

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

REMOTE METHODS IN EARTH RESEARCH

УДК: 912.4

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-249-262

Т.Б. Акынжанов¹, В.С. Дехнич², В.Р. Битюкова³

ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ПРИДОМОВОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ В Г. НУР-СУЛТАН НА ОСНОВЕ 3D-МОДЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена оценке масштабов развития и размещения одного из самых уязвимых и плохо информационно обеспеченных видов зеленых насаждений города – придомового озеленения. Как правило, придомовое озеленение юридически не регламентировано и при реализации проектов реновации городской застройки разрушается в первую очередь. Придомовое озеленение исследовано на примере города Нур-Султан, в котором, с одной стороны, в силу природных условий, оно наиболее уязвимо, а с другой – достаточно ценно для столичной городской среды. Крупномасштабная оценка проведена с применением беспилотных летательных аппаратов, которые показали высокую эффективность в деле оценки вертикальной и горизонтальной структуры придомового озеленения и других элементов города. В результате аэрофотосъемки для репрезентативных ключевых участков была получена серия ортофотопланов с горизонтальным разрешением 3–4 см и цифровых моделей местности с горизонталь-

¹ Казахстанский филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Кафедра экологии и природопользования, ул. Кажымукана, д. 11, 010000, Нур-Султан, Республика Казахстан; *e-mail*: bejlukuu6874@mail.ru

² Казахстанский филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Кафедра экологии и природопользования, ул. Кажымукана, д. 11, 010000, Нур-Султан, Республика Казахстан; *e-mail*: vodo.ast@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail*: v.r.bitjukova@geogr.msu.ru

ным разрешением 3 см и вертикальным разрешением около 4 см. Это позволило выделить 12 исторически сложившихся морфотипов городской застройки, характеризующихся разным уровнем и типом придомового озеленения. С помощью трехмерной модели озеленения рассчитан средний размер биомассы и плотность на 1 м² площади в выделенных морфотипах застройки придомового озеленения. Территориальные различия определяются длительностью освоения, близостью к реке, характером застройки и нормами градостроительного проектирования периода формирования морфотипа. Потери ПО при реализации программы реновации по современному Генеральному плану без учета восстановления для города Нур-Султан составят около 11,5 % (+/-3,5 %) древесного покрова города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городское озеленение, трехмерное моделирование, крупномасштабные оценки, картографирование городских зеленых насаждений, БПЛА

Tolegen B. Akynzhanov¹, Vladimir S. Dekhnich², Victoria R. Bitykova³

LOCAL LANDSCAPING DEVELOPMENT ASSESSMENT IN NUR-SULTAN BASED ON 3D MODELS CONSTRUCTED WITH THE APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT

ABSTRACT

The article describes the assessment of the areas and spatial distribution of adjoining green spaces as one of the most vulnerable and low studied kind of green spaces in cities. Usually gardening near the residential houses is not legally regulated is being destroyed during the implementation of urban renovation projects. The characteristics of adjoining green spaces were assessed for the city of Nur-Sultan, where, on the one hand, natural properties make green spaces vulnerable, and on the other hand, the acquisition of capital functions increases the value for the urban environment. A large-scale assessment, carried out using unmanned aerial vehicles, has demonstrated its high efficiency in assessing the vertical and horizontal structure of adjacent green spaces and other elements of the city. As a result of aerial imagery sessions for representative key points, a series of orthophotomaps with the horizontal resolution of 3–4 cm and digital terrain models with a horizontal resolution of 3 cm and a vertical resolution of about 4 cm were obtained. These products provided possibility to identify 12 historically established morphotypes of urban buildings, characterized by different levels and types of adjacent landscaping. Using a three-dimensional model of green cover, the average size of the biomass and the density of biomass per 1 m² of the area in the selected morphotypes of the building were calculated. Territorial differences of adjoining green spaces in the different morphotypes depend on the period of construction, distance from the river, types of the building and urban planning standards typical for the period of the morphotype forming. Losses of the adjoining green spaces during the implementation of the renovation program according to the modern General Plan, excluding restoration, for the city of Nur-Sultan, will be mor than 11.5 % (+/-3,5 %) of the city's tree cover.

KEYWORDS: green spaces in cities, 3D-modelling, large scale assessments, mapping of urban green spaces, unmanned aerial vehicles

¹ Lomonosov Moscow State University, Kazakhstan Branch, The Department of Ecology and Environmental Management, Kazhymukan street, 11, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan; *e-mail:* bejlukuu6874@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Kazakhstan Branch, The Department of Ecology and Environmental Management, Kazhymukan street, 11, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan; *e-mail:* vodo.ast@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* v.r.bityukova@geogr.msu.ru

ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущих требований населения к качеству городской среды повышенное внимание все чаще уделяется планированию общественных пространств и развитию зеленых насаждений, которые выполняют в городах ряд важных функций, включая снижение шумовой нагрузки; улучшение микроклимата прилегающей застройки; регулирование ветрового режима. Зеленые насаждения также повышают привлекательность района проживания, положительно влияют на цену жилой недвижимости.

Особенно важным элементом системы зеленых насаждений города является *придомовое озеленение* (ПО), так как его экологическими услугами жители городов пользуются ежедневно, в отличие от крупных по площади парковых насаждений, часто распределенных в пределах города неравномерно и удаленных от места жительства многих горожан. ПО обеспечивает усиление связанности всей системы зеленых насаждений города, их разнообразия и целостности. Одновременно ПО является крайне уязвимым (и в правовом, и в природном плане) элементом зеленых насаждений города, искусственно созданных в процессе городского развития. Юридическая неопределенность приводит к тому, что при трансформации городской застройки именно ПО разрушается в первую очередь. В градостроительном проектировании понятие «ПО» только начинает использоваться, например, есть работы о тенденции развития озеленения придомовых территорий [Коробова, Тлустая, 2017]. А в основном до этого изучались: зеленая инфраструктура [Климанова и др., 2016], природно-экологический каркас [Гриднев и др., 2010], экологический каркас [Владимиров, 1980, 1982; Колбовский, 1999] и т.д.

