

УДК 574.474

*Т.А. Казанцев, О.А. Футорна,
Н.Б. Светлова, В.А. Баданина, Н.Ю. Таран*

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ
КЛИМАТООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ ПАРКОВЫХ
ВИДОВ ДЕРЕВЬЕВ НА ПРИМЕРЕ БОТАНИЧЕСКОГО
САДА ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.В. ФОМИНА***

Введение

По сценарным оценкам к концу XXI века на территории Украины ожидается повышение приземной температуры воздуха на 2,0–2,5° С [1]. Риск возникновения теплового стресса в городах повышается с ростом температуры воздуха, повторяемости суховеев, проявлений локальных волн тепла и эффекта «городского острова тепла» [2, 3].

«Городской остров тепла» (Urban Heat Island) — температурная аномалия над центральной частью города, которая характеризуется повышенной по сравнению с периферией температурой воздуха [4]. Разница температур между центром и периферией может достигать 10° С [5], а ощущать влияние «городского острова тепла» могут даже небольшие города [6].

Основные факторы, вызывающие образование «городских островов тепла»: выделение техногенной энергии; повышенная концентрация оптически активных газов, выделяемых автотранспортом и промышленными предприятиями; закрытие почв дорожным покрытием; снижение объемов испарения вследствие сокращения площади зеленых зон [7, 8].

Исследования украинских ученых [9, 10] показали, что г. Киев существенно подвержен влиянию «городского острова тепла». Так, большая часть поверхности Киева летом прогревается в среднем до 30–40° С. Больше прогреваются жилые массивы Троещина и Позняки: здесь средняя летняя температура поверхности достигает 35–37° С. Этим микрорайонам соответствует низкий уровень озеленения — 0–10 %. Температура в пределах 34–35°С наблюдается на Оболони и в центральных районах города. Им соответствует уровень озеленения 10–15 %. Прохладнее в жилых массивах, находящихся в Голосеевском районе, на Борщаговке, Святошино и Сырце. В них температура поверхности не превышает 33° С, а уровень озеленения составляет 20–40 %.

Ослабляют действие «городского острова тепла» зеленые насаждения и водоемы. С уменьшением площади зеленых насаждений города теряют теневое

* Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по конкурсному проекту Ф 76 / 37497 «Разработка стратегии преодоления «городского острова тепла» урбандиафтами Киева на основе подбора стресс-толерантных видов мировой флоры», грант 0117U001999.

© Т.А. КАЗАНЦЕВ, О.А. ФУТОРНА, Н.Б. СВЕТЛОВА, В.А. БАДАНИНА, Н.Ю. ТАРАН, 2018

и охлаждающее действие деревьев, также уменьшается поглощение углекислого газа. Сохранение и улучшение существующих зеленых зон в городах и создание новых — важный фактор преодоления эффекта «городского острова тепла». В этом кроется целый ряд дополнительных преимуществ, таких как создание областей отдыха, фильтрации воздуха и сохранение водных ресурсов.

Анализ современного состояния озеленения урбанистических ландшафтов свидетельствует о неоправданно ограниченном ассортименте древесных и кустарниковых растений в зеленых насаждениях Киева и других городов Украины, в то время как успешно интродуцированными видами древесных растений в коллекциях ботанических садов и дендропарков Украины можно существенно обогатить таксономический состав насаждений, что обеспечит формирование устойчивой к изменению климатических факторов урбасреды.

Одна из крупнейших в Украине коллекций растений находится в ботаническом саду имени академика А.В. Фомина Киевского национального университета имени Тараса Шевченко. В ботсаду представлены растения, интродуцированные в климатические условия Киева, но имеющие генетически детерминированный потенциал резистентности к температурному фактору, поскольку происходят из «теплых» регионов мира. Поэтому они являются достаточным базовым полигоном для научно обоснованного подбора барьерных и устойчивых к негативному влиянию «городского острова тепла» техногенных нагрузок и биоповреждений антропогенных высокодекоративных видов растений. Ботанический сад находится в пределах киевского «острова тепла», что позволяет изучить устойчивость интродуцированных растений к изменению климатических факторов.

