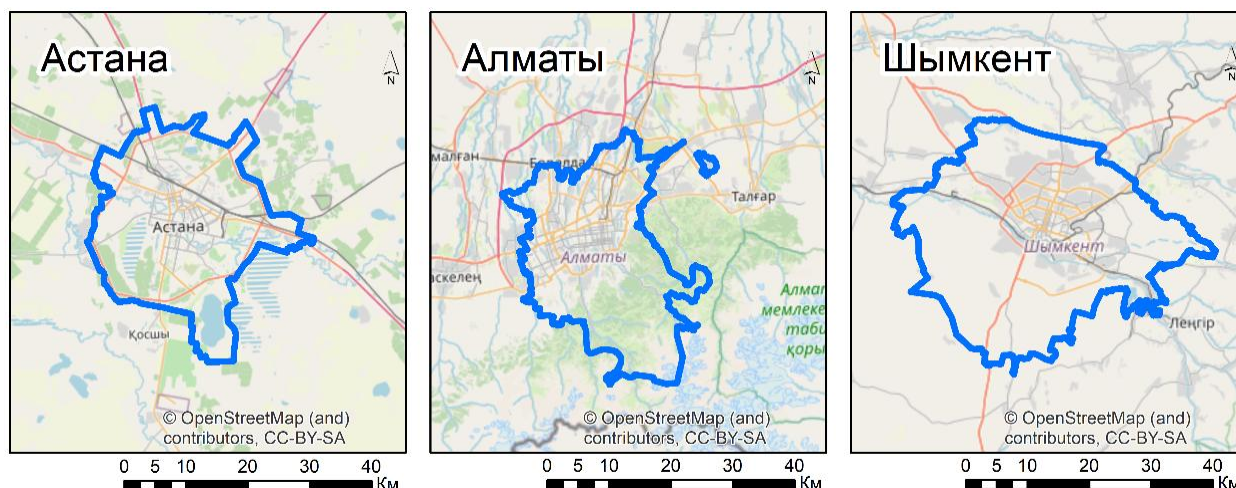


Рис. 1. Административные границы (синий цвет) городов-миллионников РК  
 Fig. 1. Administrative boundaries (blue) of Kazakhstan's million-plus cities

Другой подход заключается в том, что внешней границей городской окраины признается граница реального города, т.к. административные границы могут не соответствовать реальному городу. Для определения границ реального города можно использовать два подхода: данные ночной освещенности и информацию о застроенной территории. Для этого был использован ежегодный глобальный набор данных VIIRS [Yang, 2017; Elvidge, 2021] по ночной освещенности, что представляет собой временной ряд, составленный из ежемесячных средних сеток освещенности без облаков в период с 2013 по 2023 гг.

На начальном этапе фильтрации удаляются освещенные солнцем, луной и облачные пиксели, в результате чего получаются композиты. Композиты составляются с месячным шагом, а затем объединяются в годовые композиты. На последующих этапах используется двенадцатимесячная медиана, чтобы отбросить выбросы высокой и низкой светимости. Для удаления фоновой яркости используется метод, основанный на оценке разброса значений яркости в окрестности размером  $3 \times 3$  пикс. Если разброс значений внутри такого окна невелик, то это свидетельствует о равномерной и слабой яркости, характерной для однородного фона — таких как пустынные, сельскохозяйственные или морские районы без источников искусственного освещения. Подобные участки считаются неинформативными и обнуляются. Высокий разброс яркости, напротив, указывает на наличие реального освещения, например в городской застройке, где соседствуют участки с разной интенсивностью света; такие пиксели сохраняются в итоговом изображении. Критерии определения DR-порога адаптируются к степени облачного покрова: зоны с минимальной частотой ясных наблюдений требуют установки повышенных граничных значений.

В целях обеспечения универсальности методического подхода была построена прямоугольная сетка из регулярных гексагональных ячеек с захватом территории, превышающим фактические границы города, на основе спутниковых данных VIIRS. Значения освещенности агрегировались по каждой ячейке, после чего из анализа исключались ячейки, входящие в нижний дециль распределения (10 % с наименьшими значениями), что позволяет частично исключить шум от одиночных ярких объектов.

Загрузка ночных снимков проводилась при помощи Google Earth Engine [Zhao, 2021] (рис. 2). Результат загрузки осредненных ночных снимков за 2023 г. представлен на рис. 3.

```

Imports (3 entries)
  ▶ var Astana: Polygon, 4 vertices
  ▶ var Almaty: Polygon, 4 vertices
  ▶ var Shymkent: Polygon, 4 vertices

1 // Define the region of interest (ROI) as a geometry.
2 var roi = Shymkent;
3 var name_file = 'Shymkent'
4 var crs = 'EPSG:32642'
5
6 // Define the date range using a date picker or input fields.
7 var startDate = '2021-01-01';
8 var endDate = '2022-01-01';
9
10 // Filter the dataset by date range and region of interest.
11 var dataset = ee.ImageCollection('NOAA/VIIRS/DNB/ANNUAL_V21')
12   .filterDate(startDate, endDate)
13   .filterBounds(roi);
14
15 // Calculate the mean of the nighttime radiance.
16 var nighttime = dataset.select('average').first();
17
18 // Define visualization parameters.
19 var nighttimeVis = {min: 0.0, max: 60.0};
20
21 // Add the cropped image to the map.
22 Map.addLayer(nighttime, nighttimeVis, 'Cropped Image');
23
24 // Export the cropped image to Google Drive in TIFF format.
25 Export.image.toDrive({
26   image: nighttime,
27   description: name_file+'_nighttime_' + startDate + '_' + endDate + '_average',
28   folder: 'Nighttime', // Replace with your Google Drive folder name.
29   scale: 463, // Adjust the scale as needed.
30   fileFormat: 'TIFF',
31   region : roi,
32   crs : crs
33 });

```

Рис. 2. Фрагмент кода для загрузки снимков ночного освещения  
 Fig. 2. Code fragment for downloading nighttime light imagery

Застроенная поверхность — это общая поверхность, ограниченная периметром стен здания с пространственным обобщением, соответствующим спецификациям топографической карты м-ба 1:10 000, что также неофициально называется «площадью застройки»<sup>3</sup>.

