

Т.Ю. Зенгина<sup>1</sup>, А.А. Пакина<sup>2</sup>, Н.Н. Муканова<sup>3</sup>

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФРАГМЕНТИРОВАННОСТИ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ АЛМАТЫ

### АННОТАЦИЯ

В связи с расширением границ г. Алматы в 2012 г. в его черту попали большие площади лесных массивов Иле-Алатауского государственного национального природного парка. Флористический состав этих лесов представлен множеством видов, среди которых присутствуют редкие и эндемичные. После присоединения к территории города рекреационная нагрузка на них существенно увеличилась. Наиболее распространенным следствием этого стала фрагментация лесных массивов, т. е. их расчленение на участки различными рубежами (строительством, дорожно-транспортной инфраструктурой и др.). Фрагментация лесов ведет к деградации и гибели лесных сообществ, к снижению их средообразующих и средоформирующих функций, что приводит к ухудшению параметров комфортности городской среды и снижению качества жизни населения. В работе на основе использования методов геоинформационного анализа и картографирования проведена количественная оценка изменения степени фрагментации городских лесов Алматы, основывающаяся на расчете ряда индексов: показатели лесистости (FC), среднего размера участка (MPS), формы участка (MSI), плотности границ (ED) и среднего расстояния до ближайшего участка (MNN). Расчет индексов проводился для лесных массивов по состоянию за 2014 и 2020 гг. для 9 речных бассейнов. Результаты расчетов были использованы для создания серии соответствующих карт и сравнительной таблицы изменения показателей фрагментации за исследуемый период. Анализ рассчитанных показателей выявил закономерности динамики степени фрагментации городских лесов Алматы в зависимости от уровня хозяйственного освоения территории, интенсивности рекреационных нагрузок и близости к крупным транспортным магистралям. Так, самые высокие показатели фрагментации характерны для водосборов рек Широкая Щель, Солоновка и Малая Алматинка. Сравнение индексов фрагментации за 2014 и 2020 гг. показало, что в целом, для всей территории Иле-Алатауского национального парка характерно хотя и незначительное, но ухудшение показателей фрагментированности лесных массивов. Наиболее значительные ухудшения отмечены для бассейна р. Большая Алматинка и ее притока р. Кумбель, где сформирована обширная зона отдыха, а также в бассейне р. Малая Алматинка и ее притока р. Бутаковка. В наименьшей степени ухудшились показатели фрагментации лесных массивов в бассейне р. Казашка.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городские леса, антропогенная нагрузка, фрагментация лесных массивов, показатели фрагментации, геоинформационный анализ и геоинформационное картографирование

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* [tzengina@mail.ru](mailto:tzengina@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* [allapa@yandex.ru](mailto:allapa@yandex.ru)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* [mukanova.nurgul@bk.ru](mailto:mukanova.nurgul@bk.ru)

Tatiana Yu. Zengina<sup>1</sup>, Alla A. Pakina<sup>2</sup>, Nurgul N. Mukanova<sup>3</sup>

## GEOINFORMATION ANALYSIS OF CHANGES IN INDICATORS OF ALMATY CITY'S FORESTS FRAGMENTATION

### ABSTRACT

Large forests areas of the Ile-Alatau State National Natural Park were annexed to the Almaty city due to expansion of its borders in 2012. The floral composition of these forests is represented by many species, among which are rare and endemic ones. The recreational pressure on forest lands after joining to the territory of the city has increased significantly and the most common consequence of this became the fragmentation of forests, i.e. their dismemberment into sections by various boundaries (construction, road transport infrastructure, etc.). Forests fragmentation leads to degradation and even death of forest communities, as well as to a decrease in their ecosystems functions. These changes of the suburban forests lead to a deterioration in the comfort parameters of the urban environment and a decrease in the quality of life of the population. The quantitative assessment of changes in the degree of fragmentation of Almaty city's forests was carried out in the work, based on the geoinformation analysis and mapping methods. The calculation of a number of indices describing such features of the territorial organization of forests that can have a significant impact on the effectiveness of their environment protection functions was laid as the basis: forest cover index (FC), Mean Patch Size (MPS), Mean Shape Index (MSI), Edge density (ED) and Mean Nearest Neighbor (MNN). The indices were calculated for 9 river basins from 2014 to 2020 and the results were used to create a series of corresponding maps and a comparative table of changes in fragmentation indicators over the study period. The analysis of the calculated indices revealed patterns of dynamics of the fragmentation's degree of Almaty city's forests depending on the level of economic development, intensity of recreational pressure and proximity to major highways. Thus, the highest rates of fragmentation are characteristic of the catchments of the Shirokaya Shchel, Solonovka and Malaya Almatinka rivers. Comparison of fragmentation indices for 2014 and 2020 showed that, in general, the entire territory of the Ile-Alatau National Park is characterized by a slight, but deterioration in the indicators of forests fragmentation. The most significant deterioration was noted for the basin of the Bolshaya Almatinka River and its tributary the Kumbel River, where an extensive recreation area was formed, as well as in the basin of the Malaya Almatinka River and its tributary the Butakovka River. The indices of fragmentation of woodlands in the basin of the Kazashka River deteriorated to the least extent.

**KEYWORDS:** urban forests, anthropogenic pressure, forests fragmentation, fragmentation indicators, geoinformation analysis and geoinformation mapping

### ВВЕДЕНИЕ

Леса урбанизированных территорий выполняют важные средоформирующие, водоохранные, почвозащитные и другие функции, обеспечивающие благоприятные условия жизни городского населения и сохранность природных экосистем [Pakina, Batkalova, 2018; Ordóñez, Duinker, 2012]. Зеленые насаждения улучшают качество городской среды, играя решающую роль в уменьшении объема загрязняющих веществ в составе атмосферного воздуха, регулируют температурный режим и влажность,

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [tzengina@mail.ru](mailto:tzengina@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [allapa@yandex.ru](mailto:allapa@yandex.ru)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [mukanova.nurgul@bk.ru](mailto:mukanova.nurgul@bk.ru)

защищают от ветров и техногенного шума, создают условия для эмоционального комфорта городских жителей [Konijnendijk, 2003; Кулик и др., 2013]. Городские леса, расположенные в пределах транспортной доступности, важны также в качестве рекреационных ресурсов, являясь лучшим местом отдыха для горожан. Однако развитие рекреации без достаточного контроля со стороны местных властей часто становится причиной деградации лесных фитоценозов.