При выборе видового состава зеленых насаждений города необходимо учитывать не только их собственную устойчивость к изменению климата, но и способность смягчать последствия изменения климата для жителей города. Это достигается за счет затенения, снижения температуры и снижения концентрации углекислого газа в городской среде [9]. Очевидно, что указанные процессы зависят от размеров кроны деревьев, количества поглощаемого света и количества ассимилированного углекислого газа. Оценке и сравнению этих показателей и посвящена данная статья.

Успехи в создании и удешевлении микропроцессоров привели к активному развитию робототехники, одним из направлений которой являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) или дроны. Современные БПЛА имеют компактные размеры (от нескольких сантиметров до десятков сантиметров), полностью автоматизированы, могут находиться в воздухе длительное время (от нескольких минут до нескольких часов) и могут быть оборудованы различными сенсорами, такими как обычная фотокамера, мультиспектральная камера, тепловизор и др. С учетом этого БПЛА может быть удобным и эффективным инструментом получения информации о растительных объектах.

Нами осуществлен мониторинг ботанического сада с помощью БПЛА и спутниковых данных в условиях «городского острова тепла». Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- получение визуальной карты ботанического сада с высоким пространственным разрешением;
- получение карты вегетационного индекса нормализованной разницы NDVI (Normalized difference vegetation index);
- получение «карты высот» объектов ботанического сада;
- измерение размеров и площади модельных древесных растений;

- измерение среднего значения NDVI для модельных древесных растений;
- получение тепловой карты ботанического сада.

Съемка и результаты исследований с использованием данных БПЛА

Сканирование с БПЛА проведено над научной частью сада и западной половиной общей части. На рис. 1 представлен спутниковый снимок ботанического сада и граница, над которой производилась съемка.

Период проведения измерений — 2–9 сентября 2017 г., в частности:

- 2 сентября 2017: съемка с БПЛА в видимом диапазоне;
- 8 сентября 2017: съемка с БПЛА в инфракрасном диапазоне;
- 9 сентября 2017: получение снимка со спутника Landsat-8.



Рис. 1

в виде «змейки» над исследуемым участком. Такой маршрут позволил поэтапно получить фото всех частей исследуемого участка ботанического сада (рис. 2).

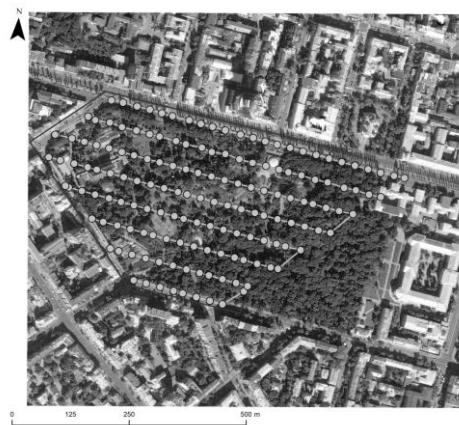


Рис. 2

Для получения фотографий в видимом диапазоне, т.е. обычных RGB (Red-Green-Blue) фотографий использовали камеру, встроенную в квадрокоптер.

Основные характеристики камеры:

- Сенсор: 1 / 2.3 CMOS.
- Размер сенсора: 12,4 Мпиксел.

Данные с использованием БПЛА получены в несколько этапов:

- 1) съемка с воздуха с изображением частей парка в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах;
- 2) объединение отдельных фотографий в одну карту с географическими координатами (ортофотоплан);
- 3) создание цифровой модели местности («карты высот»);
- 4) создание карты NDVI.

Съемку проводили с помощью БПЛА типа квадрокоптер DJI Phantom-4 Pro (DJI Inc, Китай). Полеты осуществлялись в автоматическом режиме с выполнением маршрута в виде «змейки» над исследуемым участком. Такой маршрут позволил поэтапно получить фото всех частей исследуемого участка ботанического сада (рис. 2).

Высота полета составляла 100 м. Фотографирование осуществлялось в надири (вертикально вниз). Частота фотографирования и количество пролетов (элементов «змейки») выбраны таким образом, чтобы обеспечить 70 % перекрытия фотографий, т.е. на каждой следующей фотографии только 30 % местности новые, а 70 % соответствовали предыдущей фотографии. Такой высокий процент перекрытия фотографий необходим для генерации ортофотоплана. Получено 150 фотографий во время съемки в видимом диапазоне и 151 — при съемке в инфракрасном диапазоне.