Для оптимизации городского пространства важна крупномасштабная оценка взаиморасположения зеленых насаждений и других элементов города, а также их внутренней структуры, включая вертикальные свойства, такие как: средняя высота и амплитуда высот растительного покрова, соотношение высоты древесного яруса и прилегающих зданий, объем биомассы и др.

Традиционно для исследования зеленой инфраструктуры в городах используются такие источники данных, как полевые исследования, многоканальные космические снимки и топографические карты. Перечисленные источники не дают точной и достоверной информации о площадях, состоянии и качестве ПО, а также о вертикальной структуре и временной динамике. Так, разрешение большинства космических снимков, находящихся в открытом доступе, превышает 15 м, в то время как средняя площадь отдельно взятых озелененных участков в жилых массивах составляет от 2 до 10 000 м². Следовательно, в один пиксель снимка может попасть как ПО, так и другие объекты, что значительно затрудняет анализ и искажает полученные результаты. Доступные широкому кругу пользователей цифровые модели SRTM, ASTER и Sentinel также характеризуются недостаточно высоким горизонтальным разрешением для исследования ПО и, кроме того, не позволяют извлечь свойства вертикальной структуры ПО. С развитием беспилотных летательных средств (БПЛА) и их съемочных систем, становится возможным применять в исследовании ПО в городах данные сверхвысокого разрешения. Так, современные БПЛА способны осуществлять съемку, на базе которой возможно получить ортофотопланы разрешением до 3 см; трехмерные модели, цифровые модели местности и цифровые модели рельефа с горизонтальным разрешением до 3 см и вертикальным – до 2 см.

Помимо очевидных преимуществ применение данных аэрофотосъемки в исследовании ПО имеет и определенные недостатки. Так, во многих государствах устанавливаются ограничения на полеты БПЛА и аэрофотосъемку; некоторые сложности при автоматическом дешифрировании и оценке горизонтальной и вертикальной структуры ПО могут внести погодные условия и состояние атмосферы; для обработки данных сверхвысокого разрешения требуется большое количество машинных мощностей. С учетом указанных недостатков актуальна разработка методов, алгоритмов и метрик, позволяющих получать точные оценки горизонтальной

и вертикальной структуры ПО и нивелировать сложности, характерные для применения данных сверхвысокого разрешения. Попытки разработать такие метрики и алгоритмы содержатся в работах исследователей [Ziyue et al, 2014], которые с использованием авторских алгоритмов, основанных на данных сверхвысокого разрешения, выявили различие в вертикальной структуре британских городов Кэнви и Кембридж. Оба города одинаковы по площади застройки и зеленых насаждений, но анализ вертикальной структуры показал, что из-за существования больших зданий колледжей в Кембридже и большой доли одноэтажных домов в Кэнви, средняя высота зданий в Кембридж намного выше, чем в Кэнви. Что касается деревьев, то средняя высота деревьев близка к средней высоте здания в обоих случаях. Таким образом, при схожей горизонтальной структуре вертикальная структура ПО и выполняемые им функции могут существенно отличаться.

В данной работе мы представляем методику, которая позволяет получить информацию о таких свойствах ПО, как: высота, объем и площадь отдельной сомкнутой кроны. Применение разработанной методики позволит произвести инвентаризацию ПО в различных районах городов, а также сделает возможным прогнозирование потерь ПО при реализации генеральных планов городов.

Методические разработки авторов были апробированы на территории г. Нур-Султан – столицы Республики Казахстан и второго по численности населения города страны. В качестве исследуемой территории был выбран именно г. Нур-Султан, что обусловлено рядом причин. В природном плане ПО города очень интересны, поскольку город расположен в зоне сухих степей, где развитие придомового озеленения осложнено резко-континентальным климатом с суровыми зимами, сильными ветрами, значительным дефицитом влажности и резкими сменами температур в пределах суток [Гвоздецкий, Николаев, 1971]. В социально-экономическом плане произошла существенная трансформация его функций, усилился постиндустриальный вектор его развития, сегодня Нур-Султан выполняет прежде всего административную функцию. Большинство промышленных предприятий города расположены на значительном удалении от жилых зон. В архитектурно-планировочном аспекте город активно развивался в период после получения столичного статуса и продолжает развиваться в настоящее время, в связи с чем происходит активное замещение морфотипов застройки, сопровождающееся изменением площадей, горизонтальной и вертикальной структуры и породного состава ПО. Наличие разнообразных морфотипов позволяет проследить различие в структуре ПО и выявить тенденции его изменения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенностью ПО в городах является относительно небольшая площадь отдельно взятых озелененных участков. Низкое разрешение космических снимков, имеющих в открытом доступе, не позволяет использовать их для исследования ПО. Кроме того, для получения полной и объективной информации о состоянии и свойствах ПО важно рассмотреть не только проективное покрытие насаждений, но и их вертикальные свойства, такие как: средняя высота, амплитуда высот, объем биомассы.

Первичная информация, пригодная для анализа описанных выше свойств, может быть получена с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В данной работе мы использовали DJI Mavic PRO Platinum. Его камера с матрицей 1/2.3" CMOS на 12 Мп дает возможность получать высококачественные фотоснимки в разрешении до 4К (3840 на 2160 пикселей). Благодаря тому, что она закрепляется на 3-осевом стабилизаторе, количество шумов и артефактов на получаемом изображении минимально¹.

