

В статье описана взаимосвязь развития концепции городской зеленой инфраструктуры и цифровых технологий, позволяющих моделировать устойчивое развитие населенных мест на основе анализа состояния окружающей среды и природного каркаса города. Возможности цифровых инструментов полевого и дистанционного сбора и анализа данных о зеленой инфраструктуре демонстрируются преимущественно на примере Красноярска. Представлены промежуточные итоги диссертационного исследования Д. В. Злобина.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура; цифровой инструментарий; полевые и дистанционные методы; нейросети; беспилотные летательные аппараты. /

The article describes the relationship between the development of the concept of urban green infrastructure and digital technologies that allow modeling the sustainable development of populated areas based on the analysis of the state of the environment and the natural framework of the city. The possibilities of digital tools for field and remote data collection and analysis of green infrastructure are mainly demonstrated through the example of Krasnoyarsk. The article presents the interim results of D. V. Zlobin's thesis research.

Keywords: green infrastructure; digital tools; field and remote methods; neural networks; drones.

Цифровой инструментарий формирования зеленой инфраструктуры городов / Digital tools for the formation of urban green infrastructure

текст

Наталья Унагаева

Сибирский федеральный университет

Дмитрий Злобин

Сибирский федеральный университет /

text

Natalia Unagaeva

Siberian Federal University

Dmitry Zlobin

Siberian Federal University

Роль озелененных территорий в формировании комфортной городской среды с каждым годом становится все значительнее. Экспертное внимание переключается с вопросов эстетической направленности садов и парков в сторону устойчивого развития и городского планирования, что вносит некий терапевтический эффект в их содержание, все больше связывая открытые общественные пространства с комфортом проживания, оздоровлением урбанизированной среды. Все более актуальное значение приобретают инфраструктурные функции системы зеленых насаждений, выполняющие многомерные выгоды и направленные на стабилизацию среды жизнедеятельности человека в соответствии с концепцией экосистемных услуг.

Зеленая инфраструктура – культурные и ландшафтные активы, одновременно являющиеся ключевыми объектами самобытности и уникальности поселений, содержательно и планировочно связанные с природно-территориальным комплексом. В связи с этим становится актуальным внедрение новых моделей городского развития, основанных на исследованиях, инновациях, сохранении, умножении и передаче будущим поколениям этих важнейших ресурсов для развития человечества, что отражено в главных темах – анонсах на 2022–2023 годы, пронизывающих ряд международных журналов: Sustainability, Heritage, Urban Science, Buildings, Land, Information, Applied Sciences – изданий MDPI (выпускает 213 журналов открытого доступа).

Для трансформации совокупности городских зеленых насаждений в зеленую инфраструктуру поселения с целью повышения его устойчивости необходима ориентация на предоставление ими экосистемных услуг. В диссертационном исследовании Д. В. Злобина прорабатывается стратегия управления озелененными территориями в контексте урбанизации через оценку экосистемных услуг и реализацию концепции зеленой инфраструктуры путем организационно-правового регулирования градостроительной деятельности (на примере Красноярска).

Формирование зеленой инфраструктуры городов тесно связано с геоинформационным моделированием, включающим современные цифровые методы сбора и обработки данных о зеленых насаждениях. Они могут иметь

широкий набор функций: аналитический для специалистов (для разработки объективных градостроительных решений), информационно-просветительский для граждан (для их участия в общественном контроле), а также коммуникационный для развития самоуправления и соучаствующего проектирования, объединяя усилия стейкхолдеров в планировании системы городского озеленения. Эти принципы закреплены и в документации различных международных организаций [1].

Изучение морфологии городских зеленых насаждений в масштабах поселения имеет не только теоретическое, но и практическое значение для глубокого понимания общих экологических функций и эффектов от разных природных компонентов, а также для их применения в городском планировании и строительстве. При этом важным в морфологическом исследовании городских зеленых насаждений является оценка «формы», «распределения» и «паттерна», а также их взаимосвязь [2]. Целесообразно дополнять и уточнять данные анализа верхних уровней зеленой инфраструктуры, т. е. городских ландшафтов, изучением на нижнем уровне – отдельных растений и фитоценозов:

Таблица 1. Методы анализа уровней городской зеленой инфраструктуры (ГЗИ)