- Размер изображения: 4000×3000 пикселей.
- Чувствительность камеры: 100–1600 ISO.
- Фокусное расстояние: 20 мм.
- Угол поля зрения: 94 °.
- Диафрагма: 2,8–16.
- Экспозиция: 8–1 / 8000 с.

Для получения фотографий в ближнем инфракрасном диапазоне использовали модифицированную камеру, встроенную в квадрокоптер. Модификация заключалась в удалении из камеры светового фильтра, поглощающего ультрафиолетовый и инфракрасный свет, и установлении фильтра, поглощающего синий свет. Таким образом, красный канал камеры, кроме красного, регистрирует инфракрасный свет, а синий — только инфракрасный (рис. 3). Данная модификация подробно описана в [11].

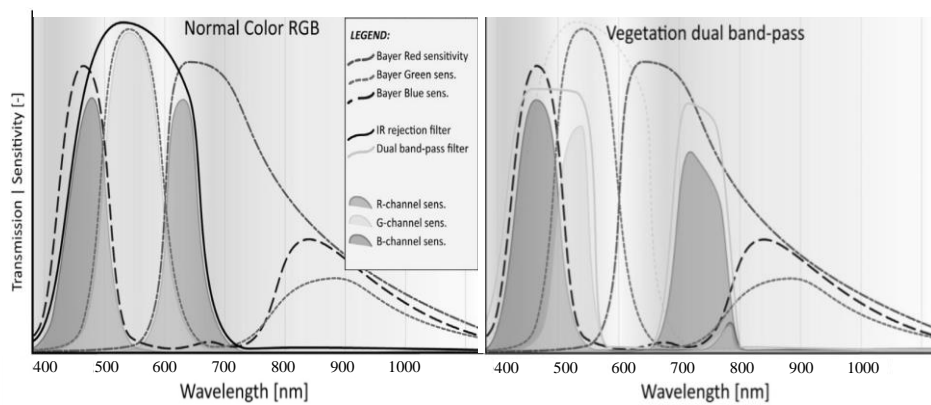


Рис. 3

Фотографировали со стандартными настройками для устранения вариаций в цвете и яркости. Все фотографии получали в DNG-формате (Digital Negative Specification), который является «raw» («сырым») и позволяет глубокую обработку фотографий после съемки.

Из фотографий, полученных с борта БПЛА, сгенерированы ортофотопланы с помощью программы Pix4D (Швейцария). Суть генерации заключается в том, что программа находит на соседних фотографиях общие объекты и таким образом совмещает их в одно изображение (рис. 4).

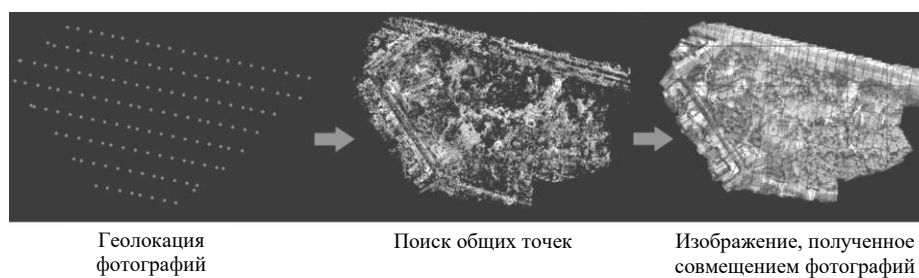


Рис. 4

Поскольку в каждой фотографии содержатся ее географические координаты, полученное изображение содержит координаты в каждом пикселе. Таким образом, для каждого объекта на ортофотопланах можно определить точное местонахождение, размеры и площадь. Пространственное разрешение полученных ортофотопланов составило 3 см / пиксел. На рис. 5 представлен ортофотоплан ботанического сада в видимом диапазоне (в цветах RGB).



Рис. 5

Построение цифровой модели поверхности и «карты высот» объектов

Цифровая модель поверхности (ЦМП) получена на основе фотографий в видимом диапазоне с помощью программы Pix4D. Принцип построения ЦМП заключается в том, что на разных фотографиях одни и те же объекты сфотографированы под разными углами, и чем больше высота объекта, тем больше разница между изображениями объекта на разных фото.