¹ <https://www.dji.com/ru/mavic-pro-platinum> – Официальный сайт DJI

Для анализа ПО город Нур-Султан был разбит на морфотипы. Морфотип застройки – типологическая единица пространственной структуры городских образований с характерным набором типов жилой застройки и параметрических показателей, которая может являться единицей оценки различных параметров внутригородского пространства. Морфотип отражает содержание, функциональную наполненность, ценностные характеристики архитектурного пространства, т.е. фактически все факторы, которые влияют на ПО.

Классификация морфотипов была выполнена на основании материалов ТОО «Надир», которые включали в себя базу данных с информацией об этажности, годах постройки и строительных материалах жилых зданий.

В результате было выделено 12 типов, сочетающих в себе: характеристики придомового озеленения, рисунок застройки, расположение в пределах города и форму дорожной сети (рис. 1): частная застройка первой половины XX в., дачные участки в пределах города, смешанный морфотип 3–5-этажной застройки 1950–1960-х гг., морфотипы 5-этажной застройки 1960-х гг. (со сложной структурой), микрорайоны 5-этажной застройки 1970-х гг. (с замкнутыми придомовыми пространствами), более поздняя застройка 5-ти и 9-ти этажными домами, трансформированная частная застройка с высокой долей коттеджей или высотных домов, коттеджная застройка и многоэтажные жилые комплексы.

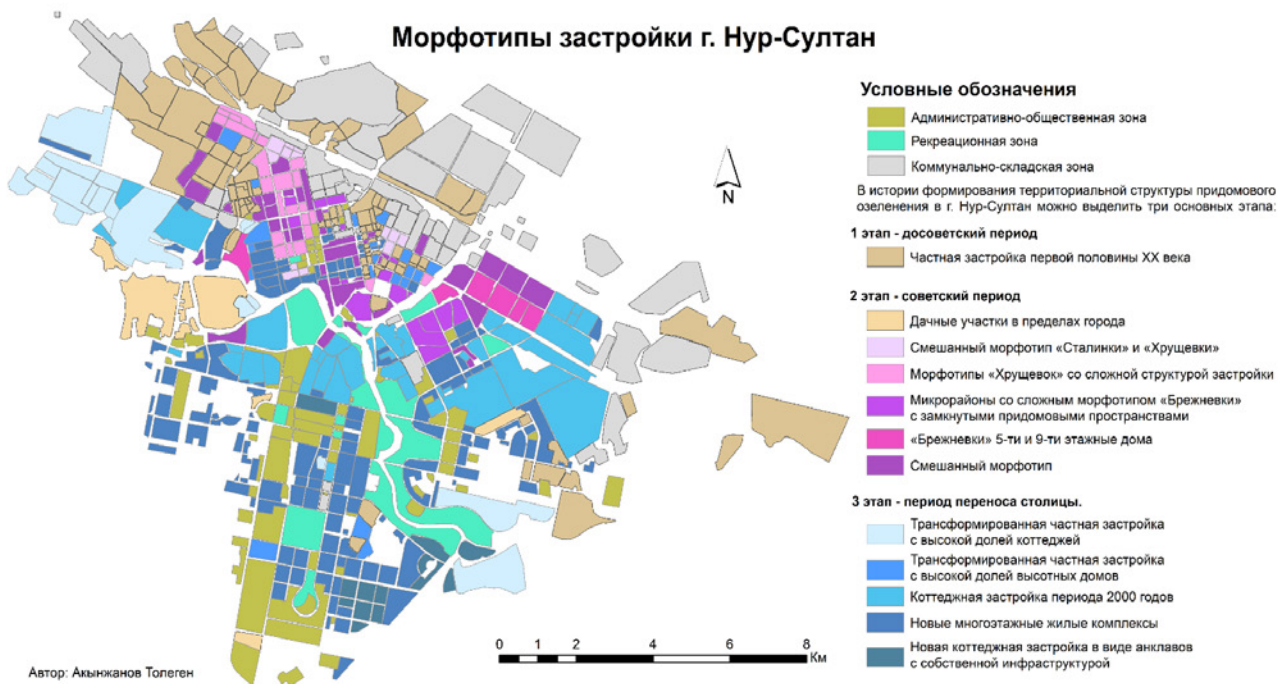


Рис. 1. Морфотипы застройки г. Нур-Султан

Источник: составлено авторами на основе собственных наблюдений и данных ТОО «Надир»
 Fig. 1. Morphotypes of the Nur-Sultan development Source: compiled by the authors on the basis of their own observations and data from Nadir LLP

Съемка с БПЛА проводилась по репрезентативным ключевым участкам морфотипов. Для каждого морфотипа выделялся участок на левобережье (вновь застраиваемые районы) и правобережье (исторически освоенные районы) реки Есиль. Эти районы относятся к разным этапам застройки, и правый берег традиционно считается более озелененным. Ключевые участки были выбраны в разных районах города с использованием космических снимков в видимом диапазоне, предоставленных системой Google Earth. Ключевые участки выбирались так, чтобы по своему содержанию они были наиболее типичными представителями опреде-

ленного морфотипа, то есть на основании следующих критериев: площадь жилой застройки, площадь зеленых насаждений, площадь запечатанных территорий, этажность зданий и внутренняя планировка морфотипа. Для морфотипов, обладающих гетерогенной структурой ПО и неравномерным распределением их площади (смешанный морфотип, трансформированная частная застройка и др.), выделялись ключевые участки большей площади, чем для морфотипов с гомогенной структурой ПО (дачные участки в пределах города, однородные массивы коттеджной застройки и др.).

