



Research Article Received: August 01, 2022

Accepted: August 15, 2022

ISSN 2304-6295

Published: August 15, 2022

## The sky visibility at shading by trees

Korniyenko, Sergey Valeryevich 1\* Dikareva, Ekaterina Aleksandrovna 1 Dikareva, Ekaterina Aleksandrovna 1

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; svkorn2009@mail.ru (K.S.V.); ea.dikareva@gmail.com (D.E.A.);

Correspondence:\* email <a href="mailto:svkorn2009@yandex.ru">svkorn2009@yandex.ru</a>; contact phone <a href="mailto:+79884912459">+79884912459</a>

#### **Keywords:**

Architecture; Urban planning; Construction; Environment; Megalopolis; Energy saving; Energy efficiency; Cooling; Passive strategies; Sky View Factor; Urban Heat Island; Fish eye; Climate; Thermal comfort; Green construction; HVAC; Trees; Green infrastructure

#### Abstract:

The development of green infrastructure is an urgent task in developing an urban planning strategy to reduce the effect of an urban heat island and improve the urban ecosystem. The purpose of this study is to assess the visibility of the sky at shading by trees when solving the problems of predicting the formation of an urban heat island and developing recommendations for its mitigation. The object of research. Several species of trees were selected, the most common in greening in the hot climatic conditions: elm (Ulmus L.), oak (Quercus L., 1753), maple (Acer L., 1753) and poplar (Populus L., 1753). For each of these tree species, several samples required for data averaging were selected. A total of 27 samples were examined. Field studies were conducted in various months of the year (10.05.2021, 16.07.2021 and 03.10.2021). **Method.** A characteristic of sky visibility is sky visibility factor (SVF). Various approaches to determining the visibility of the sky are considered. A common limitation of computational methods is the ability to define SVF for relatively simple object configurations. Therefore, to find SVF complex heterogeneous systems, such as trees, we made direct measurements by photographing using a special fisheye lens and a smartphone. Data verification confirms the possibility of using this equipment for field studies. The method of black, white and gray pixels was used to process photo images, which allows you to increase the accuracy of the results. Results. Analysis of the results shows that the minimum SVF values for all tree species studied are observed in July. At this point in time, the tree crown is densest, limiting the visibility of most of the sky. The maximum effect of shading in summer is provided by oak (SVF = 22.9%), minimal – by elm (SVF = 30.4%). It is shown that trees with denser krone block long-wave radiation streams day at night that leads to growth of the urban heat island. Comparing the received results, it is possible to note that the minimum mitigation (8.0 K) gives an elm; maximum mitigation (8.8 K) gives an oak. Therefore, for protection against solar radiation in the afternoon it is better to use an oak, and for mitigation of the urban heat island it is better to use an elm at night. Thus, the method allows choosing a species of the tree providing the required shading and effect of mitigation of the urban heat island. Further researches will be connected with specification of mathematical model of the urban heat island for assessment of a microclimate of the urbanized territories during the hot period.

#### 1 Introduction / Введение

Как показано в [1], разность температур между городскими и пригородными районами может достигать 5 °C и выше. В результате формируется так называемый городской тепловой остров (Urban Heat Island, UHI) — область, которая характеризуется повышенными, по сравнению с периферией, температурами воздуха. Феномен городского острова тепла был известен еще в начале 19-го века благодаря работам Л. Говарда, однако приобрел особую актуальность лишь в последние десятилетия в связи с урбанизацией, усугубляющей Коrnienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;



последствия изменения климата в мегаполисах [2]–[6]. Изменение теплового, воздушного и влажностного режимов городской среды влияет на качество воздуха и потребление энергии [7]–[11].

UHI является серьезной проблемой для жизнеспособности городских экосистем, здоровья человека и его комфортной жизнедеятельности в городской среде [12]. Эту проблему усугубляет недостаточная площадь озеленения городов. С уменьшением количества растительности город теряет тень, испарительный охлаждающий эффект деревьев и грунтов. В жаркий полдень температура поверхности черной крыши может достигать 70—80 °C. Разность температур на поверхности черной крыши и озелененной поверхности может составлять 25—30 °C [13], [14], [8]. Незащищенные от солнца поверхности фасадов зданий, дорог и тротуаров нагреваются до высокой температуры и излучают тепловые волны в сторону пешеходов (рис. 1), что может причинить серьезный ущерб здоровью [15], [16]. Поэтому актуальной задачей, направленной на смягчение UHI и улучшение экосистемы мегаполисов, является развитие зеленой инфраструктуры.