Полученная ЦМП сочетает рельеф местности и объекты, которые на ней находятся, т.е. если два дерева одной высоты растут на склоне, то дерево, растущее выше на склоне, на ЦМП будет характеризоваться большей высотой. Для получения истинных высот объектов необходимо было отделить рельеф от объектов. Для этого на ЦМП рассчитаны высоты точек, соответствующих рельефу (земля, дорожки, газон с невысокой травой и т.п.). Такие точки были выбраны на всей площади исследуемого участка с плотностью примерно 1 точка / 3м, чтобы максимально учесть особенности рельефа. Интерполяцией этих точек на всю площадь исследуемого участка получена цифровая модель рельефа (ЦМР). В каждом пикселе от значения высоты в ЦМП было отнято значение высоты в ЦМР и таким образом получена карта высот объектов (КВО). На рис. 6 представлена схема получения КВО с ЦМП.

На рис. 7 показаны этапы генерации КВО. Высота указана в метрах (*a* — ЦМП; *б* — ЦМР; *в* — КВО).

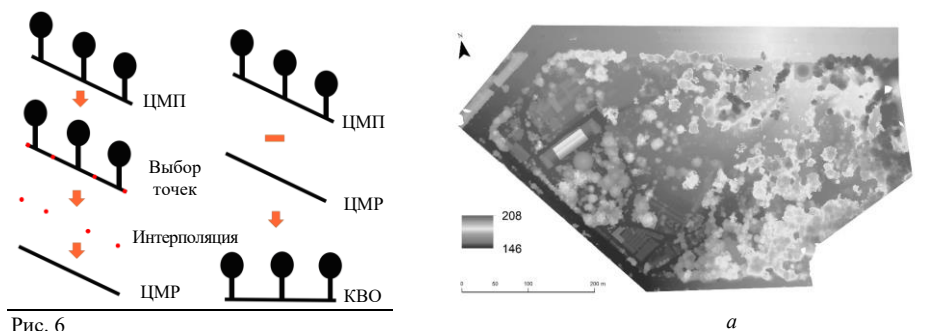


Рис. 6

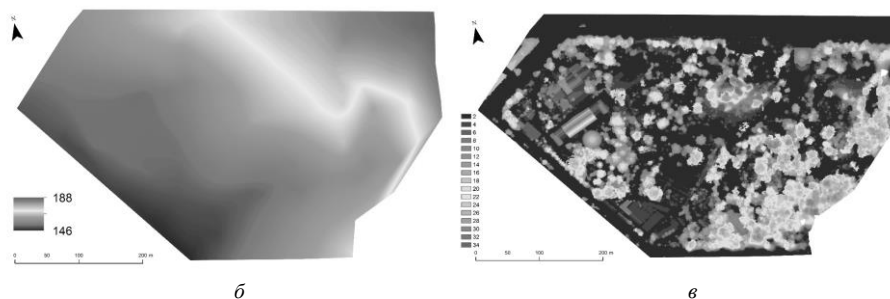


Рис. 7

Получение карты вегетационного индекса нормализованной разницы (NDVI)

Карта NDVI рассчитана на основе ортофотоплана в видимом и инфракрасном диапазонах по формуле

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED).$$

Здесь NIR — сигнал отражения в ближнем инфракрасном диапазоне, а RED — сигнал отражения в красном диапазоне [12]. На рис. 8 представлен ортофотоплан в красном и ближнем инфракрасном диапазонах (Red-NIR) (а) и карта NDVI (б).