Был использован пространственный растровый набор данных<sup>4</sup>, который отображает распределение застроенных поверхностей, выраженное в количестве м<sup>2</sup>. Данные содержат информацию об общей площади застройки и площади застройки, выделенной под преобладающие виды нежилого фонда (NRES). Данные пространственно-временной интерполяции или экстраполяции — с 1975 по 2030 гг. с интервалом в 5 лет. Застроенные территории для исследуемых городов представлены на рис. 4.

В данном исследовании излагается концепция внешней границы, которая представляет собой агрегацию административной границы городского участка с границей реального города, определенной на основе ночных снимков и данных о застройке.

<sup>3</sup> European Commission. GHSL Data Package 2023. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024. DOI: 10.2760/098587

<sup>4</sup> Dataset: *Pesaresi M., Politis P.* GHS-BUILT-S R2023A — GHS built-up surface grid, derived from Sentinel-2 composite and Landsat, multitemporal (1975–2030). European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2023

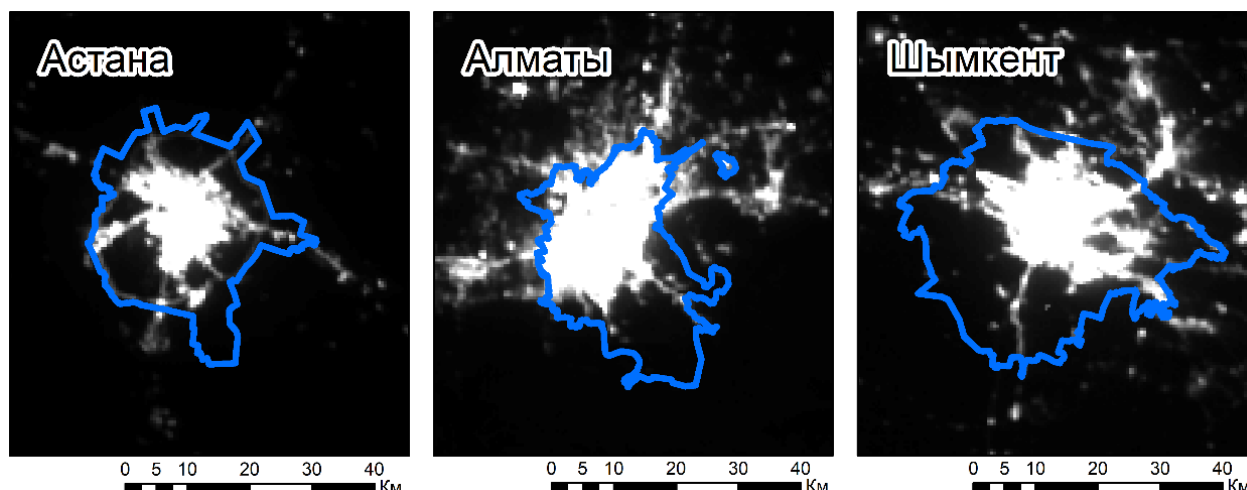


Рис. 3. Снимки ночной освещенности вместе с административными границами  
 Fig. 3. Nighttime light imagery combined with administrative boundaries

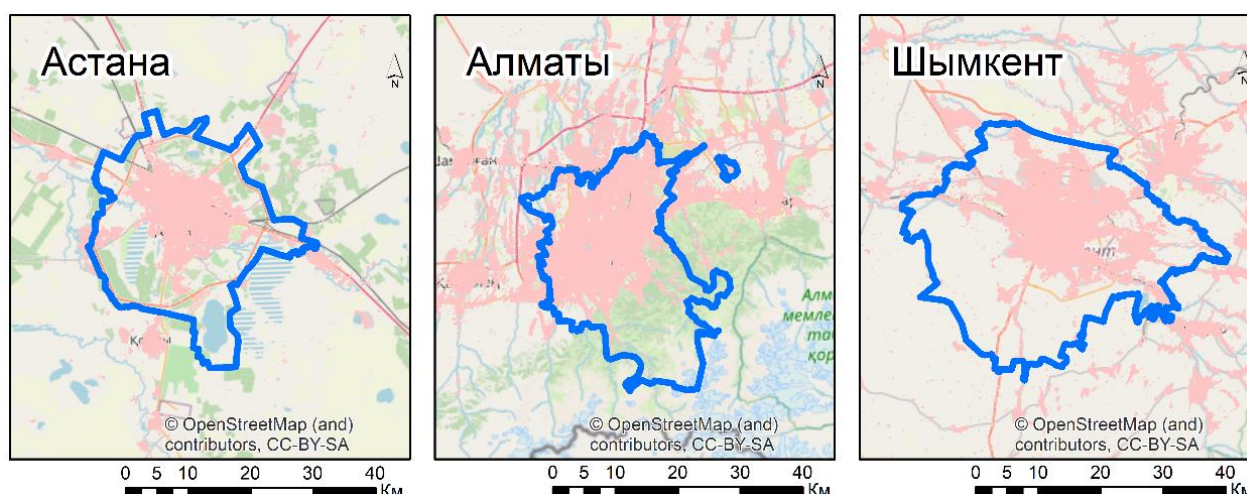


Рис. 4. Границы городов по застроенным территориям (розовый цвет)  
 в сравнении с административными границами (синий цвет)  
 Fig. 4. Urban boundaries based on built-up areas (pink)  
 compared to administrative boundaries (blue)

Использование VIIRS и GHS-BUILT в совокупности позволяет учитывать как фактическое использование территории (через застройку), так и функциональную активность (через освещенность), однако каждый из источников имеет свои ограничения.