Особое внимание уделялось также тому, чтобы внутри морфотипа не было крупных зеленых массивов, если это не является типичным для морфотипа. Всего было исследовано 16 ключевых участков. За рамками исследования осталось два морфотипа: трансформированная частная застройка с высокой долей высотных домов и новая коттеджная застройка в виде анклавов с собственной инфраструктурой, так как репрезентативные участки данных морфотипов находились в зоне влияния аэропорта, где полеты квадрокоптеров запрещены.

Высота полета во время съемки варьировала от 60 до 100 м для различных ключевых участков (табл. 1) в зависимости от характера застройки. В качестве опорных точек для увеличения точности привязки использовались хорошо различимые объекты с измеренными координатами. В пределах участков располагалось не менее 4 контрольных точек. Полет производился в режиме автоматического пилотирования под наблюдением оператора с применением ПО «DroneDeploy». Маршрут полета обеспечивал продольное и поперечное перекрытие снимков не менее 75 %. В данной работе средняя квадратическая ошибка для ключевых участков (оцененная по контрольным точкам) составляет около 17 см, что согласуется со значениями точности, достигнутыми в исследованиях, выполненных аналогичными методами [Elkharhy, 2020].

Площадь охваченных съемкой ключевых участков обеспечивает покрытие более 1 % для всех морфотипов с многоэтажной застройкой (табл. 1), для которых характерна гетерогенная структура ПО. Покрытие менее 1 % общей площади обеспечивается для морфотипов, занятых дачной и усадебной застройкой, для которых свойственна гомогенная структура зеленых насаждений. В целом площадь охваченных съемкой ключевых участков составляет около 2 % застроенной территории города.

Табл. 1. Характеристики ключевых участков, исследованных с применением БПЛА
Table 1. Characteristics of key plots surveyed with the appliance of UAV

Морфотип	Высота полета (м)	Общая площадь морфотипа в пределах города (км ²)	Покрытие морфотипа ключевыми участками (%)
«Брежневки»: 5-ти и 9-ти этажные дома	100	1,80	15,63
Трансформированная частная застройка с высокой долей коттеджей	70	10,20	3,14
Частная застройка первой половины XX века	70	21,11	0,17
Коммунально-складская зона, включающая гаражи и торговые точки	100	25,34	0,34
Смешанный морфотип: «сталинки» и «хрущевки»	100	0,74	19,76
Рекреационная зона	100	8,01	2,83
Смешанный морфотип	100	5,55	3,42
Административно-общественная зона	80	11,25	1,42

Морфотипы «хрущевок» со сложной структурой застройки	90	2,15	3,14
Микрорайоны со сложным морфотипом: «брежневки» с замкнутыми придомовыми пространствами	90	2,30	4,51
Новые многоэтажные жилые комплексы	100	16,71	1,05
Дачные участки в пределах города	60	4,48	0,54
Коттеджная застройка периода 2000-х годов	60	14,98	0,43

В дальнейшем, путем экстраполяции полученных результатов на всю площадь морфотипа, проводился анализ фактического распространения ПО и давался прогноз его дальнейшего развития. Точность экстраполяции проверялась сравнением удельного объема биомассы на ключевых участках в пределах схожих морфотипов, расположенных в различных районах города.

Блок-схема этапов исследования представлена на рис. 2.

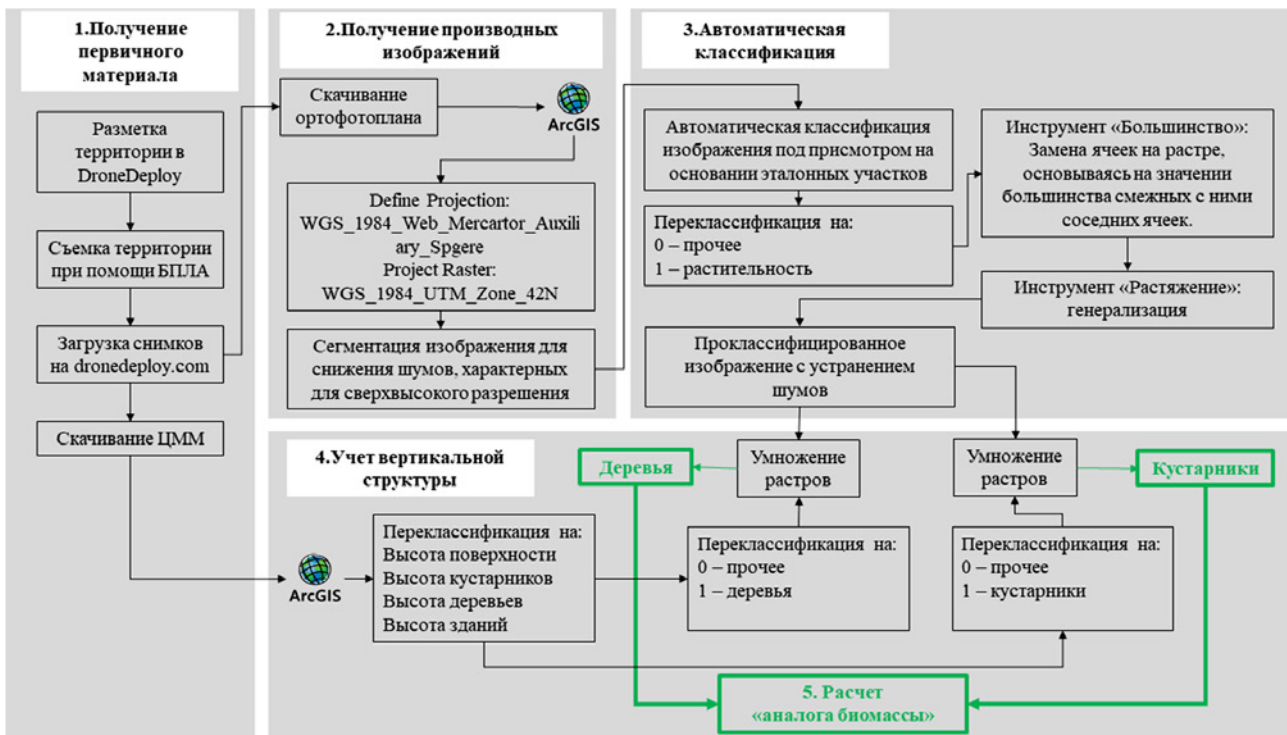


Рис. 2. Схема дистанционной съемки репрезентативных участков придомового озеленения с ее последующей обработкой