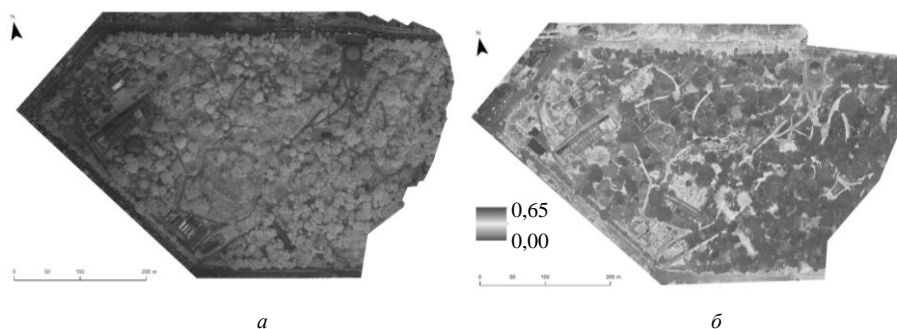


Рис. 8

Создание тепловой карты г. Киева

Для получения карты температуры поверхности г. Киева использован мультиспектральный снимок города со спутника Landsat-8, полученный 9 сентября 2017 года. Подробная методика расчета температуры описана в [13]. Температуру поверхности определяли, используя спектральные каналы Landsat-8 № 10 и № 11, которые соответствуют спектральным диапазонам 10,3–11,3 и 11,5–12,5 мкм, по формулам:

$$T = (1321,08 / (\ln((774,89 / ((B10 \times 0,0003342) + 0,1)) + 1))) - 273,15;$$

$$T = (1201,14 / (\ln((480,89 / ((B11 \times 0,0003342) + 0,1)) + 1))) - 273,15,$$

где T — температура поверхности в градусах Цельсия, $B10$ — значение в спектральном канале № 10, $B11$ — значение в спектральном канале № 11.

Пространственное разрешение тепловой карты составляет 60 м / пиксел, что недостаточно для анализа распределения температур в пределах ботанического сада. Поэтому температуру в ботаническом саду сравнивали с распределением температур по г. Киеву. На рис. 9 представлены тепловая карта г. Киева (а) и фрагмента города (б). Границы исследованной территории выделены контуром.

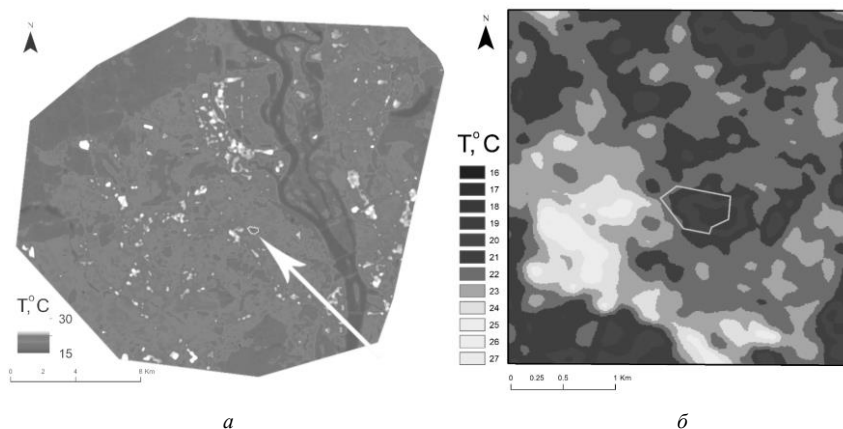


Рис. 9

Генерация ортофотоплана ботанического сада, определение фотосинтетического потенциала и NDVI

Анализ данных, полученных с БПЛА, заключался в определении размеров, площади, высоты, фотосинтетического потенциала и среднего значения NDVI для выбранных деревьев. NDVI (индекс фотосинтетически активной биомассы, от -1 до $+1$) — один из самых распространенных показателей, используемых в дистанционном зондировании Земли для качественной и количественной оценки состояния растительного покрова. Индекс рассчитывают на основе анализа отражения и поглощения растениями света в инфракрасном и красном диапазонах спектра [14].

Для этого на визуальном ортофотоплане выбрано 15 деревьев разных видов. Для каждого дерева создан контур, соответствующий площади проективного покрытия. В пределах каждого контура рассчитана площадь, периметр, максимальный диаметр, максимальная высота и среднее значение NDVI.

На рис. 10 приведены метрические показатели исследованных деревьев. Согласно данным наибольшими размерами отличался *Acer velutinum*, наименьшими — *Catalpa fargesii*.