Уровень ГЗИ	Наполнение	Методы
Надсистема	Агломерация/конгломерация	Дистанционные (геоинформационные) с позиции геоэкологии
Система	Город	
Подсистема	Урочище	
Объект	Парк, бульвар и пр.	Натурные (полевые) с позиции биоэкологии
Группа	Рядовые, групповые посадки	
Элемент	Деревья, кустарники, травы	

На верхних уровнях ГЗИ целесообразно производить анализ таких экологических параметров, как фрагментарность, доля озелененных территорий от площади города и его районов, доля древесного покрова и особо охраняемых природных территорий (ООПТ) от общей площади озеленения, доступность объектов ГЗИ для жи-



^ Рис. 1. Фрагмент интерактивной карты и формы ввода данных ГИС Countree.ru в историческом центре Красноярска

телей [3]. А на нижних уровнях – оценку видового и возрастного разнообразия, яркости, состояния зеленых насаждений, а также функционального и экологического соответствия видов и пространственного расположения растений на территории для максимального предоставления экосистемных услуг [4].

Постоянное развитие цифровых технологий позволяет совершенствовать инструментарий исследователя. Особую роль приобретает применение беспилотных летательных аппаратов, которые могут выполнять различные функции в зависимости от используемого дополнительного оборудования. Например, производить аэрофотосъемку разных масштабов (имеющую более высокое разрешение в сравнении со спутниковыми снимками и позволяющую получить изображение в нужный момент времени) для подготовки ортофотопланов территории [5, 6], а также воздушное лазерное 3D-сканирование с целью получения высокоточных пространственных данных. Активно внедряется технология мобильного лазерного сканирования (например, в Краснодаре [7]).

Для сбора полевых данных также возможно применение датчиков, измеряющих эффективность зеленых насаждений в предоставлении экосистемных услуг в режиме реального времени (результаты измерений физиологических процессов деревьев в 16 устройствами в Москве представлены в [8]). При подключении инструментов машинного обучения возможно ускорить и автоматизировать оценку состояния ГЗИ по заданным критериям, после чего результаты анализа визуализируются с помощью различных ГИС-программ [5, 6]. Например, довольно популярным стал морфологический пространственный анализ (MSPA), позволяющий оценить связность ГЗИ, выявить ее структурные элементы, оценить их краевую зону (результаты применения в Москве представлены в [2], Грозном – в [9]).

Особенно наглядными для стейкхолдеров являются открытые интерактивные карты городских зеленых насаждений, наполняемые, как правило, в ходе полевых и дистанционных исследований и позволяющие проводить мониторинг состояния нижних уровней ГЗИ [10]. На интерактивной карте Красноярска отражена часть данных о зеленых насаждениях города, собранных

в ходе муниципальной инвентаризации [11]. В 2014 году в рамках работы над генеральным планом города были проведены воздушное лазерное сканирование и цифровая аэрофотосъемка, подготовлены ортофотопланы города и 3D-модель центральной его части.

В Красноярске разными коллективами вузов (экологами и биологами, архитекторами и градостроителями, IT-специалистами) изучается состояние городской зеленой инфраструктуры с использованием цифрового инструментария. В частности, в Институте космических и информационных технологий Сибирского федерального университета ведется работа над созданием автоматизированной системы мониторинга городских лесов и парков Красноярска на основе аэрофотосъемки и обучение цифровой модели для определения площади и состояния зеленых насаждений (подобная работа проводилась в Краснодаре под руководством А. В. Погорелова). Перечисленные мероприятия являются очень важными шагами к цифровизации управления ГЗИ.

В свою очередь, авторами также разрабатываются новые и используются существующие цифровые инструменты. Начиная с полевых исследований в 2018 году была создана геоинформационная система учета городских зеленых насаждений Countree.ru (руководитель проекта А. Н. Левасевич, координатор Д. В. Злобин, разработчик К. В. Богданов) [12], которая также была апробирована в 10 городах РФ и четырех городах Белоруссии. В Красноярске с 2018 года на интерактивную карту было внесено более 43 тысяч деревьев и кустарников (точечные объекты), апробирована функция добавления линейных (живые изгороди) и площадных (газоны, цветники, заросли и лесные массивы) объектов. Информация вносится в систему путем описания характеристик зеленых насаждений через форму ввода данных с прикреплением геопозиции. Данные перед публикацией проходят проверку кураторами. Фрагменты интерактивной карты (сайт) и формы ввода данных (приложение) представлены на рис. 1.