Fig. 2. The principal scheme of the representative key plots adjoining green spaces remote sensing and the processing of data

1. Получение первичного материала состояло из трех этапов:

1.1. Разметка территории в приложении DroneDeploy (для того, чтобы определить примерное время полета БПЛА и количество необходимых аккумуляторов).

1.2. Съемка территории при помощи БПЛА. Съемка проводилась как можно ближе к 12:00, чтобы избежать возможных теней (так как Солнце в зените), которые в дальнейшем затрудняют автоматическое дешифрирование. Съемка проводилась в осеннее время года, так как желтая листва намного легче дешифрируется, чем зеленая, при автоматическом дешифрировании.

1.3. Создание ортофотоплана территории и цифровой модели местности (ЦММ). Построение ЦММ производилось по следующим этапам¹:

1.3.1. *Выравнивание снимков.* Положение камеры в момент съемки определяется элементами внутреннего и внешнего ориентирования. Элементы внутреннего ориентирования включают фокусное расстояние камеры, координаты главной точки снимка и коэффициенты дисторсии объектива. Для вычисления используются уравнения коллинеарности. Фототриангуляция позволяет совместно уравнивать результаты фотограмметрических измерений связующих точек с результатами бортовых измерений. Таким образом, определение элементов внешнего ориентирования кадров получается наиболее точным. В результате процесса выравнивания определяются элементы внешнего ориентирования камеры и уточняются элементы внутреннего ориентирования.

1.3.2. *Построение плотного облака точек.* Программа вычисляет карты глубины для каждой камеры, основываясь на их рассчитанных положениях. А затем на основании карт глубины строят плотное облако точек. Полученное облако используется для построения карты высот (рис. 3).

1.3.3. *Построение ЦММ.*

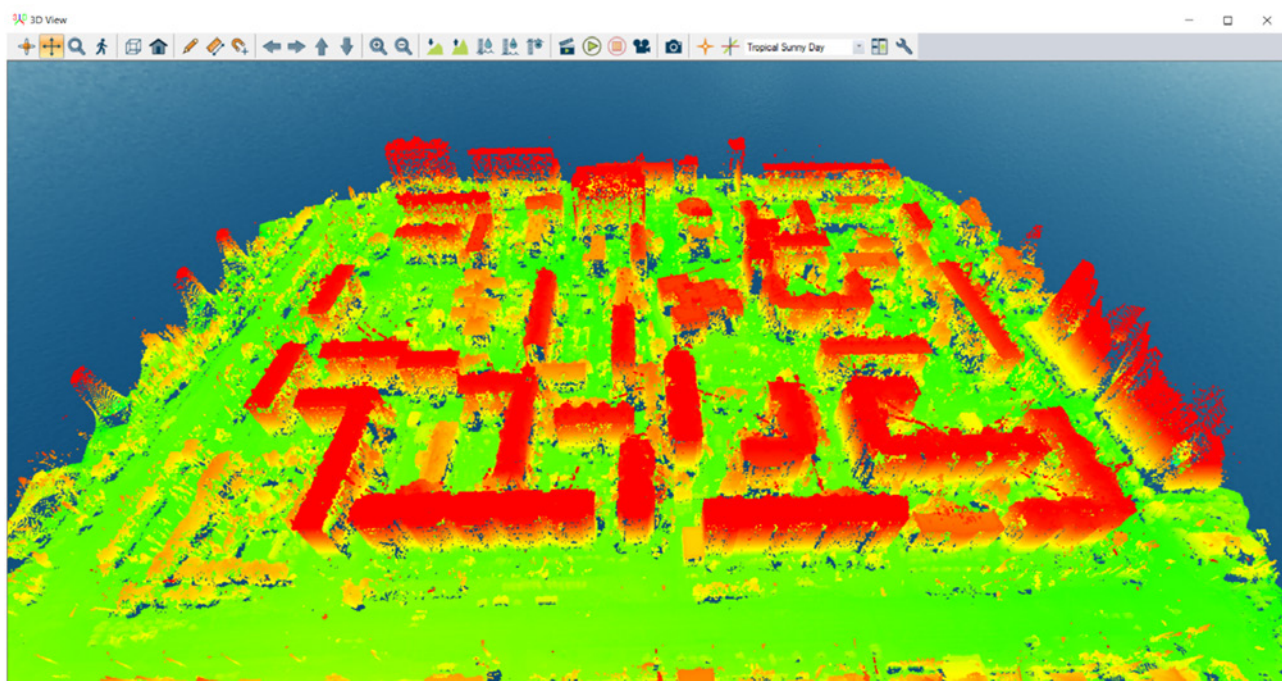


Рис. 3. Облако точек (на примере одного из репрезентативных ключевых участков)

Fig. 3. Point cloud (example of the representative key plot)

2. Получение производных изображений состояло из двух этапов:

2.1. Изменение системы координат ортофотоплана с WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere на WGS_1984_UTM_Zone_42N.

2.2. Сегментация изображения для снижения шумов, характерных для сверхвысокого разрешения (рис. 4).