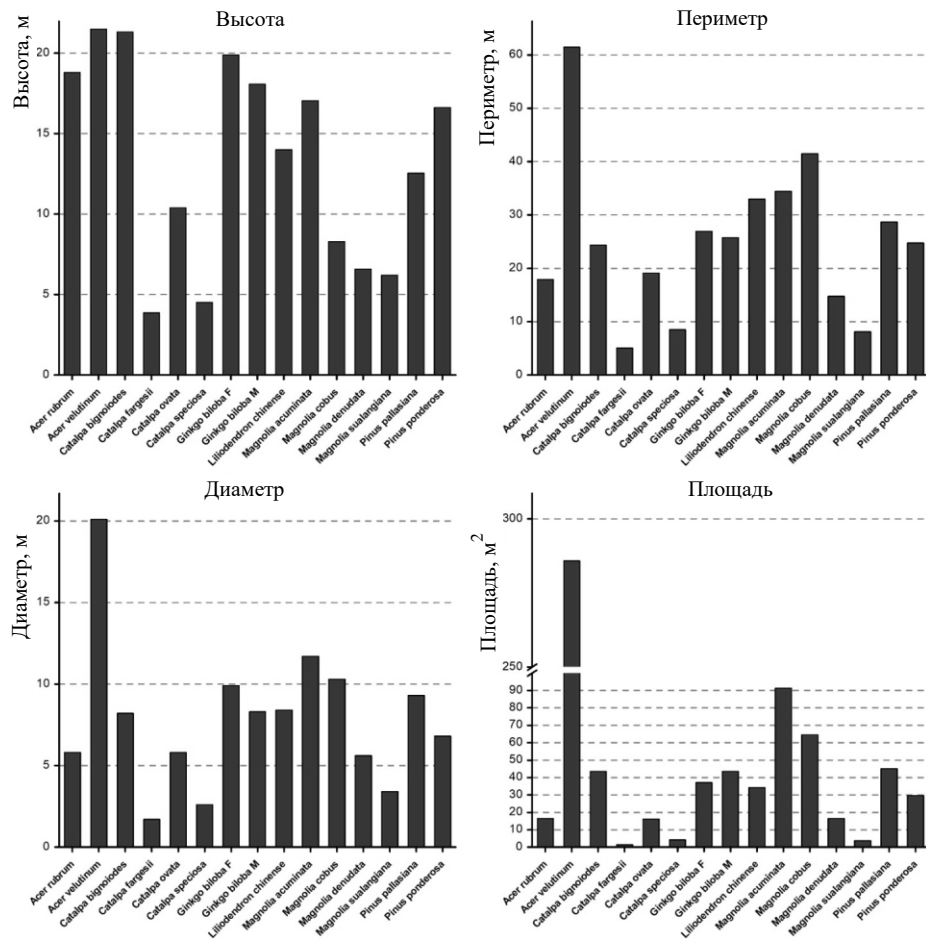


Рис. 10

На рис. 11 представлены среднее значение (SE) и отклонение (SD) NDVI для исследованных деревьев.

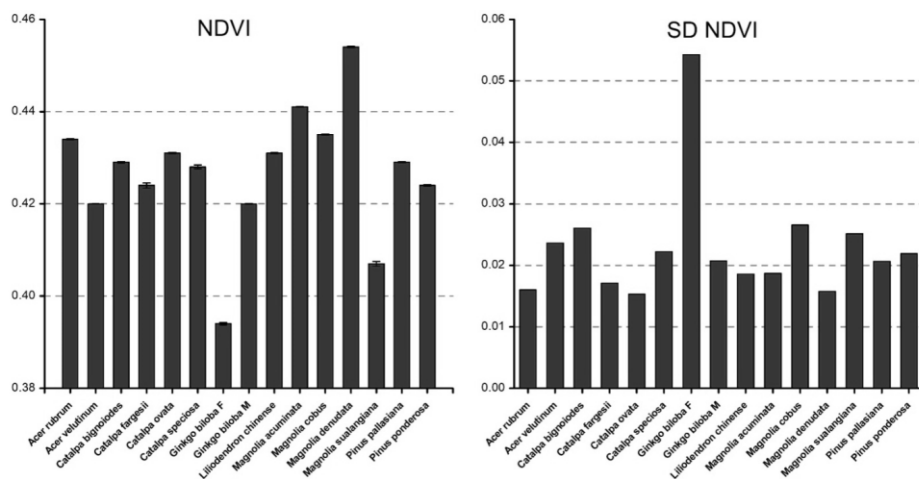


Рис. 11

Диапазон отклонений NDVI в пределах всех исследуемых растений невысок: 0,39–0,45 при возможном диапазоне 0–1. Наибольшее значение NDVI зафиксировано для *Magnolia denudata*, низкое — для одного из двух исследуемых деревьев вида *Ginkgo biloba*. Для этого же дерева зафиксирован самый низкий диапазон отклонений NDVI.