В результате формируется таблица атрибутов (фрагмент – на рис. 2), которую можно загрузить для дальнейшего анализа в QGIS и иные ГИС-программы. В 2022 году были разработаны программный интерфейс (API)



^ Рис. 3. Основные структурные элементы ГИС Countree.ru



^ Рис. 4. Пример группировки фотографий по органам растений в фотобазе

и подсистема импорта информации из внешних источников. Основные структурные элементы ГИС Countree.ru представлены на рис. 3.

С помощью цифровой инвентаризации были выявлены наиболее распространенные виды деревьев и кустарников по районам города, обнаружена корреляция между глубиной обрезки и состоянием растения. Оценены соответствие ассортимента произрастающих растений экологической обстановке территорий города, процент сухостойных деревьев, характер покрытия в приствольном круге деревьев. Изучен возрастной состав деревьев и другие их характеристики в различных районах города. Результаты применения данных инвентаризации в оценке состояния открытых общественных пространств Красноярска проиллюстрированы посредством специализированного языка программирования Python, предназначенного для обработки и визуализации информации через сравнительные гистограммы показателей, в работе Н. А. Унагаевой и соавторов [13].

Для каждого нового региона, подключаемого к ГИС Countree.ru, создается обособленная инсталляция со своей базой данных. При переводе интерфейса на иностранные языки возможно подключать пользователей из других стран. Рассматривается внедрение геймифицированного обучения пользователей, а также использование нейросетевых алгоритмов для проверки вносимых данных о зеленых насаждениях и автоматическое определение участков потенциального развития ГЗИ. Для обеспечения отказоустойчивости возможно разделение системы на отдельные микросервисы. Однако все эти работы требуют больших финансовых усилий и привлечения серьезных кадровых ресурсов.

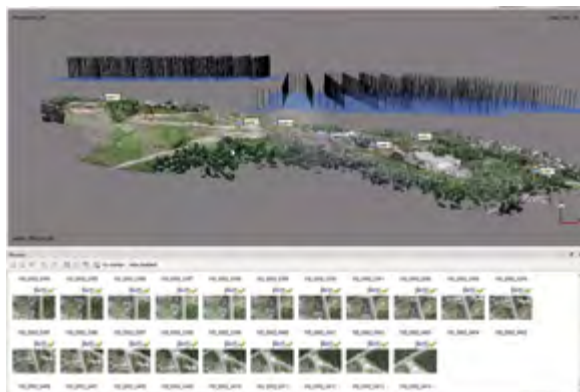
Поскольку определение биологического вида является наиболее сложным пунктом инвентаризации для начинающих пользователей, завершается разработка третьей версии автоматического определителя видов растений на основе нейросети (первая создавалась в 2020 году). Его создание было обусловлено тем, что существующие бесплатные продукты (Seek iNaturalist, PlantNet, «умная» камера Yandex и др.) до последнего времени не определяли с точностью до вида (а иногда – и до рода) многие произрастающие в Красноярске растения.

Первым шагом к его созданию стало формирование фотобаз 45 наиболее распространенных видов деревьев и кустарников (по 2000 фотографий на вид), включающих растения в разном состоянии, при этом фотосъемка производилась в разное время суток с разных ракурсов и устройств. Примечательно, что первая версия определителя, обученная на фотобазе, включавшей от 600 до 4000 фотографий для каждого вида, чаще выдавала результат в пользу растений, имевших большее количество снимков. Фотографии (рис. 4) были классифицированы по органам растения: листьям, плодам, цветкам, стволу (коре) или всему побегу (кроне), занимающим не менее 50% площади фотографии (такой подход используется и в приложении PlantNet).