Поддержание удовлетворительного состояния городских лесных массивов может рассматриваться как один из наиболее эффективных градостроительных инструментов для формирования благоприятных условий жизни населения. В связи с этим анализ состояния и комплексный экологический мониторинг городских лесных территорий являются актуальными задачами, включающими целый ряд разнообразных аспектов, среди которых важное место отводится анализу территориальной структуры городских лесов с целью поиска путей и методов их рационального использования и поддержания их экологического потенциала. Подобный анализ состояния лесных массивов подразумевает прежде всего изучение лесистости, то есть площади и доли покрытых лесом территорий; степени сложности и гетерогенности территории, в том числе: фрагментации лесного покрова, фрактальной размерности, уникальности и т. п. [Барталев, 2007]. Одним из наиболее удобных инструментов анализа состояния лесного покрова являются методы геоинформационного картографирования, которые предоставляют широкий спектр способов анализа его динамики.

Проблема сохранения городских лесов весьма актуальна для г. Алматы. Расположение в предгорьях Заилийского Алатау обуславливает неоднородность растительного покрова и концентрацию лесных массивов преимущественно в южной части города с более благоприятными лесорастительными условиями. Лесные массивы Алматы, приуроченные к горным ландшафтам, характеризуются богатым видовым разнообразием, способствуют улучшению экологической обстановки в Алматинской агломерации, а также формируют уникальные природные комплексы, которые благоприятствуют развитию туризма в регионе. Кроме того, лесные ландшафты северных склонов Тянь-Шаня являются центром биоразнообразия различных плодово-культурных растений, а также местом обитания большого количества редких и реликтовых видов, что стало причиной создания здесь в 1996 г. Иле-Алатауского государственного национального природного парка (ГНПП).

В 2012 г. в связи с расширением границы города Алматы в его черту попало около 12 тыс. га ГНПП «Иле-Алатау» (т. е. около 6 % территории парка) с большими площадями лесных массивов [Галуцак, Азимов, 2013; Иващенко, 2015; Мустафина, Зенгина, 2019], флористический состав которых представлен видами, среди которых много редких и эндемичных. Однако после присоединения к территории города рекреационная нагрузка на лесные ландшафты увеличилась, в связи с тем, что одним из главных направлений развития ГНПП «Иле-Алатау» является создание условий для туризма. Такая политика часто приводит к непродуманному освоению территории, долгосрочной аренде больших земельных площадей под создание гостиниц, горнолыжных курортов, ресторанов, гостевых домов и др. Одним из наиболее распространенных отрицательных последствий такого воздействия является расчленение лесных массивов на участки различными рубежами (строительством, дорожно-транспортной инфраструктурой и др.), получившее название «фрагментации». Под фрагментацией ландшафтов (территорий, или экосистем) принято понимать комплексное воздействие инженерных линейных сооружений, главным образом дорожно-транспортных сетей, на экосистемы [Агаханяни, 2003]. В нашем случае под фрагментацией лесов понималось расчленение лесных массивов различными рубежами на участки.

Фрагментация лесов приводит к активизации природных процессов, способствующих деградации и гибели лесных сообществ, и, как следствие – к снижению их экологических функций, в том числе в городских и пригородных лесах крупных городов [Ramachandra et al., 2016; Зенгина и др., 2019]. Так, в результате фрагментации происходит изменение абиотических условий – трансформация микроклимата внутри лесного массива, увеличение уровня шума, рост загрязнения поверхностных вод,

изменение миграционных потоков вещества и т. д. Например, процесс изолирования лесных экосистем приводит к возникновению так называемого «краевого эффекта», т. е. у лесного фрагмента образуется опушечная зона. Данная зона имеет тенденцию получать больше солнечного света, подвергаться большему влиянию от рядом расположенных объектов инфраструктуры или городских районов, что может негативно сказаться на состоянии почвенно-растительного покрова [Rutledge, 2003].

*Следствием фрагментации становится* прямое воздействие на флору и фауну – изоляция популяций создает помехи при миграции животных, что приводит к модификациям поведения, увеличению смертности и сокращению биоразнообразия. Увеличение расстояния между экотопами снижает вероятность привнесения семян и опыления растений, вызывает инвазии [Ивонин и др., 2012]. Кроме того, изоляция лесных местообитаний способствует вымиранию популяций с небольшими ареалами. Устойчивость лесных экосистем определяется размером лесного массива: большие участки лесов, как правило, имеют более многочисленные популяции (с более низкой вероятностью исчезновения) и большее видовое разнообразие [Anpilogova, Pakina, 2022].

Отмечается также так называемый *эффект наследия*, под которым понимается воздействие фрагментации на мозаику и последующее функционирование экосистем. Хозяйственная деятельность (землепользование, пожары и т. п.) и нагрузка на ландшафты накладывают отпечаток на протекание сукцессий и будущее состояние растительного покрова [Гусев, 2014]. Многие авторы отмечают также нарушение функционирования экосистем за счет разрушения системы биотических связей.

Кроме вышеописанных цепочек воздействий, способствующих деградации экосистем, следует отметить яркую выраженность данного процесса на горных территориях. Исчезновение горных лесных сообществ может стать причиной формирования эрозии на склонах, что, в свою очередь, содействует сходу лавин и селей. Таким образом, антропогенная фрагментация лесных массивов – процесс, оказывающий негативное воздействие на устойчивость экосистем в целом и приводящий к снижению их продуктивности, а также возможности выполнения средообразующих и средоформирующих функций. В условиях пригородных лесов это приводит к ухудшению параметров комфортности городской среды и снижению качества жизни населения. В связи с этим именно процессы фрагментации городских лесов Алматы стали одним из основных предметов данного исследования.

Цель работы состояла в проведении количественной оценки изменения фрагментации лесных массивов г. Алматы за 2014–2020 гг. методами ГИС-технологий на примере 9 модельных территорий.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для изучения современного состояния и динамики городских лесов Алматы использовались разнообразные материалы. Так, в работе широко использовались космические снимки со спутников Landsat-8 (bands 4, 5) и Sentinel-2 (bands 2, 4, 8, 11) для получения индексных и синтезированных изображений. Уточнение контуров на ключевых участках проводилось с применением разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения, предоставляемые веб-сервисом Google Earth. Также использовались различные картографические материалы, в т. ч. лесотаксационные карты за 2014 г. на территорию Медеуского филиала ГНПП «Иле-Алатау», которые послужили основой для дешифрирования снимков на всю исследуемую территорию, и топографические карты масштаба 1:50 000.