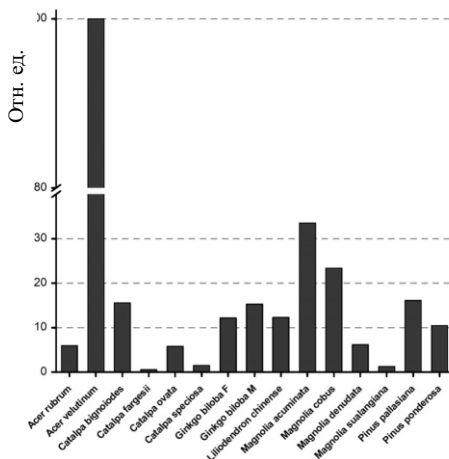


Рис. 12

NDVI характеризует потенциальную фотосинтетическую эффективность растений на единицу площади. Поскольку активное поглощение света и ассимиляция CO₂ происходит в верхних 2–4 слоях кроны, для оценки эффективности фотосинтеза в пределах целого дерева целесообразно учитывать NDVI и площадь кроны. В данной работе площадь приближенно рассчитана, исходя из высоты дерева и диаметра кроны. В результате получен интегральный показатель, отражающий фотосинтетический потенциал (или эффективность ассимиляции CO₂) целым деревом (рис. 12). Согласно данным, по крайней мере для текущего периода (сентябрь 2017), наибольшим фотосинтетическим потенциалом характеризуется *Acer velutinum* и *Magnolia acuminata*, наименьшим — *Catalpa fargesii*.

Заключение

По данным тепловой съемки установлено, что температура в ботаническом саду им. академика А.В. Фомина соответствует одному из самых прохладных районов г. Киева, что связано с высокой плотностью растущих растений на единицу площади.

В пределах ботанического сада самая низкая температура поверхности наблюдается в его восточной части, в которой количество открытых участков наименьшее. Самая высокая температура наблюдается в западной части (научной части), где расположены теплицы, научные корпуса и другие здания.

Исследование видового состава насаждений ботанического сада и тепловизионные исследования выявили преимущества и недостатки отдельных видов деревьев. Установлено, что высокое значение NDVI характерно для *Magnolia denudata* (0,454), низкое — для *Ginkgo biloba* (0,394).

Установлено, что наибольшим фотосинтетическим потенциалом (или эффективностью ассимиляции CO₂) характеризуется *Acer velutinum* и *Magnolia acuminata*, наименьшим — *Catalpa fargesii*. Учитывая структуру и форму кроны исследуемых видов, определено, что наибольшую площадь проективного покрытия (285,9 и 91,2 м² соответственно) имеют *Acer velutinum* и *Magnolia acuminata*.

Анализируя фотосинтетический потенциал, NDVI, структуру и форму кроны исследуемых видов, можно сделать вывод, что наиболее перспективными видами деревьев из коллекции Ботанического сада им. академика О.В. Фомина для снижения температуры «городского острова тепла» является *Acer velutinum*, *Magnolia acuminata* и *Magnolia denudata*. Эти виды активно поглощают углекислый газ в период летней жары и создают мощное затенение.