В частности, спутниковые данные VIIRS могут переоценивать степень освоенности территории за счет высокой освещенности в незаселенных зонах — например, на промышленных площадках, в транспортной инфраструктуре или вблизи крупных объектов без постоянного населения. С другой стороны, данные GHS-BUILT, основанные на классификации застройки, могут не отражать текущее использование территорий (например, заброшенные или частично застроенные участки), а также не учитывать их функциональную активность в вечернее и ночное время.

### Внутренняя граница окраины городов

Городская окраина образует буферную зону между урбанизированными и сельскими пространствами. Для этих участков типично сложное переплетение различных форм хозяйственного использования земель, обусловленное экспансией городской застройки на окружающие аграрные ландшафты. В результате формируется гетерогенная структура, сочетающая элементы индустриально-жилой застройки (производственные объекты, жилые массивы, инфраструктурные сооружения) с сохранившимися сельхозугодьями (пашни, садовые насаждения и другие виды сельскохозяйственных территорий) [Huang et al., 2016].

Экотон — переходная область между двумя биомами или разными участками ландшафта, что представляет собой увеличение биоразнообразия, которое вызвано т. н. «краевым эффектом» из ландшафтной экологии, поскольку он обеспечивает большую пространственную и временную изменчивость ресурсов.

Индекс разнообразия Шеннона (SHDI) часто используется для оценки уровня биоразнообразия в определенном биоми [Ludwig, 1988]. Этот индекс, также известный как значение энтропии, является, пожалуй, наиболее широко используемым и надежным методом измерения степени разнообразия. Изучение городов при помощи дистанционного зондирования и географических информационных систем (ГИС) [Bhatta, 2009] позволили ввести его для измерения степени разнообразия земного покрова, отражаемой снимками дистанционного зондирования. Формула его расчета (1):

$$SHDI = - \sum_{i=1}^n P_i * \ln P_i \quad (1),$$

где  $SHDI$  — индекс разнообразия (значение энтропии),  
 $P_i$  — доля площади землепользования класса  $i$  от общей площади территории.

Представленный индекс осуществляет количественную оценку вариативности видов земного покрова, учитывая два ключевых параметра: видовое богатство (общее количество категорий земного покрова) и степень равномерности (пропорциональное соотношение площадей различных категорий).

Значение индекса SHDI демонстрирует положительную динамику в двух случаях: при возрастании количества категорий земного покрова и при отсутствии явно доминирующей категории, занимающей преобладающую площадь в анализируемом участке.

Другими словами, максимальный индекс Шеннона будет наблюдаться в территориях с большим количеством классов земного покрова, соизмеримых по площади друг с другом. Низкие значения индекса Шеннона соответствуют территориям, в которых по площади доминирует небольшое количество классов земного покрова, а доля малых по площади классов стремится к нулю.

Основная гипотеза данного исследования предполагает существование корреляции между значениями индекса разнообразия и типами территорий: повышенные значения индекса отражают зоны городской окраины, характеризующиеся гетерогенной структурой земного покрова, а пониженные значения соответствуют либо центральным городским районам с однородной застройкой, либо сельскохозяйственным территориям с доминированием одного типа землепользования.

Для количественной оценки данного параметра использовались пространственные данные GlobeLand30 — глобальной карты земного покрова с пространственным разрешением 30 м (рис. 5). Данный картографический продукт разработан Министерством природных ресурсов КНР.

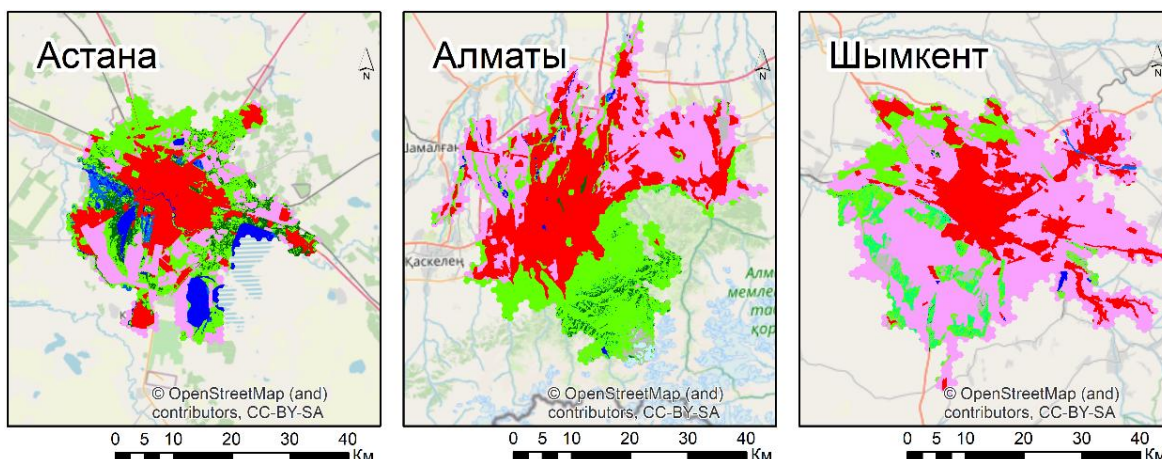


Рис. 5. Данные GlobelLand 30 (цвета объяснены в табл. 1)  
 Fig. 5. GlobeLand30 land cover data (the colors are explained in table 1)