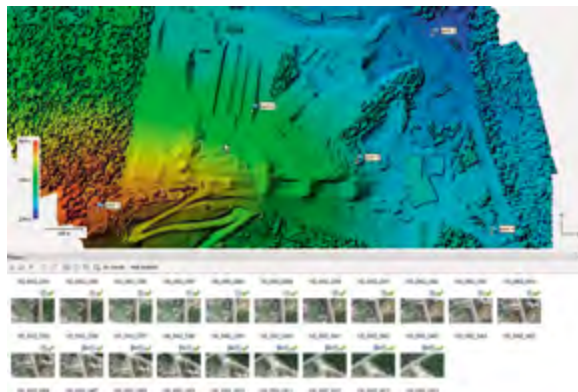
Обучение первой версии определителя было произведено на платформе машинного обучения с открытым исходным кодом TensorFlow Lite, после чего было разработано мобильное приложение, определявшее вид растения с видеопотока скоростью 60–200 мс камеры телефона. Следующие версии определителя разрабатывались на базе самостоятельно создаваемой платформы (исполнитель М. Ю. Салтыков). Потенциально ее можно

> Рис. 2. Фрагмент таблицы атрибутов Countree.ru

ID	Дата	Вид	Статус	Сунце	Мачка	Минист	Диаметр	Высота	Крона	Состояние	Окружение	Условия роста	Общая оценка	lat	lon
39900	2021-08-14	Клен непарнолистный	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	12,1	3	Полноценная, естественная	Рядомая или другая	Только почва/газон	хорошие	56,04803	92,88433
39954	2021-08-14	Ель (зел)	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	8,6	5	Полноценная, естественная	Проледа над кроной	Асфальт	хорошие	56,04777	92,88456
39957	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	8,2	4	Полноценная, естественная	Проледа над кроной	Только почва/газон	хорошие	56,04772	92,88416
39958	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	10,8	3	Глубоко обрез	Листья/ветви	Только почва/газон	удовлетворитель	56,04769	92,88418
39959	2021-08-14	Рябина обыкновенная	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	13,1	3	Полноценная, естественная	Только почва/газон	Только почва/газон	хорошие	56,04767	92,88419
39960	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	8,9	7	Полноценная, Листья/ветви	Проледа над кроной	Только почва/газон	удовлетворитель	56,04767	92,88419
39961	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	11,1	1	Глубоко обрез	Ветви/ветви	Только почва/газон	неудовлетворитель	56,04763	92,88421
39962	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	12,7	8	Полноценная, естественная	Проледа над кроной	Только почва/газон	хорошие	56,04757	92,88423
39963	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	11,5	1	Полноценная, естественная	Проледа над кроной	Только почва/газон	хорошие	56,04751	92,88426
39964	2021-08-14	Рябина обыкновенная	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	1	8	3	Полноценная, естественная	Проледа над кроной	Только почва/газон	хорошие	56,04745	92,88427
39965	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	11,1	5	Полноценная, Листья/ветви	Проледа над кроной	Только почва/газон	удовлетворитель	56,04745	92,88427
39966	2021-08-14	Ель сибирская	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	12,7	7	Полноценная, естественная	Проледа над кроной	Только почва/газон	хорошие	56,04741	92,88431
39967	2021-08-14	Рябина обыкновенная	2021-15-17	Кадриксантср	0	0	0	13,1	6	Полноценная, естественная	Только почва/газон	Только почва/газон	хорошие	56,04739	92,88433
39968	2021-08-14	Ель мельколистная	2021-1-4	Медведевскплет	0	0	1	3,8	6	Полноценная, естественная	Искусственные объект	Асфальт	хорошие	56,03423	92,90682



^ Рис. 5. Облако точек и цифровая модель местности МСК «Сопка»



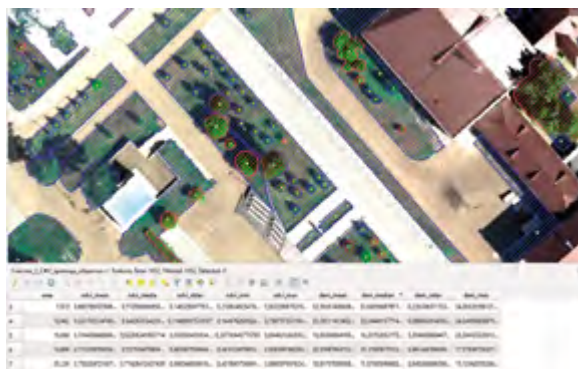
адаптировать для определения состояния и болезней растений [14] и иных характеристик, что станет очередным шагом в автоматизации процесса инвентаризации.

Переходя к дистанционным исследованиям, надо сказать, что под руководством Д. В. Злобина в 2021–2022 годах производилась аэрофотосъемка на различных высотах в мультиспектральном и RG-режиме и подготовка ортофотопланов нескольких участков городских лесов и общественных пространств (исполнитель Д. В. Емельянов).