*Т.А. Казанцев, О.А. Футорна, Н.Б. Светлова,
В.А. Баданина, Н.Ю. Таран*

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ДЛЯ ОЦІНКИ КЛІМАТОФОРМУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАРКОВИХ ВИДІВ ДЕРЕВ НА ПРИКЛАДІ БОТАНІЧНОГО САДУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА О.В. ФОМІНА

Моніторинг ботанічного саду імені академіка О.В. Фомина проводився за допомогою даних обстеження з БПЛА та супутникового зображення. Вихідні продукти включали візуальні карти з високим просторовим розрізненням — карту вегетаційного індексу нормалізованої різниці (NDVI), цифрову модель висот, карту висот об'єктів та теплову карту ботанічного саду. Отримані дані, зокрема площі, висоти, об'єму та фотосинтетичного потенціалу, використовувались для оцінки окремих видів дерев у зменшенні ефекту «міського острова тепла». На основі аналізу одержаних даних виявлено найбільш перспективні види дерев для зниження температури «міського острова тепла». Отримані результати також свідчать про великий потенціал БПЛА в дослідженні рослинності для ефективного міського планування.

*Т.А. Kazantsev, O.A. Futorna, N.B. Svetlova,
V.A. Badanina, N.Yu. Taran*

PROSPECTS OF USING UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR ASSESSING OF CLIMATE-MAKING PROPERTIES OF PARK TREE SPECIES IN CASE OF STUDY OF ACADEMICIAN O.V. FOMIN BOTANICAL GARDEN OF KYIV

Monitoring of O.V. Fomin Botanical Garden was performed by means of UAV survey and satellite image data. Output products included high-resolution visual map, a map

of the vegetation index of the normalized difference (NDVI), digital elevation model (DEM), height map and thermal map. These data were used to assess potential of selected trees in mitigating «urban heat island» effect in particular, trees' area, height, volume and photosynthetic potential. In such way we found the most promising tree species in terms of recurring effect of the «urban heat island». The results also indicate great potential of UAV in studding urban vegetation for effective urban planning.

1. *Features of climate change on Ukraine: scenarios, consequences for nature and agroecosystems* / S. Boychenko, V. Voloshchuk, Ya. Movchan, N. Serdjuchenko, V. Tkachenko, O. Tyshchenko, S. Savchenko // *Proceedings of the National Aviation University*. — 2016. — N 4. — P. 96–113.
2. *Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. — Copenhagen : EEA, 2012. — 143 p.
3. *Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна* / О. Шевченко, О. Власюк, І. Ставчук та ін. — Київ : Myflaer, 2014. — 62 с.
4. *Howard L. The Climate of London: deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. — W. Phillips, sold also by J. and A. Arch, London, 1818. — 1. — 20 p.
5. *Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя*. — Ленинград : Гидрометеиздат. — 1982. — 360 с.
6. *Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of Variable size and urban morphology in the Netherlands* / G.J. Steeneveld, S. Koopmans, B.G. Heusinkveld, A.L.W. van Nove, A.A.M. Holtslag // *J. Geophys. Res.* — 2011. — 116 p.
7. *Доклад Конференции Сторон о работе ее семнадцатой сессии, состоявшейся в Дурбане 28 ноября–11 декабря 2011 года* // Рамочная Конвенция об изменении климата. Организация Объединенных Наций, 2012. — 106 с. — <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf>.
8. *Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. — М. : Росгидромет, 2014. — 61 с. — http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_teh.pdf.
9. *Адаптація до зміни клімату: зелені зони міст на варті прохолоди* / Т. Казанцев, О. Халаїм, О. Василюк, В. Філіпович, Г. Крилова — Київ : Зелена хвиля, 2016. — 40 с.
10. *Радомська М.М., Юрків М.В.* Оцінка ступеня адаптації урбосистеми міста Києва до кліматичних змін // *Вісник ЛДУ БЖД*. — 2016. — № 14. — С. 102–108.
11. *Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras* / W. Nijland, R. de Jong, S.M. de Jong, M. Wulder, C.W. Bater, N.C. Coops // *Agricultural and Forest Meteorology*. — 2014. — 184. — P. 98–106.
12. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Third Earth Resources Technology Satellite –1. Symposium. V. I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., 1974*. — P. 309–317.
13. *Шевчук С.А., Вишенський В.І.* Використання даних супутника Landsat-8 для визначення мікрокліматичних особливостей Києва // *Український журнал дистанційного зондування Землі*. — 2016. — 10. — P. 4–9.
14. *Миклуш С.І., Гаврилюк С.А., Часковський О.Г.* Дистанційне зондування Землі в лісовому господарстві. — Львів : ЗУКЦ, 2012. — 324 с.

Получено 15.01.2018