Для работы также привлекались материалы РГКП (Республиканское государственное казенное предприятие) «Казахское лесостроительное предприятие», Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Казахстана и лесостроительного проекта 2014 г. Медеуского филиала ГНПП «Иле-Алатау» Алматинской области, а также материалы Естественно-научного и технико-экономического обоснования ГНПП «Иле-Алатау» и Концепции по озеленению города Алматы 2017 г. В качестве дополнительных источников использовались фондовые материалы ряда организаций, в том

числе материалы оценки воздействия на окружающую среду в районе горнолыжного курорта «Кокжайлау» и ГНПП «Иле-Алатау», подготовленные специалистами ТОО Казэкопроекта и ТОО «Терра ГИС». В работе были использованы методы геоинформационного анализа и картографирования, дистанционного зондирования (ДЗЗ), а также статистические методы, реализованные средствами ГИС. В качестве базового программного обеспечения использовался ГИС-пакет ArcGIS 10.4, а также программа MS Excel. Методы обработки и анализа материалов ДЗЗ основывались на работе с разновременными космическими снимками и включали обработку многозональных изображений, в том числе: тематически ориентированный RGB-синтез для получения цветных изображений в псевдоцветах максимально информативных для изучения лесной растительности, расчет индексных изображений (спектральных индексов) и решение классификационных задач для дешифрирования залесенных территорий и ряд других процедур.

Анализ состояния лесных массивов проводился в среде ГИС на основе количественной оценки степени их фрагментированности с использованием выбранных показателей фрагментации, которые основываются на расчете разнообразных индексов, описывающих такие особенности территориальной организации лесных массивов в пределах региона исследования, как размер участков, их количество, периметр, особенности и протяженность границ, сложность формы и др. Из множества разработанных на сегодняшний день индексов фрагментации лесных массивов нами были использованы следующие 5 индексов.

*Показатель лесистости (FC) (Forest Cover)* характеризует степень облесенности территории, которая определяется отношением покрытой лесом площади к общей площади и выражается в процентах. Это наиболее распространенный показатель, который достаточно ярко характеризует пространственную деградацию зеленых массивов, ведущую к снижению эффективности выполнения ими различных функций.

*Индекс среднего размера участка (MPS) (Mean Patch Size)*. Показатель лесистости не отражает размеры отдельно взятых лесных массивов, однако известно, что чем больше площадь массива, тем сильнее проявляются его средообразующие и средозащитные функции. В связи с этим также рассчитывался индекс MPS.

*Индекс формы лесного участка (MSI) (Mean Shape Index)*. При фрагментации лесных массивов меняется не только их размер, но и форма. Для оценки этого явления был использован индекс MSI [Patton, 1975], математически описывающий расхождение формы исследуемого массива и массива в форме идеального круга. Если лесной массив имеет форму идеального круга, то  $MSI = 1$ . При этом, чем больше форма участка отклоняется от эталона (круга), тем больше значение индекса. Лесные массивы наиболее близкие к округлой форме (т. е. с наименьшим периметром по отношению к площади) считаются более стабильными и устойчивыми к внешнему негативному воздействию и эффективнее выполняют средообразующие функции.

*Индекс плотности границ (ED) (Edge Density)* определяется как отношение длины границ лесных массивов к их площади. Увеличение индекса указывает на рост протяженности границ за счет их изрезанности, что приводит к росту негативного воздействия на лесные участки «краевого эффекта», ширина зоны которого может колебаться в зависимости от типа экосистемы и особенностей окружающей ее территории до 100 и более метров [Patton, 1975]. Но в любом случае происходят изменения в функционировании экосистем и, как правило, снижение их экологических функций.

*Индекс среднего расстояния до ближайшего участка (Mean Nearest Neighbor)* равен сумме расстояний до ближайшего соседнего участка того же типа, рассчитанной на основе ближайшего расстояния от центроида (центра масс геометрической фигуры) до центроида для каждого фрагмента соответствующего типа, которая делится на общее количество участков. Увеличение индекса свидетельствует об увеличении расстояния между лесными массивами и, соответственно, их большей изоляции друг от друга.

Формулы для расчета выбранных индексов приводятся в табл. 1. Стрелками показано направление отрицательной динамики, приводящей к снижению экологических функций

лесных массивов. Так, для индексов FC (показатель лесистости) и MPS (средний размер участка) увеличение значений индекса соответствует лучшему состоянию лесных массивов. При их уменьшении экологический потенциал лесов будет снижаться. Напротив, для индексов MSI, ED и MNN более высокие значения индекса говорят о менее благоприятной ситуации.

Табл. 1. Выбранные для расчета количественные показатели, характеризующие степень фрагментации лесов

Table 1. Quantitative indicators of the degree of forest fragmentation

Формула	Обозначения	Отрицательная динамика индексов
<b>FC – Показатель лесистости (Forest Cover) (%):</b>		↓
<b>FC= 100%</b>	a – сумма площадей лесных массивов A – площадь административного района	
<b>MPS – Индекс среднего размера участка (Mean Patch Size) (км<sup>2</sup>):</b>		↓
<b>MPS =</b>	a – площадь лесных участков n – общее количество лесных участков	
<b>MSI – Индекс формы лесного участка (Mean Shape Index) (усл. ед):</b>		↑
<b>MSI =</b>	p – периметр отдельного лесного массива a – площадь отдельного массива n – общее количество лесных массивов	
<b>ED – Индекс плотности границ (Edge Density) (км/ км<sup>2</sup>):</b>		↑
<b>ED =</b>	p – сумма периметров всех лесных массивов a – сумма их площадей	
<b>MNN – Индекс расстояния до ближайшего участка (Mean Nearest Neighbor) (м):</b>		↑
	l – сумма всех расстояний до соседнего участка n – общее количество лесных массивов	

Выбранные индексы фрагментации лесных массивов рассчитывались для ситуации 2014 и 2020 гг. Для этого подготовленные на основе материалов ДЗЗ и карт векторные слои лесных массивов обрабатывались с помощью алгоритмов статистической обработки атрибутов векторных слоев в ГИС-пакете ArcGIS 10.4, часть расчетов проводилась в программе MS Excel. При использовании инструментов Calculate Geometry, Calculate Area, Near и др. для каждого объекта слоя лесных массивов рассчитывались новые столбцы в атрибутивной таблице с параметрами, необходимыми для расчета выбранных индексов фрагментации: периметр, площадь, расстояние до ближайшего соседнего участка, номер участка и т. д. Далее проводился расчет выбранных 5 индексов фрагментации в соответствии с выбранными территориальными единицами анализа (речными бассейнами) для 2014 и 2020 гг. Результаты расчетов были использованы для построения серии карт.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения границ исследуемой лесной территории в пределах г. Алматы использовались два источника: маска лесов, представленная на сайте Global Forest Change 2000–2018, разработанная в университете Мэриленд на основе космических снимков, и космический снимок Sentinel-2 за 2019 г, который позволил подкорректировать границы с учетом произошедших изменений (рис. 1-А). В ходе работы был проведен

расчет вегетационного индекса NDVI в программном комплексе ArcMap 10.4. Некоторые участки границы также корректировались по данным высокодетальной космической съемки, представленной на веб-сервисах Google Satellites и Yandex Satellites.