Было принято решение использовать именно GlobeLand30, поскольку большинство других продуктов Landcover обладают избыточно детализированной классификацией земного покрова, что приводит к высокой энтропии на всей территории города. В отличие от них, GlobeLand30 лишен этого недостатка благодаря более обобщенной легенде: в классификации используется всего 10 классов (см. табл. 1). Для сравнения, в продукте программы Copernicus Global Land Cover предусмотрено 11 основных классов, два из которых (closed и open forest) дополнительно делятся на 12 подклассов.

Количественная оценка индекса Шеннона выполнялась с использованием программного обеспечения SAGA GIS. Критически важным этапом вычислений являлось определение оптимального размера скользящего окна (рис. 6), представляющего собой зону локального анализа, в пределах которой рассчитывалось процентное соотношение различных категорий земного покрова согласно классификации GlobeLand30.

В этом исследовании выбор оптимального размера скользящего окна для расчета и анализа энтропии земного покрова имеет важное значение для лучшего сохранения структуры и уменьшения избыточности данных. Выбор подходящего масштаба для вычислений основывается на двух ключевых критериях: обеспечении устойчивости результатов и сохранении пространственной вариабельности исследуемых показателей.

Согласно сложившейся исследовательской практике [Wilson et al., 2003; Angel et al., 2007; Huang et al., 2016], при расчете показателей ландшафтного разнообразия традиционно применяют скользящее окно со следующими размерами: 120, 240, 480, 960 и 1 920 м. После анализа данных по всем трем городам было решено, что оптимальный размер скользящего окна для дальнейших исследований составляет 960 м (рис. 7).

Размер скользящего окна был подобран таким образом, чтобы обеспечить оптимальный уровень генерализации (устранение мелких шумов при сохранении необходимой детальности). Чувствительность распределения значений индекса Шеннона к размеру скользящего окна представлена в табл. 2.

На рис. 8 отображены расчетные значения индекса Шеннона, полученные для всех изучаемых городов при использовании скользящего окна размером 960 м.

### Выбор операционной ячейки исследования

Исследовательская территория была сегментирована на регулярные гексагональные ячейки с помощью инструмента Generate Tesselation в ArcGIS 10.8 (рис. 9). Размер элементарной ячейки был установлен на уровне 1 км<sup>2</sup>, что соответствует площади скользящего окна (921 600 м<sup>2</sup>), использованного для расчета индекса Шеннона, и требованиям

удобства интерпретации пространственных данных. Помимо этого, собранные данные по окраине города в этих ячейках удобны для физического понимания, т. е. выходит плотность определенного показателя на 1 км<sup>2</sup>. Все расчеты площадей проводились в соответствующей горюде UTM-зоне: для Астаны и Шымкента — UTM 42N, для Алматы — 43N.

Табл. 1. Классификация GlobeLand30  
Table 1. The GlobeLand30 Classification

Класс	Содержание
Возделываемые земли	Земли, используемые для выращивания сельскохозяйственных культур
Леса	Земли, покрытые деревьями, плотность верхушки которых составляет более 30 %
Луг	Земли, покрытые естественным травяным покровом с плотностью покрытия более 10 %
Кустарники	Земли, покрытые кустарником и плотностью покрытия более 30 %
Водно-болотные угодья	Участки стыка суши и акватории, которые постоянно покрыты гигрофитными растениями и мелководными или влажными почвами. В эту категорию входят внутренние болота, озерные болота, водно-болотные угодья речных пойм, лесные/кустарниковые водно-болотные угодья, торфяные болота, мангровые заросли, солончаки и т. д.
Водоемы	Области, покрытые жидкой водой на суше. В эту категорию входят реки, озера, водохранилища и т. д.
Искусственные поверхности	Поверхности, образованные в результате деятельности человека. В эту категорию включены все виды жилья в городских и сельских районах, промышленных и горнодобывающих районах, транспортных сооружений и т. д.
Голые земли	Естественные покрытые земли с плотностью покрытия менее 10 %
Многолетний снег и лед	Земли, покрытые вечными снегами, ледниками и ледяными шапками

i1	i1	i1	i3	i5
i2	i2	i2	i4	i6
i7	i1	i6	i6	i6
i2	i2	i2	i5	i5
i1	i1	i2	i5	i5

Рис. 6. Пример скользящего окна 5×5 для 6 типов землепользования (расчет индекса производится для центральной выделенной зеленым цветом ячейки)

Fig. 6. Example of a 5×5 moving window for six land use types (the index is calculated for the central cell highlighted in green)

Выбор шестиугольника обусловлен следующими причинами:

1. Соотношение между расстоянием от центра квадрата до угла и расстоянием от центра квадрата до стороны составляет 1,4142, в то время как у шестиугольника это значение равно 1,1547, что свидетельствует о том, что шестиугольник ближе по форме к кругу или естественному распределению.
2. Сторона правильного шестиугольника (рис. 10) равна радиусу описанной окружности, а именно 620 м, поэтому расстояние между противоположными углами шестиугольника составляет 1 240 м, а при средней скорости пешехода в 5 км/ч соответствует зоне 15-минутной пешеходной доступности.