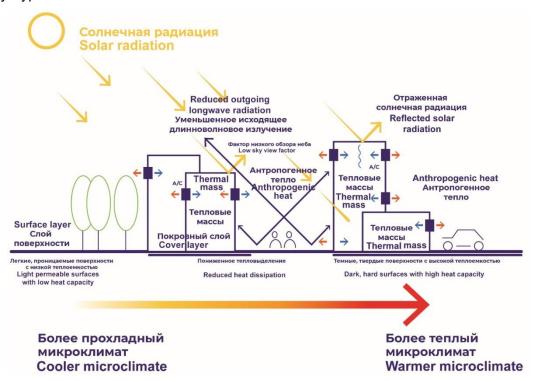


Fig. 1 – Scheme of urban heat island formation Рис. 1 – Схема формирования городского острова теплоты

При рассмотрении UHI важно правильно оценить видимость небосвода в точке подстилающей поверхности при затенении деревьями. Дерево — сложная гетерогенная система. Взрослое дерево состоит из трех частей: корней, ствола и кроны. Наибольшее регулирующее воздействие на микроклимат урбанизированных территорий оказывает крона. Она представляет собой статистический ансамбль листвы, ветвей разного порядка, цветов и плодов. В любой кроне имеются многочисленные просветы, через которые проходят радиационные потоки. Плотность кроны зависит от количества просветов между листвой. Днем более плотная крона сдерживает потоки прямой коротковолновой солнечной радиации, обеспечивая более высокий эффект затенения. Ночью высокоплотная крона может заблокировать потоки длинноволновой радиации в сторону более холодного ночного неба и усилить эффект образования UHI.

Количественной мерой видимости небосвода является фактор видимости неба (Sky View Factor, SVF). Эта геометрический показатель, определяющий долю небесной полусферы, наблюдаемой из определенной точки местности. Значения SVF меняются от 0 до 1 (или от 0 до 100 %). При SVF = 0 небосвод полностью закрыт; при SVF = 1 — полностью открыт. Иногда SVF определяют как отношение радиации, полученной (или излученной) горизонтальной поверхностью от небосвода, к радиации, излученной (или полученной) от всей небесной полусферы [17]. Показатель SVF широко используется климатологами и градостроителями для Коrnienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;



исследования зависимости между интенсивностью UHI и геометрией городского пространства [18]–[22]. Существуют работы, в которых SVF рассматривается как один из важных климатообразующих факторов в лесных массивах, где влияние геометрических характеристик пространства также оказывается велико [23]–[25]. SVF существенно влияет на среднюю радиационную температуру (Mean Radiant Temperature, MRT), широко применяемую для оценки теплового комфорта среды [26]. Кроны деревьев значительно снижают SVF и являются источником тени, который следует учитывать при анализе и оценке теплового комфорта городских территорий.

Рассмотрим основные подходы к определению видимости небосвода.

Наиболее распространенным практическим способом определения SVF в городских или лесных ландшафтах, доступных для прямых измерений, является фотографирование с помощью специальных объективов «рыбий глаз» («Fisheye»). Это сверхширокоугольный фотографический объектив, имеющий угол изображения порядка 180° или более [27], [28]. Полученная фотография представляет собой проекцию лежащей над точкой фотографирования пространственной полусферы на плоскость. Далее такой снимок подвергается специальной обработке (изменению цвета, контраста, яркости), чтобы определить границы небосвода. Этот способ дает возможность определить соотношение между закрытой и открытой для радиационных потоков частями небесной полусферы, рассчитываемое с помощью приближенных функций.

В работе [29] показано, что полусферическая линза «рыбий глаз» была разработана Р. Хиллом в 1924 году для наблюдения за процессами образования облаков. Позднее П. Ричем и Р. Пирси были выполнены более подробные исследования SVF. Имея полусферическую фотографию, можно определить общую видимость небосвода при затенении деревом, однако расположение камеры за пределами горизонтальной проекции кроны затрудняет оценку SVF с учетом просветов в кроне.