Далее производилась обработка ортофотопланов (исполнитель З. А. Завьялов) в программном обеспечении Agisoft Metashape с построением облака точек, его геопривязка и классификация (растительность, земля, сооружения). В результате были выполнены цифровые модели местности (все точки), рельефа (класс «земля»), растительности и сооружений (рис. 5). Затем были построены калиброванный мультиспектральный фотоплан и карта вегетативного индекса NDVI местности.

Обработка данных производилась в программе QGIS. Деревья, кустарники и газоны были векторизованы, после чего создавались таблицы атрибутов со значениями вегетационного индекса NDVI, координат, площади и высоты (рис. 6), которые были загружены в ГИС Countree.ru отдельным слоем (пока скрыты). В результате анализа полученных значений выявлена корреляция между дисперсией значений индекса NDVI травянистого покрова и его состоянием.

На последнем этапе велось изучение связности городской зеленой инфраструктуры Красноярска картографическим методом исследования с использованием портала открытых пространственных данных OpenStreetMap и снимков со спутника Landsat [15]. В программе QGIS были построены полигоны с учетом границ межевания и кадастровой карты; заданы необходимые атрибуты, содержащие данные по типологии пространства, площади, принадлежности административному району. Таким образом, при помощи инструмента количественного анализа, математически обработав геометрические примитивы, были получены данные, которые легли в основу анализа существующего состояния системы зеленых насаждений Красноярска.



< Рис. 6. Фрагмент территории СФУ с векторизованными зелеными насаждениями и значениями индекса NDVI

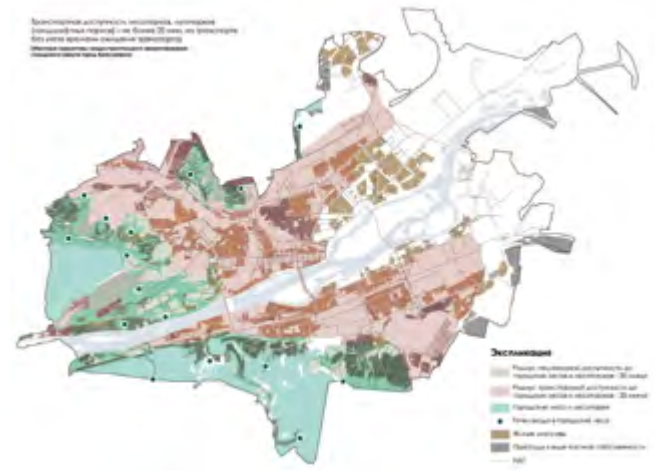


< Рис. 7. Динамика площади древесного покрова Красноярска в 2000–2022 годах

Тип зеленого каркаса города [3] – комбинация водно-зеленого диаметра и зеленых клиньев. За последние годы наблюдается сокращение площади древесного покрова (рис. 7), в основном в зеленых клиньях Советского (при строительстве объектов Универсиады 2019 года) и Свердловского районов (на территории фанпарка «Бобровый лог»), что отражает тенденцию к росту антропогенной нагрузки на экологические ядра и их деградацию. Восстановление древесного покрова происходило преимущественно на бывших промышленных и сельскохозяйственных территориях до момента,



^ Рис. 8. Основные разрывы водно-зеленого диаметра в водоохранной зоне рек Енисей, Кача, Базаиха, Бугач



^ Рис. 9. Анализ доступности городских лесов и лесопарков (исполнитель К. А. Фатеева)

пока они вновь не возвращались в хозяйственную деятельность города.

Анализ связности водно-зеленого диаметра (рис. 8) показал множественные разрывы в водоохранной зоне рек Енисей и Кача, включая участки сплошной застройки, закрытые территории и оstepненные склоны, для которых необходимы особые мероприятия по развитию ГЗИ, что должно быть закреплено в градостроительной документации. Дegrадация берегов рек города также отмечена в работе И. В. Кукиной и соавторов [16]. Более благоприятна ситуация в долине реки Базаихи.