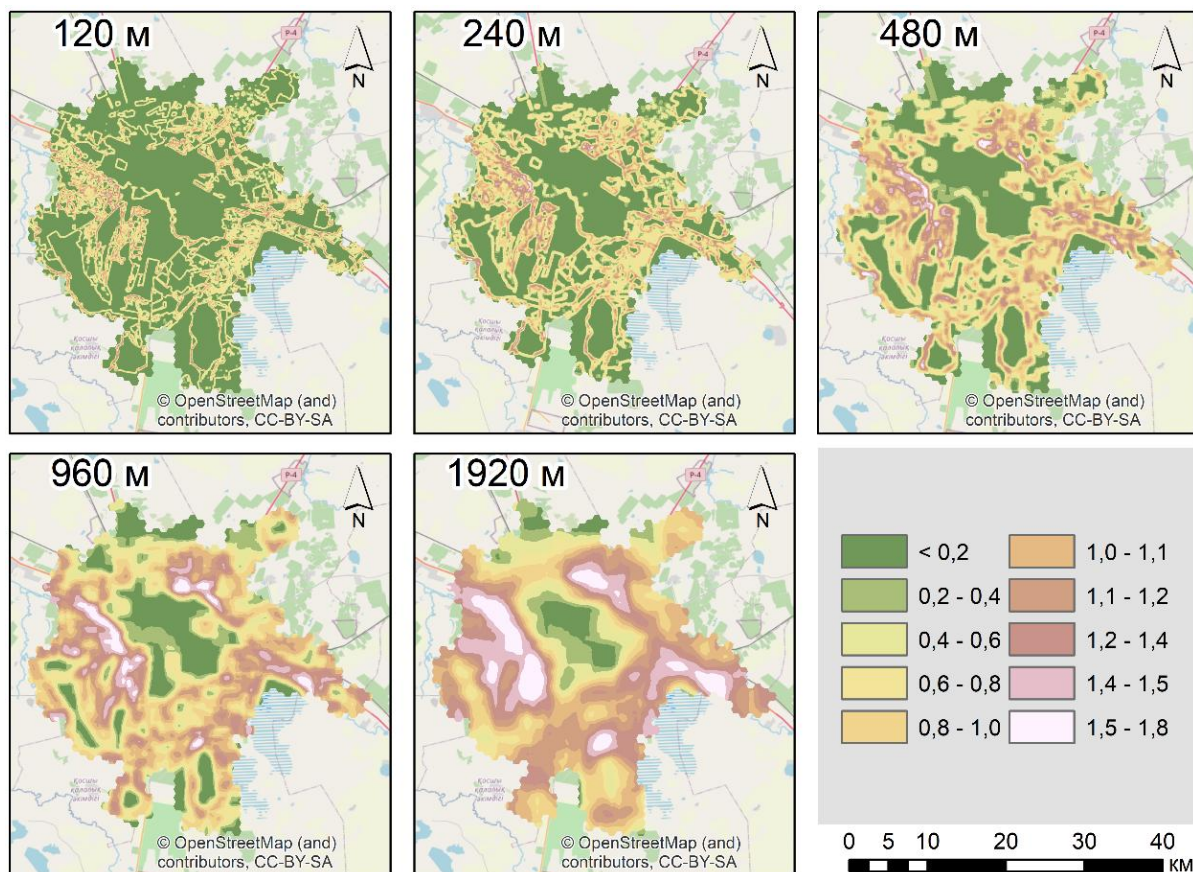


Рис. 7. Результаты расчета индекса Шеннона с различным скользящим окном для города Астана

Fig. 7. Results of Shannon index calculations using various moving window sizes for the city of Astana

Табл. 2. Чувствительность распределения значений индекса Шеннона к размеру скользящего окна (в % попадающих пикселей)

Table 2. Sensitivity of Shannon index value distribution to moving window size (percentage of pixels falling within each class)

Значения индекса Шеннона	Размер скользящего окна				
	120 м	240 м	480 м	960 м	1 920 м
<0,2	58,87	44,56	28,16	13,86	4,31
0,2–0,4	7,73	8,77	9,4	8,48	6,18
0,4–0,6	9,14	10,7	11,19	9,16	6,87
0,6–0,8	13,65	16,13	16,36	13,7	7,78
0,8–1,0	4,9	8,32	12,6	14,89	13,88
1,0–1,1	3,68	6,66	11	14,72	14,79
1,1–1,2	1,39	2,99	6,02	11,35	17,08
1,2–1,4	0,53	1,42	3,7	7,88	13,32
1,4–1,5	0,1	0,4	1,26	4,14	9,99
1,5–1,8	0,01	0,05	0,31	1,82	5,8