Для проведения пространственного анализа степени и особенностей фрагментации городских лесов Алматы в качестве территориальных единиц использовались водосборные бассейны. По мнению ряда авторов именно эти территориальные единицы являются оптимальными для анализа средообразующих и средозащитных функций экосистем, обеспечивающих поддержание экологической целостности ландшафтов [Воропаева, 2011]. Принцип бассейнового подхода позволяет учесть не только физико-географические, но и социально-экономические факторы, являясь наиболее перспективным для решения различных проблем природопользования [Корытный, 2001; Озелдинова, Мукаев, 2016]. Системы элементарных водосборных бассейнов или ландшафтов выступают в качестве естественных природно-территориальных комплексов во многих исследованиях. Бассейн реки как геосистема характеризуется целостностью, уникальностью, иерархичностью, устойчивостью и саморегулированием, а также – вертикальными и горизонтальными связями, что определяет его функциональную целостность [Хорошев, 2009; Кузьменко и др., 2012]. В этом аспекте речной бассейн является наиболее оптимальной единицей для изучения в том числе и городских горных лесов.

Поскольку в настоящее время в Казахстане нет единой геопространственной базы данных речных бассейнов, а имеющиеся в открытом доступе модели водосборных бассейнов не соответствовали уровню детальности проводимого исследования, выделение границ элементарных водосборных бассейнов для исследуемого региона проводилось на основе топографических карт масштаба 1:50 000 и крупнее. При этом был использован так называемый «мануально-экспертный способ» [Зонирование малонарушенных..., 2018], который подразумевает выделение речных бассейнов вручную по крупномасштабным топографическим картам масштаба 1:50 000 и крупнее. Для горных территорий этот метод достаточно просто реализуется, так как границы водоразделов ярко выражены.

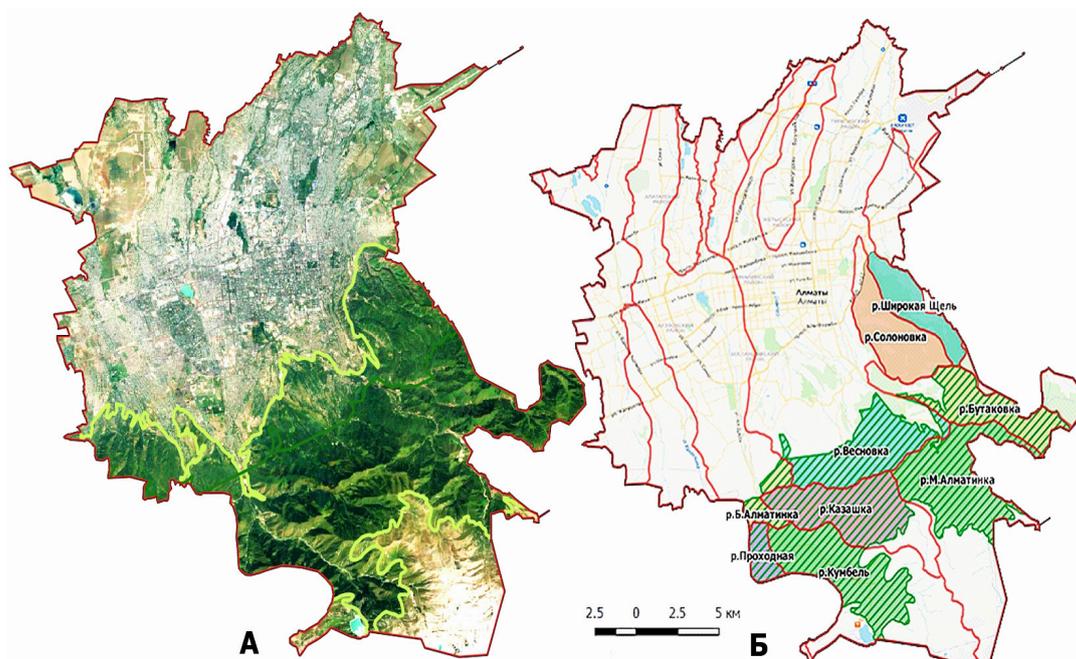


Рис. 1. Границы района исследования городских лесов г. Алматы

Fig. 1. Boundaries of the Almaty city's forests research area

А – границы распространения лесных массивов в пределах города, Б – залесенные речные бассейны в черте города

- красные линии – границы речных бассейнов в пределах г. Алматы,
- цветом и окантованы залесенные бассейны в черте города
- штриховка – бассейны, находящиеся в пределах ГНПП «Иле-Алатау»

В итоге был создан слой бассейнов 3-го и выше порядка на всю территорию города. Из них 9 бассейнов, находящиеся в пределах городских лесов, рассматривались как территориальные единицы для проведения пространственного анализа степени и особенностей фрагментации городских лесов (рис. 2-Б). Это 7 бассейнов в Иле-Алатауском национальном парке и 2 за пределами парка (бассейн р. Солоновка и р. Широкая Щель, являющаяся частью бассейна р. Весновка).

Изучение и картографирование изменений показателей фрагментированности лесных массивов г. Алматы включало несколько последовательных этапов.

*На первом этапе* было произведено формирование векторного слоя лесных массивов 2014 г. по лесотаксационным картам. Векторизация лесотаксационных карт проводилась для 7 модельных территорий в пределах ГНПП «Иле-Алатау». Для этого оцифровывались единые массивы леса без разделения по породному составу. Так как лесотаксационные карты, предоставленные РККП «Казахское лесоустroительное предприятие», содержат объекты инфраструктуры, то полученный в ходе ручной векторизации слой максимально детально отображал границы участков леса и их разделение на отдельные массивы.

*Второй этап* включал формирование векторного слоя лесных массивов 2020 г. по материалам съемки со спутника Sentinel-2. Для работы со снимком использовались несколько вариантов синтеза многозонального изображения, расчет индекса NDVI, а также классификация без обучения в программе ArcGIS 10.4. Оптимальные результаты дало разделение на 6 классов: предположительно еловые леса; широколиственные и мелколиственные леса; водные объекты; незадернованные территории; объекты инфраструктуры и застройка; территории с травянистым покровом. Использование расчетного изображения NDVI и синтезированных изображений позволило достаточно уверенно объединить 2 из полученных спектральных классов в 1 тематический класс «леса». Для большей достоверности полученный слой сравнивался с лесотаксационной картой. Контурная часть была также сверена и детализирована по данным веб-сервисов Google Satellites и Yandex Satellites.