Кроме того, отдельное внимание стоит уделить анализу доступности лесопаркового пояса Красноярска, проведенному с использованием информационного сервиса 2ГИС, где был построен двадцатиминутный пешеходный и транспортный маршрут (в соответствии с п. 9 «Местных нормативов градостроительного проектирования городского округа города Красноярска») от точек возможного «входа»/«въезда» в лесопарки и городские леса с учетом возможных пешеходных подходов и трассировки улично-дорожной сети (рис. 9). Выявлены преграды в качестве зон ИЖС и СНТ, сложного рельефа. Часть лесопаркового пояса попадает в зоны наименее доступных территорий. Таким образом, заявленный лесопарковый пояс в генеральном плане города не может быть использован на 100% в рекреационных целях, так как лишь незначительная его часть граничит с жилыми районами города непосредственно. Наиболее доступными и привлекательными в рекреационном плане для населения остаются

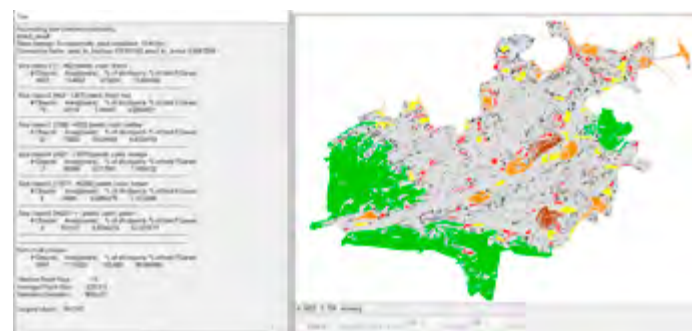
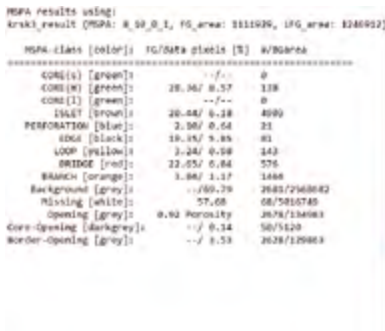
крупные и наиболее урбанизированные в настоящее время острова Енисея – Татышев и Отдыха.

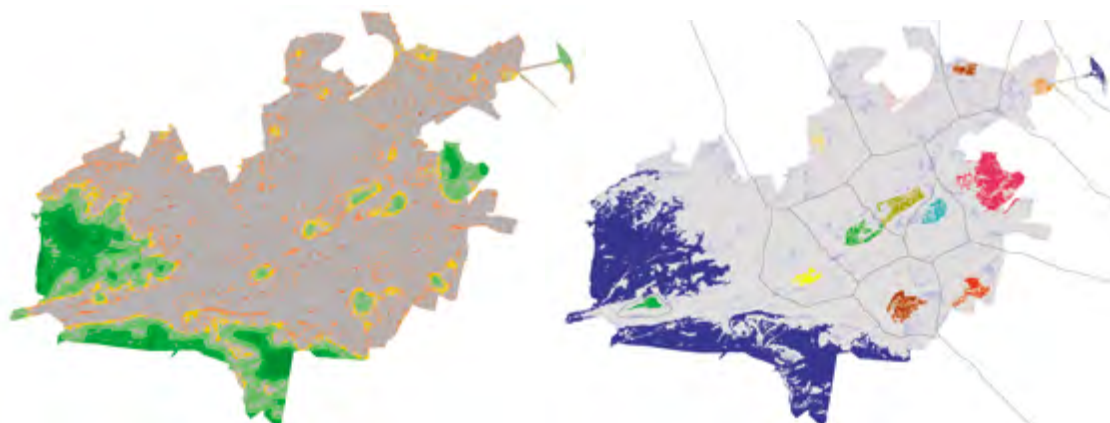
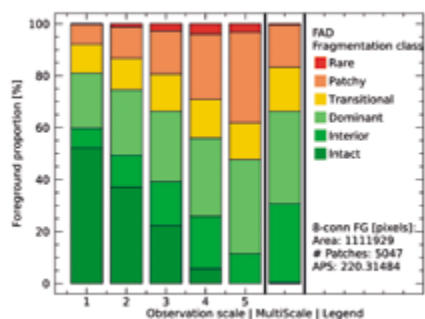
В завершение представим краткие результаты MSPA-анализа зеленой инфраструктуры Красноярска в программе GuidosToolbox. После преобразования растрового спутникового изображения в формат.geotiff и выделения на нем элементов ГЗИ, застроенных территорий и фона (вне границ города) были проведены классификация озелененных территорий города по площади (на шесть классов) с помощью функции Accounting (рис. 10), анализ краевой зоны и структурных элементов ГЗИ с помощью функции Fragmentation (рис. 11), FAD-анализ (плотности пикселей ГЗИ) (рис. 12) и зон влияния объектов ГЗИ (рис. 13).