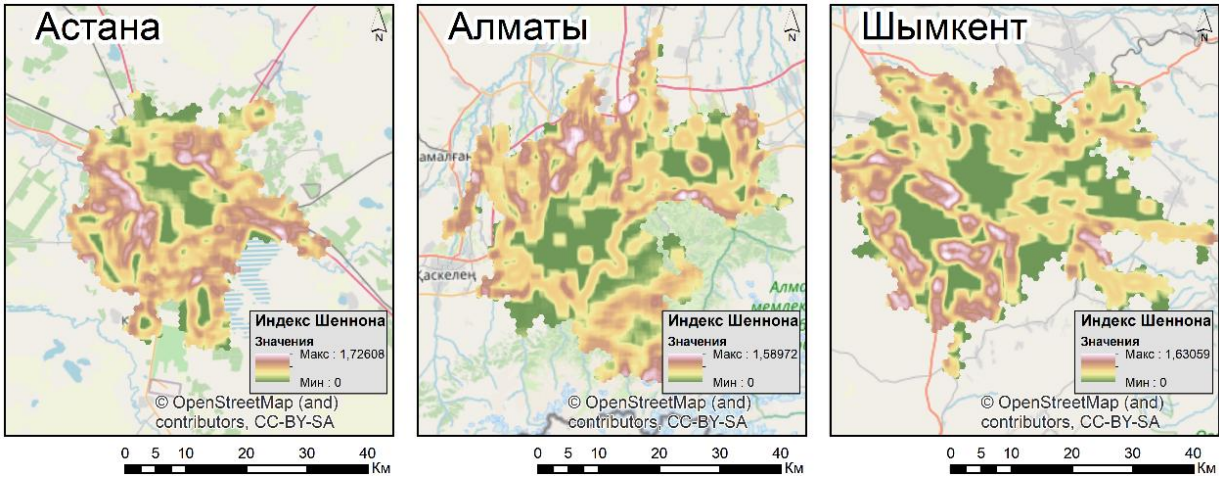


Рис. 8. Индекс Шеннона с размером скользящего окна 960 м  
Fig. 8. Shannon diversity index calculated using a 960 m moving window

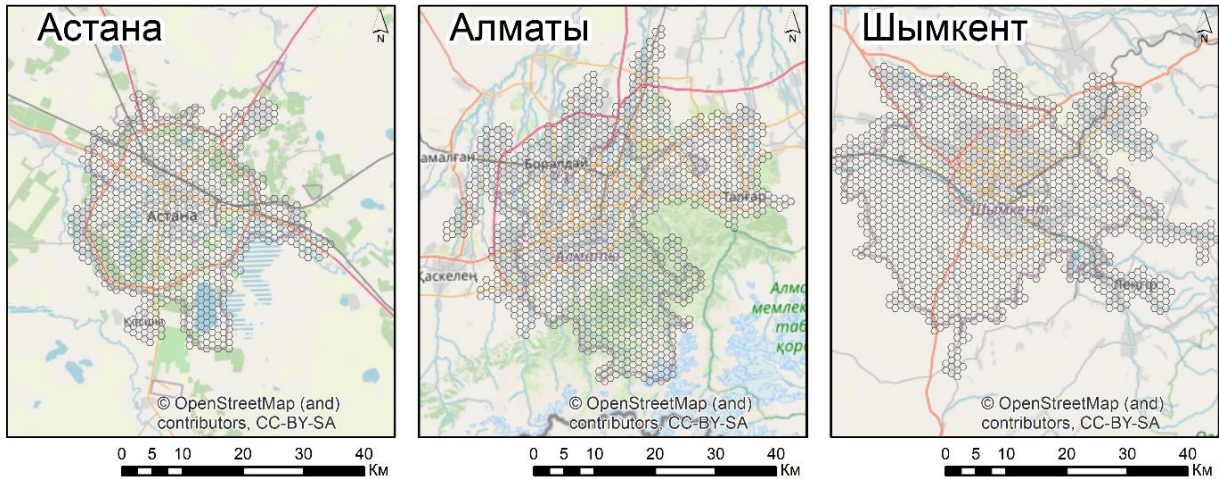


Рис. 9. Исследуемые города с окраинами, покрытые гексагональными ячейками  
Fig. 9. Studied cities with urban fringes, covered by hexagonal cells

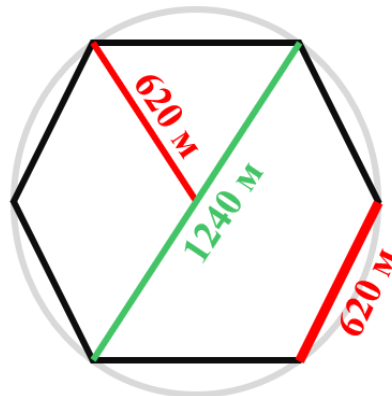


Рис. 10. Элементарная шестиугольная ячейка  
Fig. 10. Basic hexagonal cell

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчитанные значения индекса Шеннона были подвергнуты классификации с использованием метода естественных границ (Jenks), в результате чего все ячейки были разделены на две категории: зоны с повышенными значениями индекса (высокое разнообразие землепользования) и участки с пониженными значениями индекса (низкое разнообразие землепользования) (рис. 11).

Границы между категориями определялись индивидуально для каждого города, что позволило учесть их уникальные особенности между городским ядром и окраиной. Такой подход обеспечивает универсальность метода, поскольку он не зависит от фиксированных пороговых значений индекса. Пороговые значения границ составили: Астана — 0,69; Алматы — 0,49; Шымкент — 0,51.