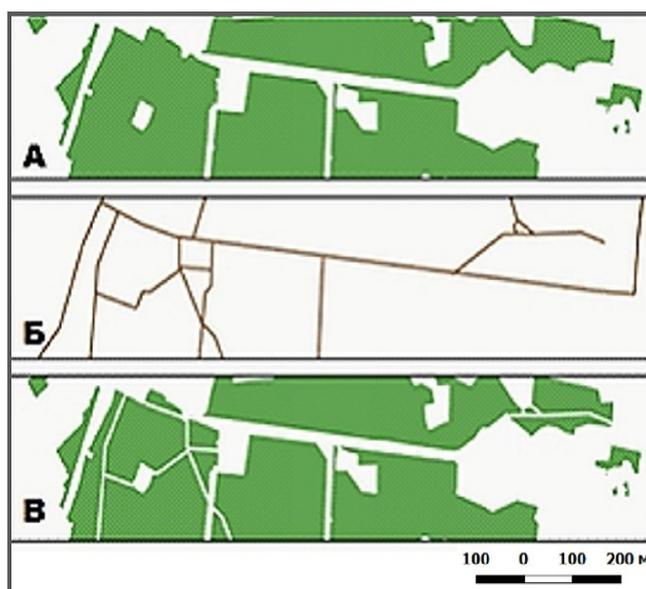
*На третьем этапе* было проведено формирование векторного, так называемого, фрагментирующего (рассекающего) слоя за 2020 г. В настоящее время в зависимости от целей и задач исследования существуют различные подходы к формированию как самого фрагментируемого слоя, так и к выделению фрагментирующей сети [Скачкова, Яцухно, 2016; Украинский и др., 2017]. В рамках исследования был сформирован единый линейный слой фрагментирующей сети, в который обычно включаются естественные (реки) и техногенные (железные и автомобильные дороги) линейные объекты. Реки не были включены в состав линейного слоя фрагментирующей сети, т. к. учитывались при формировании полигонального слоя лесных массивов. «Рассекающий» эффект речных долин в большинстве случаев выразился в формировании отдельных, хорошо разделенных лесных массивов. Фрагментирующая роль мелких рек как барьеров для животных, перемещающихся в пределах лесных территорий, не рассматривалась, т. к. основное внимание уделялось средообразующим и средозащитным функциям лесных массивов. Подбор векторных слоев фрагментирующих объектов проводился из данных открытого доступа OpenStreetMap. Корректировка объектов рассекающего слоя проводилась по космическим снимкам открытого доступа Google Satellites и Yandex Satellites и топографическим картам, подобранным на исследуемую территорию масштаба 1:50 000. Космические снимки, представленные на Google Satellites и Yandex Satellites имеют очень высокое пространственное разрешение – до 40 см для некоторых территорий и очень часто обновляются.

*На четвертом этапе* изучения динамики фрагментации лесных массивов г. Алматы был создан слой фрагментированных лесных массивов за 2020 г. Линейный фрагментирующий слой был использован для расчленения полученных ранее полигональных слоев лесных массивов (рис. 2). Полученный результирующий слой

фрагментированных массивов за 2020 год был в дальнейшем использован для расчета выбранных показателей фрагментации и их сравнения.

Для выделения слоя фрагментированных лесных массивов были использованы инструменты Overlay, в частности инструмент Erase, создающий класс пространственных объектов путем наложения входных объектов на полигоны стирающих объектов. В выходной класс объектов копируются только те части входных объектов, которые выходят за пределы границ стирающих полигонов. В качестве исходных объектов выступают слои фрагментирующих объектов и лесных массивов. Рассекающий слой в этом случае является стирающим, а лесные участки – входным слоем, подверженным стиранию.

*Пятый этап* был ориентирован на расчет статистики для объектов результирующих слоев фрагментированных лесных массивов на 2014 и 2020 гг. средствами ГИС. На этом этапе всем объектам (т. е. лесным массивам) сформированного слоя фрагментированных лесов 2014 года был присвоен атрибут принадлежности к тому или иному речному бассейну. Далее для всех объектов слоя рассчитывались те статистические показатели, которые входят в состав формул расчета выбранных индексов фрагментации – площадь, периметр и др. Потом определялись сумма площадей лесных участков в пределах каждого бассейна, сумма их периметров, общее количество участков внутри бассейна и т. д. Аналогичная работа была проведена для слоя фрагментированных лесных массивов 2020 г.



*Рис. 2. Фрагментация слоя лесных массивов линейным слоем*

*Fig. 2. Fragmentation of the woodlands layer by a linear layer*

*А – векторный полигональный слой лесных массивов; Б – линейный векторный слой фрагментирующей сети (асфальтированные и грунтовые дороги и др.);*

*В – векторный полигональный слой фрагментированных лесных массивов*

На шестом, заключительном этапе, был произведен расчет индексов фрагментации для 9 модельных территорий и их сравнение за 2014 и 2020 гг. Полученные статистические данные были использованы для расчета 5 выбранных индексов либо с помощью статистических модулей в программе ArcGIS, либо в программе MS Excel. Полученные результаты представлены в табл. 2, а также использованы для создания соответствующих карт.

Табл. 2. Результаты расчета индексов фрагментации лесных массивов (\*)  
Table 2. Results of indices of woodlands fragmentation's calculation