¹ Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 1.6

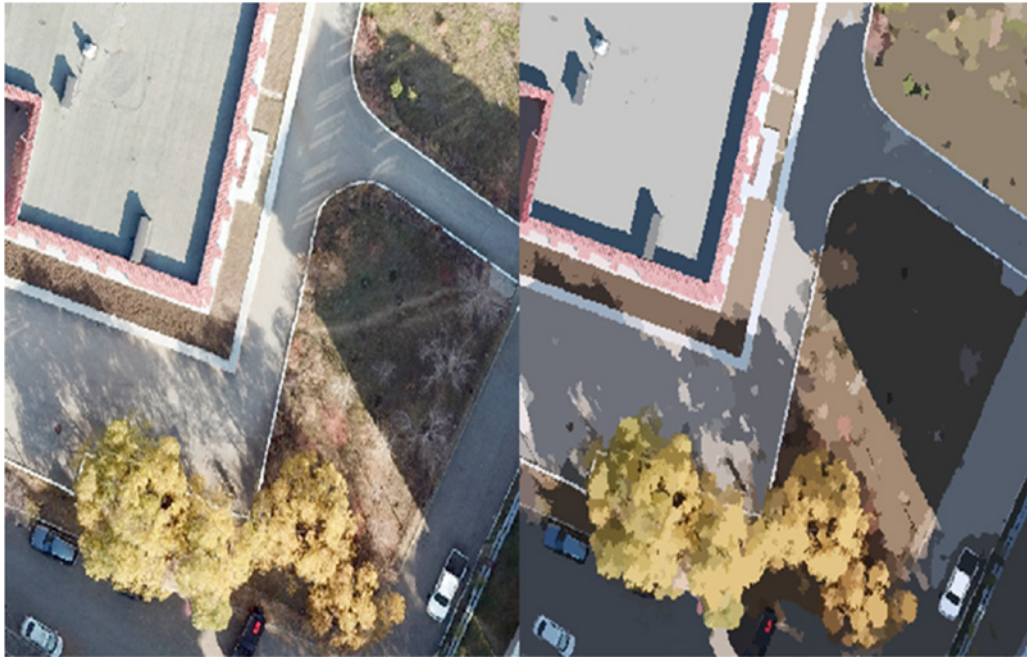


Рис. 4. Результат сегментации (слева «до сегментации», справа «после сегментации»)
 Fig. 4. The result of image segmentation process (left image – «before the segmentation»;
 right image – «after segmentation»)

3. Автоматическая классификация состояла из трех этапов:

3.1. Автоматическая классификация с обучением на основании эталонных участков, которые были выделены авторами, методом визуальной интерпретации снимков. Результатом классификации является изображение, каждый пиксель которого отнесен к определенному классу по соотношению яркости в различных каналах снимка.

3.2. Объединение дешифрованных объектов в 2 класса: прочее и растительность.

3.3. Устранение шумов с применением двух инструментов:

3.3.1. Инструмент «Majority Filter» («Фильтр большинства»): Замена ячеек на растре, основываясь на значении большинства смежных с ними соседних ячеек.

3.3.2. Инструмент «Expand»: генерализация, то есть объединение близко стоящих пикселей одного класса.

4. Учет вертикальной структуры состоял из трех этапов:

4.1. Работа с ЦММ:

4.1.1. Переклассификация ЦММ на 4 класса с учетом атрибута высоты: незадернованная поверхность, кустарниковая растительность, древесная растительность, здания и другие антропогенные объекты. Дешифрирование объектов происходило на основании ортофотоплана и данных натурных исследований.

4.1.2. Переклассификация 4.1.1 на 2 класса:

4.1.2.1. 0 – прочее, 1 – древесная растительность

4.1.2.2. 0 – прочее, 2 – кустарниковая растительность

4.2. Умножение растров.

4.2.1. Полученное на 3 шаге изображение (где 0 – это прочее, а 1 – это растительность) необходимо умножить на 4.1.2.1., что позволит определить высоту древесной растительности.

4.2.2. Полученное на 3 шаге изображение (где 0 – это прочее, а 1 – это растительность) необходимо умножить на 4.1.2.2., что позволит определить высоту кустарниковой растительности.

4.3. Векторизация, позволяющая конвертировать изображение в shapefile и проводить необходимые вычисления для отдельно взятых озелененных участков, то есть производить анализ на уровне объектов.

5. Расчет «аналога биомассы»

5.1. Расчет «аналога биомассы» (формула 1), определяемого как объем призмы, занимаемой кроной дерева или кустарника, путем умножения площади основания на высоту:

$$V_{\text{по}} = S \cdot \left(\frac{Д}{100} \right) \cdot h_{\text{д}} + S \cdot \left(\frac{К}{100} \right) \cdot h_{\text{к}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{по}}$ – объем придомового озеленения, м³; S – площадь морфотипа, м²; $Д$ – процент площади, занимаемой деревьями в морфотипе, %; $h_{\text{д}}$ – средняя высота дерева в морфотипе, м – определяется как среднее арифметическое высоты каждого пикселя цифровой модели местности, отнесенного к классу древесной растительности; $К$ – процент площади, занимаемой деревьями в морфотипе, %; $h_{\text{к}}$ – средняя высота кустарника в морфотипе, м – определяется как среднее арифметическое высоты каждого пикселя цифровой модели местности, отнесенного к классу кустарниковой растительности.