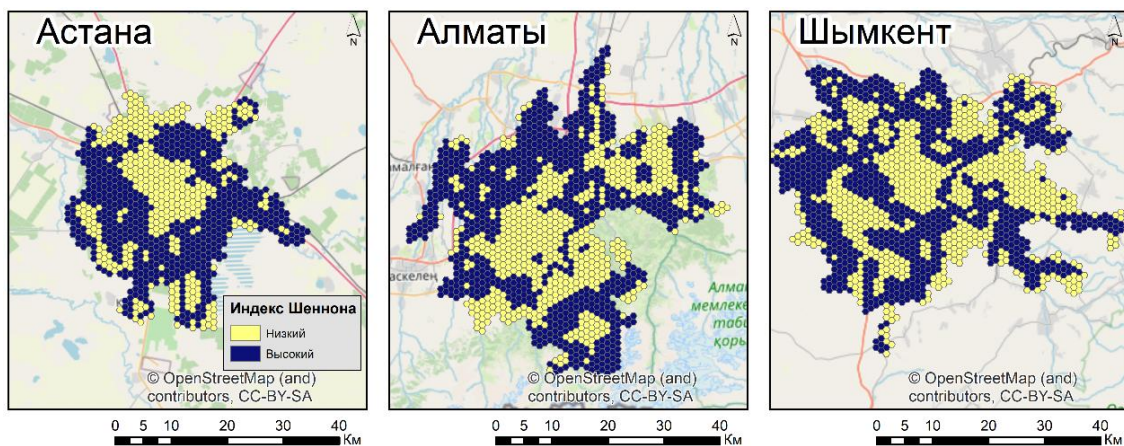


Рис. 11. Высокий и низкий индекс Шеннона для исследуемых городов  
 Fig. 11. High and low Shannon index values for the studied cities

Полученное изображение было разделено на три зоны (рис. 12):

1. Низкий уровень индекса Шеннона (положение в центре) — городской центр.
2. Высокий уровень индекса Шеннона (положение на периферии) — городская окраина.
3. Низкий уровень индекса Шеннона (положение на периферии): сельскохозяйственные поля — сельско-городская окраина, плотные и застроенные территории — субцентры на городской окраине.

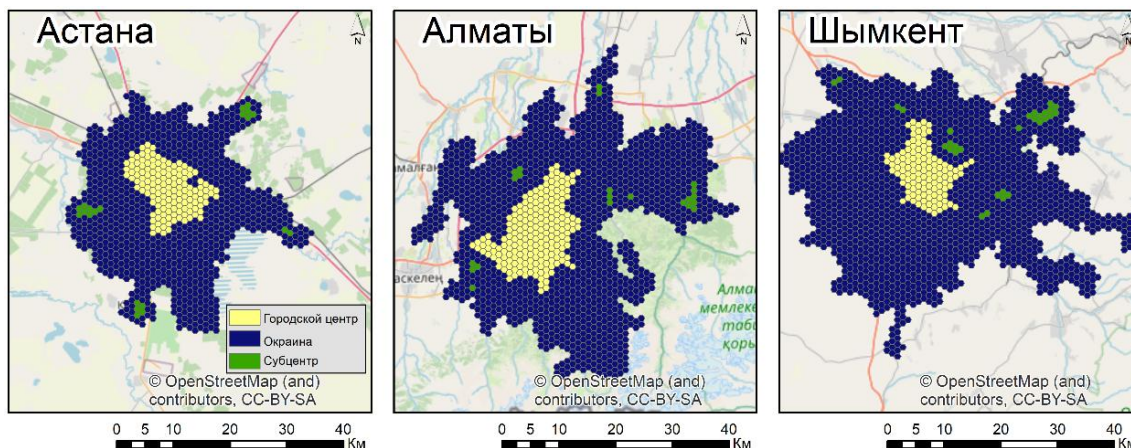


Рис. 12. Город и городская окраина для исследуемых городов  
 Fig. 12. Urban core and urban fringe zones in the studied cities

В рамках решения ключевой задачи исследования по дифференциации урбанизированного ядра и окраинных районов была выдвинута гипотеза, постулирующая существенно более высокую гетерогенность землепользования в окраинных районах по сравнению с центральными. Несмотря на наличие локальных участков с характеристиками, аналогичными городскому центру (преимущественно в формирующихся субцентрах), интегральный анализ подтверждает доминирование мозаичной структуры на периферии. Данный феномен обусловлен двумя взаимодополняющими факторами: внутриячеечным разнообразием (вариативность землепользования в пределах единичного гексагонального элемента) и межъячеечной комбинаторикой (уникальные сочетания различных типов застройки и природных комплексов в соседних элементах).

Именно эта дуальность механизмов формирования пространственной неоднородности обусловила необходимость выделения особого класса территорий — субцентров городской периферии, которые, сохраняя отдельные черты центральных районов, вносят существенный вклад в общее ландшафтное разнообразие окраин.

Проведенный анализ выявил существенные различия в структуре исследуемых городов:

1. Астана демонстрирует следующее распределение:
  - a) урбанизированное ядро: 142 ячейки (14,3 %);
  - b) окраина: 831 ячейка (83,6 %);
  - c) субцентры: 21 ячейка (2,1 %).
  
2. Алматы характеризуется иным соотношением:
  - d) центральная часть: 209 ячеек (13,8 %);
  - e) окраины: 1285 ячеек (84,8 %);
  - f) субцентры: 22 ячейки (1,4 %).
  
3. Шымкент показывает наиболее выраженную периферийную экспансию:
  - g) городской центр: 123 ячейки (7,3 %);
  - h) окраины: 1531 ячейка (90,9 %);
  - i) субцентры: 30 ячеек (1,8 %).

## ВЫВОДЫ

Предложенная методика выделения городских окраин, основанная на интеграции геоинформационного анализа и ландшафтных индексов, демонстрирует высокую универсальность и применимость как для равнинных городов (Астана, Шымкент), так и для горных (Алматы). Использование данных ночной освещенности (VIIRS) и застроенной поверхности (GHS-BUILT) для определения внешней границы, а также индекса разнообразия Шеннона для внутренней границы позволило учесть особенности рельефа и пространственной организации горных территорий. Это подтверждается результатами исследования, где для всех трех городов были четко идентифицированы центральные зоны, окраины и субцентры, несмотря на различия в их географическом положении и характере застройки. Методика обеспечивает высокую точность и воспроизводимость, что делает ее ценным инструментом для городских исследований в разнообразных ландшафтных условиях.