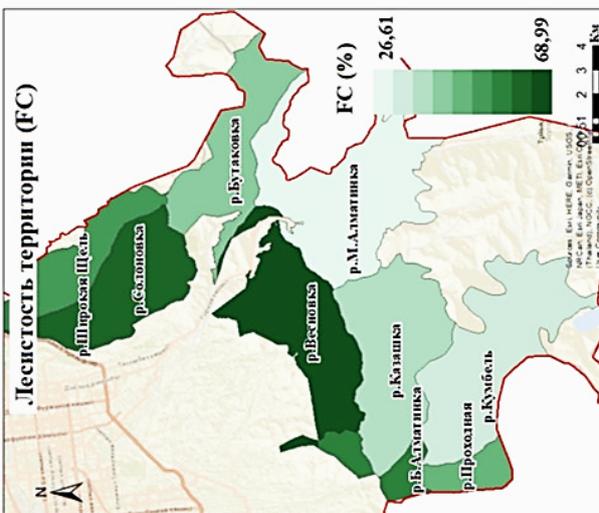
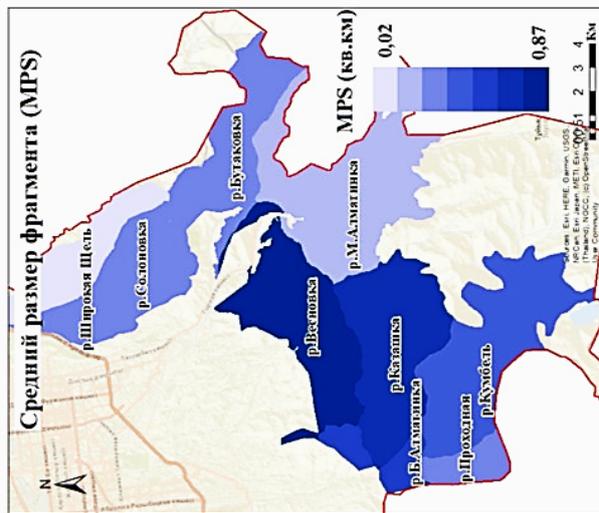
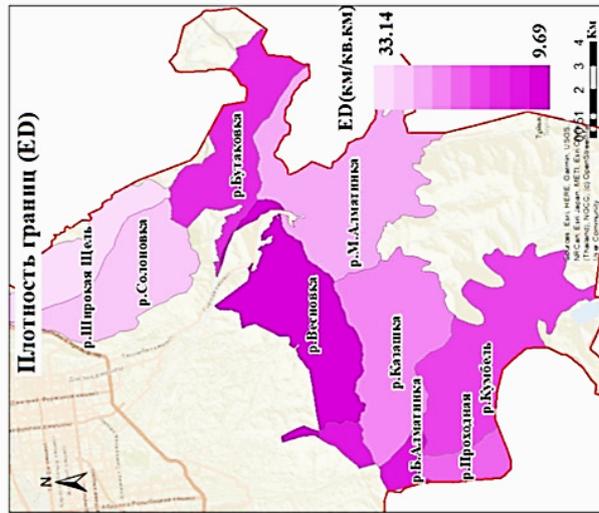
Бассейн реки:	ФС Лесистость %	MPS Средний размер фрагментов км <sup>2</sup>	ED Плотность границ км/км <sup>2</sup>	MSI Индекс формы лесного массива усл.ед.	MNN Расстояние до ближайшего участка м
<i>в пределах границ ГНПП «Иле-Алатау» (в числителе – по состоянию на 2014 г., в знаменателе – по состоянию на 2020 г.):</i>					
Б. Алматинка	47,98 / 46,76	0,10 / 0,10	20,65 / 21,53	1,90 / 1,98	59,5 / 61,13
Бутаковка	37,51 / 37,30	0,08 / 0,07	21,26 / 21,76	1,82 / 1,83	44,1 / 44,73
Весновка	69,34 / 68,99	0,88 / 0,87	9,57 / 9,69	2,25 / 2,25	43,6 / 44,13
Казашка	35,40 / 35,29	0,11 / 0,11	23,47 / 23,53	2,01 / 2,01	24,9 / 25,01
Кумбель	33,63 / 33,05	0,09 / 0,08	21,97 / 22,15	1,87 / 1,88	39,2 / 40,04
М. Алматинка	26,78 / 26,61	0,06 / 0,06	28,25 / 28,47	1,95 / 1,97	38,5 / 39,45
Проходная	42,39 / 41,18	0,07 / 0,07	21,45 / 22,32	1,87 / 1,88	30,1 / 31,34
<i>вне границ ГНПП «Иле-Алатау» (по состоянию на 2020 г.):</i>					
Широкая Щель	44,4	0,02	33,14	2,28	19,29
Солоновка	53,0	0,07	28,74	2,21	17,06

(\*) – розовой заливкой отмечена отрицательная динамика показателя фрагментации, указывающая на снижение экологических функций лесных массивов

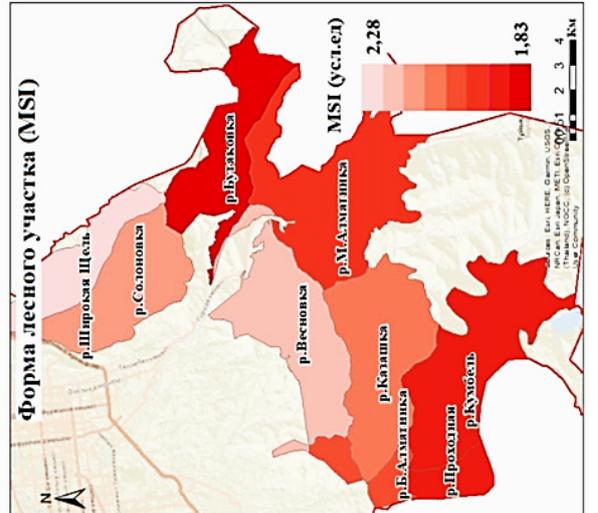
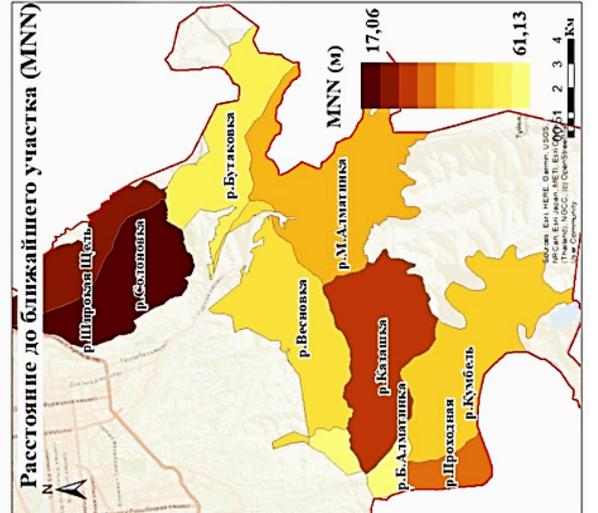
На рис. 3 представлены 5 карт, которые отображают особенности распределения 5 индексов фрагментации лесных массивов в 2020 г. Для создания карт использован метод количественного фона. Шкала интенсивности окраски территориальных единиц, в пределах которых оценивалась фрагментация (речные бассейны), определялась значением показателя фрагментированности лесов и выстраивалась в соответствии с информацией, представленной в таблице 1 (столбец 3) – т. е. более интенсивная окраска соответствует наиболее экологически благоприятному значению показателя фрагментации.