5.2. Пересчет «аналога биомассы» в количество деревьев и кустарников, исходя из оценок средней площади ареалов древесной и кустарниковой растительности и предположения о том, что соотношение площади древесной и кустарниковой растительности постоянно в пределах каждого морфотипа (формула 2):

$$\begin{cases} (S_{\text{сад}}) \cdot (H_{\text{свд}}) \cdot x + (S_{\text{сак}}) \cdot (H_{\text{свк}}) \cdot y = V_{\text{по}} \\ \frac{x}{y} = \left\{ \begin{array}{l} \% \text{ площади древесной растительности в морфотипе} \\ \% \text{ кустарниковой растительности в морфотипе} \end{array} \right. \end{cases}, \quad (2)$$

где $S_{\text{сад}}$ – площадь среднего ареала дерева; $H_{\text{свд}}$ – средняя высота дерева; $S_{\text{сак}}$ – площадь среднего ареала кустарника; $H_{\text{свк}}$ – средняя высота кустарника; x – количество деревьев; y – количество кустарников.

6. Экстраполяция результатов исследования ключевых участков на всю площадь морфотипа проведена, исходя из предположения, что удельный объем биомассы является неизменным в пределах морфотипа. Такой подход допустим, исходя из определения понятия «морфотип», приведенного выше.

7. Прогноз потерь ПО при замещении морфотипов в ходе реализации генерального плана г. Нур-Султан проведен с учетом изменения удельного объема биомассы при изменении морфотипа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных данных, для каждого морфотипа были построены карты (пример на рис. 5), которые характеризуют дифференциацию объема придомового озеленения в пределах ключевых участков.

Далее на основе полученных карт репрезентативных ключевых участков был рассчитан для всего города аналог *объема биомассы на единицу площади в морфотипах застройки города*. Различные факторы определили размещение и плотность ПО в городе. Ведущим фактором в условиях природно-климатических условий города следует признать исторический фактор или *длительность освоения*. В результате чего ярко проявляются отличия между левым и правым берегами, относящимися к разным этапам застройки, последний из которых традиционно считается более озелененным.



Рис. 5. Удельный объем придомового озеленения внутри морфотипа (на примере репрезентативного ключевого участка)
 Fig. 5. The volume of green cover at the adjoining green spaces inside the morphotype expressed in cubic meters (example of representative key plot)

Близость к реке определяет увеличение плотности объема ПО – это связано с тем, что близ реки наиболее благоприятные условия для озеленения в целом, так как город расположен в степной зоне, то есть зеленые насаждения около р. Ишим чувствуют себя очень хорошо. Роль институционального фактора проявляется во влиянии норм планирования и проектирования городского пространства на разных этапах развития города. Например, в центре правого берега наблюдается значительное увеличение ПО в морфотипах городской застройки Целинограда, регулируемых генеральными планами советского периода, жестко регламентирующих озеленение центра. Тогда как на левом берегу подобного увеличения не наблюдается, так как в результате генерального плана К. Курокавы на левом берегу реки Есиль начинает формироваться новый центр города с президентской резиденцией и другими представительскими учреждениями, закладываются парки и бульвары как вдоль реки, так и перпендикулярно, то есть основное озеленение происходит благодаря им, а не через развитие ПО.

Среднее проективное покрытие ПО в пределах застроенных территорий города Нур-Султан, по нашим расчетам, составляет около 15,6 %, а общий объем ПО – около 75 млн м^3 . Учитывая среднюю ошибку метода измерения высоты объектов, погрешность в оценке объема составляет около 26500 $\text{м}^3/\text{км}^2$ или 3,5 % от общего объема ПО.

Полученный расчет аналога объема биомассы позволяет также сделать *прогноз потери ПО в связи с развитием города* по существующему генеральному плану, не просто рассчитав изменение процента озелененности территории, а вычислив изменение количества деревьев и кустарников (табл. 1).

Согласно нынешнему генеральному плану города Нур-Султан, в основном изменениям подвергнуты следующие морфотипы: частная застройка первой половины XX века, дачные участки в пределах города, трансформированная частная застройка с высокой долей коттеджей, коттеджная застройка периода 2000-х годов. То есть по генеральному плану в ближайшее время планируется замещение частной застройки внутри города на новые жилые комплексы, а наследие советского периода пока что практически остается не тронутым.

Строительство новых жилых комплексов в целом сопровождается в основном большими потерями ПО, однако только при смене морфотипа «частная застройка первой половины XX века» наблюдается положительный эффект. Во всех же остальных случаях потери ПО колеблется от 20 000 (что сопоставимо с погрешностью метода) до 1 105 000 (+/-3,5 %) м³. Суммарно же потери ПО могут составить около 14 000 деревьев и 7000 кустарников. Описанные расчеты проведены с учетом того, что будет происходить восстановление ПО до уровня нынешних новых жилых комплексов. Без учета восстановления составят около 90 000 деревьев и 32 000 кустарников. На территории столицы насчитывается около 782 000 деревьев, то есть 90 000 деревьев составляют около 11,5 % всех деревьев города (табл. 2).

Табл. 2. Прогноз потерь придомового озеленения в связи с развитием города по существующему генеральному плану
Table 2. Prediction of's adjoining green spaces loss during the development of the city according to actual masterplan

Какой морфотип заменяется на новые многоэтажные жилые комплексы	Изменения (с учетом восстановления)	Потери (без учета восстановления)
Частная застройка первой половины XX века	+ (1280 деревьев и 350 кустарников)	28 000 деревьев и 3500 кустарников
Дачные участки в пределах города	- (5700 деревьев и 3200 кустарников)	13700 деревьев и 9600 кустарников
Смешанный морфотип 3–5-этажной застройки 1950–1960-х гг.	- (84 дерева и 15 кустарников)	200 деревьев и 34 кустарника
Морфотипы 5-этажной застройки 1960-х гг. (со сложной структурой)	Замена данного морфотипа не планируется	Замена данного морфотипа не планируется
Микрорайоны 5-этажной застройки 1970-х гг. (с замкнутыми придомовыми пространствами)	Замена данного морфотипа не планируется	Замена данного морфотипа не планируется
Более поздняя застройка 5-ти и 9-ти этажными домами	- (193 дерева и 29 кустарников)	1050 деревьев и 120 кустарников
Трансформированная частная застройка с высокой долей коттеджей	- (1140 дерева и 660 кустарников)	2900 деревьев и 1700 кустарников
Смешанный морфотип	Замена данного морфотипа не планируется	Замена данного морфотипа не планируется
Коттеджная застройка периода 2000 годов	- (6500 деревьев и 2600 кустарников)	44000 деревьев и 17000 кустарников