Полученные границы городских окраин имеют значительный потенциал для дальнейших исследований, т. к. анализ показал, что окраинные территории занимают более 80 % площади исследуемых городов. Такое доминирование подчеркивает необходимость детального изучения этих зон, включая их социально-экономические и экологические аспекты. В частности, дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию

инфраструктуры, оценку экологической устойчивости и разработку стратегий управления землепользованием.

Применение шестиугольной сетки также открывает новые возможности для пространственного анализа и моделирования урбанистических процессов, что способствует более эффективному градостроительному планированию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Angel S., Parent J., Civco D.* Urban Sprawl Metrics: An Analysis of Global Urban Expansion Using GIS. Proceedings of ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida May. Citeseer, 2007. V. 7. 12 p.

*Bhatta B.* Analysis of Urban Growth Pattern Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Kolkata, India. International Journal of Remote Sensing, 2009. V. 30. P. 4733–4746. DOI: 10.1080/0143-1160-8026-51967.

*Elvidge C. D., Zhizhin M., Ghosh T., Feng-Chi H., Jay T.* Annual Time Series of Global VIIRS Nighttime Lights Derived from Monthly Averages: 2012 to 2019. Remote Sensing, 2021. V. 13. Iss. 5. Art. 922. DOI: 10.3390/rs13050922.

*Feng X.* Modelling the Spatial Pattern of Urban Fringe. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede Netherlands, 2004. 80 p.

*Günay E.* Interaction of Urban Fringe and Transportation System: Istanbul Case. MS thesis. Izmir Institute of Technology (Turkey), 2007. 77 p.

*Huang J., Zhou Q., Wu Z.* Delineating Urban Fringe Area by Land Cover Information Entropy — An Empirical Study of Guangzhou-Foshan Metropolitan Area, China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016. V. 5. Iss. 5. Art. 59. DOI: 10.3390/ijgi5050059.

*Ludwig J. A., Reynolds J. F.* Statistical Ecology: A Primer in Methods and Computing. John Wiley & Sons, 1988. V. 1. 146 p.

*Martin L. R. G.* A Comparative Urban Fringe Study Methodology. Environment Canada, Lands Directorate. Environnement Canada, Direction générale des terres, 1975. 101 p.

*Wilson E. H., Hurd J. D., Civco D. L., Prisloe M. P., Arnold C.* Development of a Geospatial Model to Quantify, Describe and Map Urban Growth. Remote Sensing of Environment, 2003. V. 86. P. 275–285.

*Yang Y., Ma M., Tan C., Li W.* Spatial Recognition of the Urban-Rural Fringe of Beijing Using DMSP/OLS Nighttime Light Data. Remote Sensing, 2017. V. 9. Iss. 11. Art. 1141. DOI: 10.3390/rs9111141.

*Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y., Gong P.* Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. Remote Sensing, 2021. V. 13. Iss. 18. Art. 3778. DOI: 10.3390/rs13183778.

### REFERENCES

*Angel S., Parent J., Civco D.* Urban Sprawl Metrics: An Analysis of Global Urban Expansion Using GIS. Proceedings of ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida May. Citeseer, 2007. V. 7. 12 p.

*Bhatta B.* Analysis of Urban Growth Pattern Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Kolkata, India. International Journal of Remote Sensing, 2009. V. 30. P. 4733–4746. DOI: 10.1080/0143-1160-8026-51967.

*Elvidge C. D., Zhizhin M., Ghosh T., Feng-Chi H., Jay T.* Annual Time Series of Global VIIRS Nighttime Lights Derived from Monthly Averages: 2012 to 2019. *Remote Sensing*, 2021. V. 13. Iss. 5. Art. 922. DOI: 10.3390/rs13050922.

*Feng X.* Modelling the Spatial Pattern of Urban Fringe. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede Netherlands, 2004. 80 p.

*Günay E.* Interaction of Urban Fringe and Transportation System: Istanbul Case. MS thesis. Izmir Institute of Technology (Turkey), 2007. 77 p.

*Huang J., Zhou Q., Wu Z.* Delineating Urban Fringe Area by Land Cover Information Entropy — An Empirical Study of Guangzhou-Foshan Metropolitan Area, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016. V. 5. Iss. 5. Art. 59. DOI: 10.3390/ijgi5050059.

*Ludwig J. A., Reynolds J. F.* Statistical Ecology: A Primer in Methods and Computing. John Wiley & Sons, 1988. V. 1. 146 p.

*Martin L. R. G.* A Comparative Urban Fringe Study Methodology. Environment Canada, Lands Directorate. Environnement Canada, Direction générale des terres, 1975. 101 p.

*Wilson E. H., Hurd J. D., Civco D. L., Prisloe M. P., Arnold C.* Development of a Geospatial Model to Quantify, Describe and Map Urban Growth. *Remote Sensing of Environment*, 2003. V. 86. P. 275–285.

*Yang Y., Ma M., Tan C., Li W.* Spatial Recognition of the Urban-Rural Fringe of Beijing Using DMSP/OLS Nighttime Light Data. *Remote Sensing*, 2017. V. 9. Iss. 11. Art. 1141. DOI: 10.3390/rs9111141.

*Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y., Gong P.* Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2021. V. 13. Iss. 18. Art. 3778. DOI: 10.3390/rs13183778.