## ВЫВОДЫ

Основной особенностью городских лесов г. Алматы является их принадлежность к категории особо охраняемых природных территорий, главным образом – к государственному национальному природному парку «Иле-Алатау», часть из них произрастает на территории государственного регионального природного парка «Медеу». Однако интенсивное рекреационное освоение территории приводит к прямому уменьшению площади лесных массивов в результате застройки, их рассечению транспортными и инженерными сетями, а также оказывает косвенное влияние на слабоустойчивые горные ландшафты. Нерегулируемая хозяйственная деятельность провоцирует возникновение селей, схождение лавин, оползней, пожаров, что приводит к уничтожению больших площадей лесов.



**Рис. 3. Дифференциация значений 5 индексов фрагментации городских лесов Алматы в пределах 9 модельных территорий в 2020 г. (более интенсивная окраска соответствует наиболее экологически благоприятному значению показателя фрагментации)**



**Fig. 3. Differentiation of values of 5 indices of fragmentation of forests of Almaty city's territories in 2020 (more intense coloring corresponds to most environmentally friendly value of the fragmentation index)**

Использование методов ГИС-анализа и ГИС-картографирования для проведения количественной оценки изменения фрагментации лесных массивов г. Алматы оказалось весьма эффективным для изучения и анализа динамики состояния лесных массивов.

Так, проведенная оценка степени фрагментации лесов для 9 модельных территорий показывает, что самые высокие показатели фрагментации характерны для водосборов рек Широкая Щель и Солоновка. В целом результаты расчета индексов фрагментации лесов согласуются со степенью освоенности и интенсивностью рекреационного использования территории. Для бассейнов рек, находящихся в непосредственной близости к городской застройке, отмечается высокая степень фрагментированности лесных массивов, что даже при высоких показателях лесистости свидетельствует о снижении их экологической значимости. Так, помимо указанных выше бассейнов, высокая степень фрагментации лесных массивов характерна для бассейна р. Малой Алматинки, где сосредоточено большое количество горнолыжных трасс, зон отдыха и других хозяйственных объектов, а также вдоль дороги, соединяющей город и Большое Алматинское озеро.

Сравнение индексов фрагментации лесных массивов за 2014 и 2020 гг. для территории Иле-Алатауского национального парка показало, что в целом, для всех 7 модельных территорий характерно хотя и незначительное, но ухудшение показателей фрагментированности лесных массивов. В наименьшей степени изменился показатель фрагментированности MPS (средний размер участка) – для трех бассейнов рек он не изменился за 5 лет, для четырех ухудшился. В наименьшей степени ухудшились показатели фрагментации лесных массивов в бассейне р. Казашка – два показателя из пяти остались неизменными – средний размер и индекс формы участка, а три показателя ухудшились очень незначительно. Наиболее значительные ухудшения показателей фрагментированности отмечаются для бассейна р. Большая Алматинка, где активно развита рекреация, а также для лесных массивов, соседствующих с крупными транспортными магистралями. Так, в границах бассейна р. Большая Алматинка и ее притока р. Кумбель сформирована обширная зона отдыха с множеством объектов гостиничного комплекса и сферы туристических услуг, что напрямую отражается на фрагментированности окружающих лесов. Аналогичная ситуация отмечена в бассейне р. Малая Алматинка и ее притока р. Бутаковки.

Полученные результаты подтверждают необходимость рационального использования ресурсного потенциала городских лесов г. Алматы для сохранения всего комплекса их экологических функций.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и темы НИР по ГЗ МГУ «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования» (№ 121051100162-6).

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This research was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of M.V. Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change” and the State Research Program of Moscow State University “Sustainable development of territorial environmental management systems” (No. 121051100162-6).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Агаханиянц П.Ф.* Экологическая оценка фрагментации территории при проектировании дорожно-транспортных сетей: автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2003. 20 с.
2. *Барталев С.А.* Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений: автореф. дис. док. техн. наук. М., 2007.

3. *Воропаева Т.В.* Методологические особенности проектирования экологического каркаса территории. Ученые записки ЗабГГПУ, 2011. № 1 (36). С. 49–55.
4. *Галушак М.С., Азимов И.М.* К изучению градостроительной культуры города Алматы. Поиск (Серия естественных и технических наук), 2013. Т. 1. № 4. С. 68–74.
5. *Гусев А.П.* Пространственно-временные изменения землепользования и динамика растительности в ландшафтах юго-востока Беларуси. Природные ресурсы, 2014. № 1. С. 42–50.
6. *Зенгина Т.Ю., Мухин М.Г., Ускова К.А.* Оценка изменения степени фрагментации лесных массивов на территории Новой Москвы за последние 150 лет. Естественные и технические науки, 2019. № 4. С. 137–143. DOI: 10.25633/ETN.2019.04.14.
7. Зонирование малонарушенных лесных территорий и массивов на юге Дальнего Востока России: методические подходы и рекомендации: учебно-метод. пособие. Есипова Е.С., Кобяков К.Н., Колбовский Е.Ю. и др. Владивосток: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 56 с.
8. *Иващенко А.А.* Материалы к флоре Иле-Алатауского национального парка и прилегающих территорий. Труды Иле-Алатауского национального парка. Вып. 1. Астана: Жасыл Орда, 2015. С. 29–72.
9. *Ивонин В.М., Пиньковский М.Д., Егошин А.В.* Фрагментация горных лесов при размещении объектов Олимпиады-2014. Лесное хозяйство, 2012. № 1. С. 31–34.
10. *Корытный Л.М.* Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Ин-та геогр. СО РАН, 2001. 163 с.
11. *Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г.* Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14. № 1-9. С. 2432–2435.
12. *Кулик К.Н., Семенютина А.В., Белицкая М.Н., Подковыров И.Ю.* Современные проблемы и перспективы функционирования адаптивной системы озеленения. Известия НВ АУК, 2013. № 3 (31). С. 24–29.
13. *Мустафина А.Б., Зенгина Т.Ю.* Особенности пространственной организации озелененных территорий города Алматы. Естественные и технические науки, 2019. № 9. С. 120–126.
14. *Озелдинова Ж.О., Мукаев Ж.Т.* Применение геосистемно-бассейнового подхода при разработке оптимальной структуры природопользования. Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы II Междунар. науч. конф. Москва, 2016. С. 35–38.
15. *Скачкова А.С., Яцухно В.М.* Планирование территориальных схем экологических сетей на основе результатов оценки фрагментации и разнообразия ландшафтов. Земля Беларуси, 2016. № 4. С. 24–29.
16. *Украинский П.А., Терехин Э.А., Павлюк Я.В.* Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века. Вестник Московского университета, 2017. Серия 5. География. № 1. С. 82–91.
17. *Хорошев А.В.* Ландшафтно-экологические ценности при планировании лесопользования. Лесоведение, 2009. № 6. С. 54–62.
18. *Anpilogova D., Pakina A.* Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia. One Ecosystem, 2022. Vol. 7. DOI: 10.3897/oneeco.7.e77969.
19. *Konijnendijk van den Bosch C.* A decade of urban forestry in Europe. Forest Policy and Economics, 2003. V. 5. No. 2 P. 173–186. DOI: 10.1016/S1389-9341(03)00023-6.
20. *Ordóñez B.C., Duinker P.* Ecological integrity in urban forests. Urban Ecosystems, 2012. No. 15. P. 863–877. DOI: 10.1007/s11252-012-0235-6.
21. *Pakina A., Batkalova A.* The green space as a driver of sustainability in Post-Socialist urban areas: the case of Almaty City (Kazakhstan). Belgeo, 2018. No. 4. DOI: 10.4000/belgeo.28865.
22. *Patton D.R.* A diversity index for quantifying habitat “edge”. Wildlife Society Bulletin 3, 1975. P. 171–173.