В результате можно сделать вывод, что зеленая инфраструктура Красноярска не обладает целостностью и сильно фрагментирована. Современное состояние окружающей среды Красноярска требует изменения подхода к существующему нормированию в сторону усиления средостабилизирующих функций зеленых насаждений, учета оказываемых ими экосистемных услуг. Более того, в градостроительной документации не уделяется внимание сохранению и развитию существующих экологических ядер. Особого внимания требуют остров Татышев, антропогенное преобразование которого усилилось с 2020 года, и бывшая промышленная территория у восточной границы города, которая вовсе не учитывается в концепции зеленого каркаса генерального плана Красноярска 2022 года. Поэтому целесообразным явля-

v Рис. 11. Анализ краевой зоны и структурных элементов ГЗИ Красноярска

v Рис. 10. Классификация озелененных территорий Красноярска по площади





ется придание статуса ООПТ многим крупным площадным природным территориям, а также выделение буферных зон вокруг крупнейших объектов зеленого каркаса.

Таким образом, применение цифровых инструментов позволяет расширить возможности моделирования системы городского озеленения, а также сбора, анализа и визуализации данных о ней для широкого круга пользователей, что создает пространство для совместного планирования и проектирования различных уровней городской зеленой инфраструктуры. Данная задача является актуальной для Красноярска. Часть рассмотренных цифровых инструментов уже внедряется отдельными специалистами, но нуждается в интеграции для всесторонней оценки состояния зеленой инфраструктуры города и разработки рекомендаций по ее развитию.

Литература

1. Møller, M. S., Olafsson, A. S. The Use of ETools to Engage Citizens in Urban Green Infrastructure Governance: Where Do We Stand and Where Are We Going? // *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10, Issue 10. – P. 3513.
2. Hao Zou, H., Wang, X. Progress and Gaps in Research on Urban Green Space Morphology: A Review // *Sustainability*. – 2021. – 13(3).
3. Климанова, О. А., Колбовский, Е. Ю., Илларионова О. А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. – Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2020. – 324 с.
4. Румянцев, Д. Е., Фролова, В. А. Методологические подходы к изучению разнообразия экосистемных услуг зеленых насаждений в мегаполисе // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2019. – № 10-2. – С. 28–34.
5. Moreno-Armendáriz, M. A. et al. Deep Green Diagnostics: Urban Green Space Analysis Using Deep Learning and Drone Images // *Sensors*. – 2019. – 19(23). – P. 5287.
6. Thomazella, R. et al. Environmental Monitoring Using Drone Images and Convolutional Neural Networks // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018. – DOI:10.1109/IGARSS.2018.8518581
7. Погорелов, А. В., Брусило, В. А., Граник, Н. В. Моделирование объектов озеленения города по данным мобильного лазерного сканирования // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 5–17.
8. Matasov, V. et al. IoT monitoring of urban tree ecosystem services: possibilities and challenges // *Forests*. – 2020. – 11(7). – DOI:10.3390/f11070775
9. Петров, Л. А., Колбовский, Е. Ю. Современные методы пространственного анализа зеленой инфраструктуры урбанизированных территорий (на примере города Грозного) // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. – 2020. – Т. 5, № 3(21). – С. 39–51.
10. Злобин, Д. В. Анализ информационных систем инвентаризации городских зеленых насаждений // *Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие территорий» (Москва, 30–31 мая 2022 г.)*. – Москва, 2022. – С. 129–134.
11. Интерактивная карта города Красноярска. – URL: web-gis.admkrsk.ru (дата обращения: 31.05.2023).