Таким образом, при изменении застройки объем зеленых насаждений города может значительно сократиться именно из-за вырубки растительности на придомовых территориях. Следовательно, оценив потенциальную уязвимость ПО в г. Нур-Султан, можно получить представление о будущей динамике после реализации различных программ изменения городской застройки по генеральному плану города.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило сделать две группы выводов: методические по применимости методики и ее преимуществам и по результатам расчетов.

В методическом плане применение БПЛА показало свою высокую степень эффективности для оценки масштабов развития и территориальной структуры придомового озеленения, данных о котором не содержится в генеральном плане и других планировочных документах г. Нур-Султан:

- БПЛА можно применять для оценки вертикальной и горизонтальной структуры как ПО, так и других элементов города, размер которых не позволяет проводить исследования с применением доступных космических снимков.

- Применение БПЛА в крупномасштабных исследованиях городских территорий гораздо менее трудоемко, так как силами только авторов была произведена съемка и обработка материалов для всего города Нур-Султан.

- Достигается экономия времени. Как известно, время – самый ценный ресурс, а применение БПЛА позволяет значительно сэкономить время натурных маршрутов (время съемки ключевого участка без учета подготовки и постобработки результатов составляет около 45 минут).

Результаты применения данной методики позволили выделить 12 исторически сложившихся морфотипов городской застройки, характеризующихся разным уровнем и типом придомового озеленения:

- Средний объем ПО на 1 м² площади в выделанных морфотипах застройки различается в 3 раза при переходе от старого города к новому на левом берегу. Развитие ПО является в значительной степени унаследованным от предыдущих периодов, так как от этого зависит длительность освоения и особенности того времени, что определяет как нормативную базу, так и используемый породный состав придомового озеленения. Этому также способствовали нормы градостроительного проектирования советского периода.

- По среднему объему ПО на 1 м² площади ярко проявляются различия между левым и правым берегами, относящимися к разным этапам застройки. При этом центр-периферийный градиент объема ПО проявляется меньше и только на правом берегу (то есть объем ПО возрастает от периферии к центру), что также определяется длительностью освоения и особенностью подходов генплана советского периода.

Потери ПО при реализации программы реновации в основном районов частного сектора по современному Генеральному плану без учета восстановления для города Нур-Султан составят около 11,5 % (+/- 3,5 %) всех деревьев города. Поэтому при изменении застройки объем зеленых насаждений города может значительно сократиться именно из-за вырубки растительности на придомовых территориях.

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».

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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Владимиров В.В.* Актуальность предпосылки экологического программирования в районной планировке. Вопросы географии. М., 1980. № 113. С. 109.
2. *Владимиров В.В.* Расселение и окружающая среда. М.: Стройиздат, 1982. С. 252.
3. *Гвоздецкий Н.А., Николаев В.А.* Казахстан. М.: Мысль, 1971. С. 142–160.
4. *Гриднев Д.З., Кочуров Б.И., Курбатова А.С.* Природно-экологический каркас в территориальном планировании муниципальных образований. Проблемы региональной экологии. 2010. № 6. С. 186–194.
5. *Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Курбаковская А.В.* Оценка геоэкологических функций зеленой инфраструктуры в городах Канады. География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 191–200.
6. *Колбовский Е.Ю.* Региональный экологический каркас: проблемы формирования и развития. Проблемы региональной экологии. 1999. № 4. С. 79–92.
7. *Коробова Е.В., Тлустая С.Е.* Применение современных тенденций озеленения придомовых территорий (на примере г. Владивостока). European research. 2017. № 5. С. 28.
8. *Elkharhy I.* Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. Alexandria Engineering Journal. 2020. No. 60 (6). P. 5579–5590. DOI: 10.1016/j.aej.2021.04.011.

REFERENCES

1. *Elkharhy I.* Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. Alexandria Engineering Journal. 2020. No. 60 (6). P. 5579–5590. DOI: 10.1016/j.aej.2021.04.011.
2. *Gridnev D.Z., Kochurov B.I., Kurbatova A.S.* Natural and ecological framework in the territorial planning of municipalities. Problemy regionalnoy ekologii. 2010. No. 6. P. 186–194. (in Russian).
3. *Gvozdetsky N.A., Nikolaev V.A.* Kazakhstan. Moscow: Mysl publ., 1971. P. 142–160. (in Russian).
4. *Klimanova O.A., Kolbovsky E.Yu., Kurbakovskaya A.V.* Assessment of the geoecological functions of green infrastructure in Canadian cities. Geographia I prirodnye resursy. 2016. No. 2. P. 191–200. (in Russian).
5. *Kolbovsky E.Yu.* Regional ecological framework: problems of formation and development. Problemy regionalnoy ekologii. 1999. No. 4. P. 79–92. (in Russian).
6. *Korobova E.V., Tlustaya S.E.* Application of modern trends in gardening adjacent territories (on the example of Vladivostok). European research. 2017. No. 5. P. 28. (in Russian).
7. *Vladimirov V.V.* Settlement and environment. Moscow: Strojizdat publ., 1982. 252 p. (in Russian).
8. *Vladimirov V.V.* The relevance of the prerequisites for environmental programming in the district planning. Voprosy geographii. Moscow, 1980. No. 113. P. 109. (in Russian).