23. *Ramachandra T.V., Setturu B., Chandran S.* Geospatial analysis of forest fragmentation in Uttara-Kannada District, India. *Forest Ecosystems*, 2016. No. 3 (10). DOI: 10.1186/s40663-016-0069-4.
24. *Rutledge D.* Landscape indices as measures of the effects of fragmentation: can pattern reflect process? Department of Conservation Science, 2003. Internal Series 98. P. 1–27.

## REFERENCES

1. *Agakhanyants P.F.* Ecological assessment of the fragmentation of the territory in the design of road transport networks: Abstract of the PhD thesis in Technical Sciences. St. Petersburg, 2003. 20 p.
2. *Anpilogova D., Pakina A.* Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia. *One Ecosystem*, 2022. Vol. 7. DOI: 10.3897/oneeco.7.e77969.
3. *Bartalev S.A.* Development of methods for assessing the state and dynamics of forests based on satellite observations: Abstract of the PhD thesis in Technical Sciences. Moscow, 2007.
4. *Galushchak M.S., Asimov I.M.* To the study of the urban culture of the city of Almaty. *Poisk (Series of Natural and Technical sciences)*, 2013. V. 1. No. 4. P. 68–74.
5. *Gusev A.P.* Spatial and temporal changes in land use and vegetation dynamics in the landscapes of the south-east of Belarus. *Natural Resources*, 2014. No. 1. P. 42–50.
6. *Ivashchenko A.A.* Materials for the flora of the Ile-Alatau National Park and surrounding areas. *Proceedings of the Ile-Alatau National Park. Issue 1.* Astana: Zhasyl Orda, 2015. P. 29–72.
7. *Ivonin V.M., Pinkovsky M.D., Egoshin A.V.* Fragmentation of mountain forests during the placement of objects of the 2014 Olympics. *Forestry*, 2012. No. 1. P. 31–34.
8. *Khoroshev A.V.* Landscape and ecological values in forest management planning. *Russian Journal of Forest Science*, 2009 No. 6. P. 54–62.
9. *Konijnendijk van den Bosch C.* A decade of urban forestry in Europe. *Forest Policy and Economics*, 2003. V. 5. No. 2 P. 173–186. DOI: 10.1016/S1389-9341(03)00023-6.
10. *Korytny L.M.* Basin concept in nature management. Irkutsk: Publishing House of the Institute of Geography, SB RAS, 2001. 163 p.
11. *Kuzmenko Ya.V., Lisetsky F.N., Narozhnyaya A.G.* Application of the nature management basin concept for soil and water protection arrangement of agricultural landscapes. *Proceedings of the Samara Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012. V. 14. No. 1–9. P. 2432–2435.
12. *Kulik K.N., Semenyutina A.V., Belitskaya M.N., Podkovyrov I.Yu.* Modern problems and prospects of functioning of adaptive gardening system. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*, 2013. No. 3 (31). P. 24–29.
13. *Mustafina A.B., Zengina T.Yu.* Spatial organization features of the Almaty city green areas. *Natural and Technical Sciences*, 2019. No. 9. P. 120–126.
14. *Ordóñez B.C., Duinker P.* Ecological integrity in urban forests. *Urban Ecosystems*, 2012. No. 15. P. 863–877. DOI: 10.1007/s11252-012-0235-6.
15. *Ozeldinova Zh.O., Mukaev Zh.T.* Application of the geosystem-basin approach in the development of the optimal structure of nature management. *Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: Proceedings of the II International Scientific Conference.* Moscow, 2016. P. 35–38.
16. *Pakina A., Batkalova A.* The green space as a driver of sustainability in Post-Socialist urban areas: the case of Almaty City (Kazakhstan). *Belgeo*, 2018. No. 4. DOI: 10.4000/belgeo.28865.
17. *Patton D.R.* A diversity index for quantifying habitat “edge”. *Wildlife Society Bulletin* 3, 1975. P. 171–173.
18. *Ramachandra T.V., Setturu B., Chandran S.* Geospatial analysis of forest fragmentation in Uttara-Kannada District, India. *Forest Ecosystems*, 2016. No. 3 (10). DOI: 10.1186/s40663-016-0069-4.
19. *Rutledge D.* Landscape indices as measures of the effects of fragmentation: can pattern reflect process? Department of Conservation Science, 2003. Internal Series 98. P. 1–27.

20. *Skachkova A.S., Yatsukhno V.M.* Planning of territorial schemes of ecological networks based on the results of the assessment of fragmentation and diversity of landscapes. *Zemla Belarusi*, 2016. No. 4. P. 26–29.
  21. *Ukrainsky P.A., Terekhin E.A., Pavlyuk Ya.V.* Fragmentation of forests in the upper part of the Vorskla River basin since the end of the 18th century. *Bulletin of Moscow University*, 2017. Series 5. Geography. No. 1. P. 82–91.
  22. *Voropaeva T.V.* Methodological features of designing the ecological framework of the territory. *Scientific notes of the Trans-Baikal State University*, 2011. No. 1 (36). P. 49–54.
  23. *Zengina T.Yu., Mukhin M.G., Uskova K.A.* Assessment of changes in the degree of fragmentation of forests on the territory of New Moscow over the past 150 years. *Natural and Technical Sciences*, 2019. No. 4. P. 137–143. DOI: 10.25633/ETN.2019.04.14.
  24. Zoning of intact forest territories and massifs in the south of the Russian Far East: methodological approaches and recommendations: educational method. manual. E.S. Esipova, K.N. Kobayakov, E.Y. Kolbovsky, et al. Vladivostok: World Wildlife Fund (WWF), 2018. 56 p.
-