12. Информационная система учета зеленых насаждений Countree.ru. – URL: countree.ru (дата обращения: 31.05.2023).
13. Унагаева, Н., Федченко И., Липовка А. и др. Потенциалы развития открытых общественных пространств Красноярска // *Проект Байкал*. – 2021. – Т. 18, № 70. – С. 100–111.
14. Ramcharan, A. A. et al. Mobile-Based Deep Learning Model for Cassava Disease Diagnosis // *Frontiers in plant science*. – 2019. – Vol. 10. – 8 p.
15. Hansen, M. C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. – URL: glad.earthengine.app/view/global-forest-change (дата обращения: 31.05.2023).
16. Кукина, И. Федченко И., Липовка А. и др. Развитие планировочной структуры Красноярска // *Проект Байкал*. – 2022. – Т. 19, № 71. – С. 79–91.

References

Hansen, M. C. et al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. DOI: 10.1126/science.1244693

Informacionnaya sistema ucheta zelenyh nasazhdenij [Green space accounting Information System]. Countree. Retrieved May 31, 2023, from countree.ru.

Interaktivnaya karta goroda Krasnoyarska [Interactive map of the city of Krasnoyarsk]. (n.d.). Retrieved May 31, 2023, from web-gis.admkrsk.ru.

Klimanova, O. A., Kolbovskij, E. Yu., & Illarionova, O. A. (2020). *Zelenaya infrastruktura goroda: ocenka sostoyaniya i proektirovanie razvitiya [Green infrastructure of the city: assessment of the state and design of development]*. Moscow: Tovarishestvo nauchnyh izdaniy KMK.

Kukina, I. et al. (2022). Development of Krasnoyarsk planning structure. *Project Baikal*, 19(71), 79-91. DOI: 10.51461/projectbaikal.71.1945.

Matasov, V. et al. (2020). IoT monitoring of urban tree ecosystem services: possibilities and challenges. *Forests*, 11(7), 775. DOI: 10.3390/f11070775.

Møller, M. S., & Olafsson, A. S. (2018). The Use of ETools to Engage Citizens in Urban Green Infrastructure Governance: Where Do We Stand and Where Are We Going? *Sustainability*, 10(10), 3513. DOI: 10.3390/su10103513.

Moreno-Armendáriz, M. A. et al. (2019). Deep Green Diagnostics: Urban Green Space Analysis Using Deep Learning and Drone Images. *Sensors*, 19(23), 5287. DOI: 10.3390/s19235287.

Petrov, L. A., & Kolbovskij, E. Yu. (2020). Sovremennyye metody prostranstvennogo analiza zelenoj infrastruktury urbanizirovannyh territorij (na primere goroda Groznogo) [Modern methods of spatial analysis of the green infrastructure of urbanized territories (on the example of the city of Grozny)]. *Grozny Natural Science Bulletin*, 5(3(21)), 39-51.

Pogorelov, A. V., Brusilo, V. A., & Granik, N. V. (2018). Modelirovanie obyektov ozeleneniya goroda po dannym mobilnogo lazernogo skanirvaniya [Modeling of urban landscaping objects based on mobile laser scanning data]. *InterCarto. InterGIS*, 24(2), 5–17.

Ramcharan, A. A. et al. (2019). Mobile-Based Deep Learning Model for Cassava Disease Diagnosis. *Frontiers in plant science*, 10, 272. DOI: 10.3389/fpls.2019.00272.

Rumyantsev, D. E., & Frolova, V. A. (2019). Metodologicheskie podhody k izucheniyu raznoobraziya ekosistemnyh uslug zelenyh nasazhdenij v megapolise [Methodological approaches to the study of the diversity of ecosystem services of green spaces in the metropolis]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 10(2), 28-34.

Thomazella, R. et al. (2018). Environmental Monitoring Using Drone Images and Convolutional Neural Networks. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518581.

Unagaeva, N. et al. (2021). Development potentials of Krasnoyarsk open public spaces. *Project Baikal*, 18(70), 100-111. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1898.

Zlobin, D. V. (2022). Analiz informacionnyh sistem inventarizacii gorodskih zelenyh nasazhdenij [Analysis of information systems for inventory of urban green spaces]. *Sbornik докладov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Ustojchivoje razvitie territorij" [Collection of reports of the IV International Scientific and Practical Conference "Sustainable development of territories"]* (pp.129-134). Moscow: MISI – MGSU Publishing House.

Zou, H., & Wang, X. (2021). Progress and Gaps in Research on Urban Green Space Morphology: A Review. *Sustainability*, 13(3), 1202. DOI: 10.3390/su13031202.