информации Для получения CO СНИМКОВ В настоящее время используются специализированные компьютерные программы [30]. Важно отметить, что определение SVF с помощью фотографии трудоемко даже для одной точки и имеет погрешности за счет искажений на снимке и использования приближенных методов расчета. Ошибки также могут появляться, если съемка проводилась под прямыми солнечными лучами или быстро меняющейся облачностью, поэтому наиболее благоприятным условием для таких работ является равномерная облачность по всему небосводу. Поэтому для минимизации погрешностей необходимо правильно выбрать точки съемки, а также время ее проведения. Ярким преимуществом способа «Fisheye» является то, что при использовании цифровых фотоснимков можно быстро определить функцию закрытости горизонта в точке.

Для решения задачи расчета SVF в заданной точке широко применяют классический метод [31]. Этот метод основан на интегрировании элемента излучаемой поверхности dS по поверхности S (рис. 2).

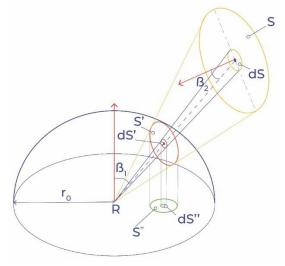


Fig. 2 – Diagram for SVF calculation Рис. 2 – Схема к расчету SVF

Kornienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;



В этом случае фактор видимости  $\psi_{S-R}$  от излучателя площадью S в точке R (в реальных условиях в ней располагается радиометр) можно определить по формуле

$$\psi_{S-R} = \frac{1}{\pi} \int_{S} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dS, \tag{1}$$

где  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — углы между прямой, соединяющей элемент dS поверхности S и точку R, соответственно; r — расстояние между dS и R.

Расчет SVF по формуле (1) возможен лишь для простых объектов, но требует значительной вычислительной мощности для более сложных радиационных сред и систем.

Известен метод единичной сферы, предложенный Нуссельтом [17]. В этом методе фактор видимости определяют по формуле

$$\psi_{S-R} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_{S''} dS'', \tag{2}$$

где  $r_0$  — единичный радиус полусферы.

В формуле (2) интегрирование элемента излучаемой поверхности dS" производится по площади проекции излучаемого тела S" (рис. 2), а не по полусфере, что упрощает процедуру расчета.

Метод Стейна (D.G. Steyn) основан на вычислении SVF по фотографиям, полученным с помощью объектива «рыбий глаз» [17]. Благодаря комбинации прямых измерений и математической обработке фотографий можно существенно повысить точность результатов, однако сложность вычислительных процедур повышает трудоемкость исследований.

Наряду с аналитическими применяют графические методы расчета. Так, графический метод, предложенный А.М. Данилюком, основан на положении о том, что коэффициент естественной освещенности (аналог SVF) пропорционален проекции телесного угла на освещаемую плоскость участка неба, который виден из данной точки. Это положение полностью согласуется с методом единичной сферы Нуссельта (см. формулу (2)). Применение лучевых графиков Данилюка позволяет весьма просто определить фактор видимости неба, однако уступает вышеприведенным аналитическим методам с точки зрения точности получаемых результатов расчета.

Проведенный обзор литературы показал малое количество исследований, посвященных экспериментальному определению SVF с учетом проницаемости кроны. Это может внести погрешность в математические модели прогнозирования UHI и указывает на необходимость проведения исследования.

**Целью** данного исследования является оценка видимости небосвода при затенении деревьями при решении задач прогноза образования городского теплового острова и разработке рекомендаций по его смягчению в условиях умеренно-континентального климата.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- выполнить натурные исследования SVF при затенении деревьями в различные периоды года экспресс-методом полусферической фотографии;
- провести верификацию полученных экспериментальных данных SVF на результатах аналитического решения для простой конфигурации объекта;
- выполнить анализ полученных результатов и наметить пути смягчения UHI.

Практическая значимость работы состоит в получении уточненных значений SVF при затенении деревьями, которые могут быть использованы в математических моделях прогноза образования и смягчения UHI.

## 2 Materials and Methods / Материалы и методы

#### 2.1 Get Photo Images / Получение фотоизображений

Общим ограничением рассмотренных в п. 1.1 вычислительных методов является возможность определения SVF для сравнительно простых конфигураций объектов. Поэтому для нахождения SVF сложных гетерогенных систем, таких как деревья, нами выполнены прямые измерения посредством фотографирования с помощью специального объектива «рыбий глаз» и смартфона (рис. 3).

Kornienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;







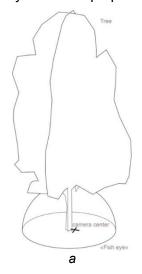
Fig. 3 – Photo of experimental technique: a – disassembled (separately a smartphone and a fish eye camera); b – assembled (the "fish eye" camera is attached over the smartphone camera)
Рис. 3 – Фото оборудования, использованного в эксперименте: a – в разобранном виде (отдельно смартфон и камера «рыбий глаз»); б – в собранном виде (крепление камеры «рыбий глаз» осуществляется поверх камеры смартфона)

Исследования проведены в условиях умеренно-континентального климата в городе Волгограде (согласно международной классификации климата Кöppen — тип «Dfa»). Были выбраны несколько видов деревьев, наиболее часто встречающихся при озеленении в рассматриваемых климатических условиях: вяз (*Ulmus* L.), дуб (*Quercus* L., 1753), клен (*Acer* L., 1753) и тополь (*Populus* L., 1753). По каждому из этих видов деревьев были выбраны несколько образцов, необходимых для усреднения данных. Всего было исследовано 27 образцов.

Плотность кроны меняется в течение года, поэтому натурные исследования SVF проводились в различные месяцы года:

- 1. Временная точка SP–1 (10.05.2021). Фотофиксация проводилась днем, с 12:00 до 13:00. В это время небо было полностью закрыто облаками (облачность 10 баллов), что исключало попадание прямых солнечных лучей в объектив.
- 2. Временная точка SP–2 (16.07.2021). Время проведения эксперимента было выбрано в интервале 18:30–19:00 в связи с тем, что днем была малая облачность, и получить корректные фото не удалось. К выбранному времени облачность неба повысилась до 7 баллов, что дало возможность получить достаточно качественные фотоизображения.
- 3. Временная точка SP–3 (03.10.2021). Эксперимент проводился в интервале от 16:30 до 17:00. Облачность на момент исследования составляла 7 баллов, также были получены фото, пригодные для дальнейшей обработки.

Во всех случаях камера располагалась под деревом, около его ствола (рис. 4).





б

Fig. 4 – Photography diagram (a) and final photo image (b) Рис. 4 – Схема фотосъемки (a) и итоговое фотоизображение (б)

Kornienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;



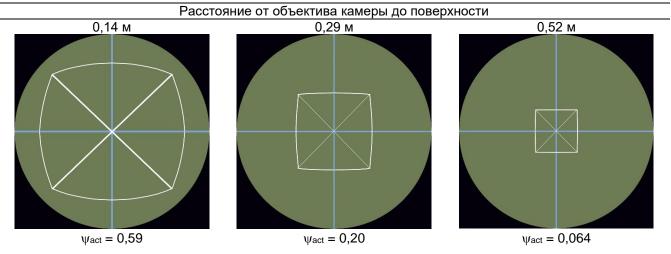
Данная методика позволяет определить видимость небосвода при затенении деревьями с учетом просветов в кроне.

#### 2.2 Verification of data / Верификация данных

Перед фотосъемкой была проведена верификация данных. На вертикальной поверхности был изображен эталонный квадрат со стороной 0,25 м, ось объектива располагалась перпендикулярно поверхности и была совмещена с центром квадрата. Съемка проводилась при трех фиксированных расстояниях от объектива камеры до поверхности: 0,14, 0,29 и 0,52 м.

По результатам фотосъемки были определены фактические значения видимости  $\psi_{act}$  при различных расстояниях от объектива камеры до поверхности (табл. 1).

Table 1. Physical and mechanical properties of supports Таблица 1. Фактические значения видимости  $\psi_{act}$  по результатам фотосъемки



Значение  $\psi_{act}$  определялось как отношение площади криволинейного квадрата, видимого из точки наблюдения, к площади кругового поля камеры.

Расчетные аналитические значения  $\psi_{cal}$  были определены по формуле

$$\psi_{cal} = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{X}{\sqrt{1 + X^2}} \arctan\left(\frac{X}{\sqrt{1 + X^2}}\right) \right],\tag{3}$$

где X = a/l; a — сторона квадрата, l — расстояние от точки наблюдения до квадрата. Результаты верификации данных на основе формулы (3) показаны в табл. 2.

Table 2. Verification of data Таблица 2. Верификация данных

Расстояние от точки	Фактическое	Расчетное	Отклонение фактического
наблюдения до	(измеренное) значение	(вычисленное)	значения $\psi_{cal}$ от расчетного
квадрата, м	<b>Ψ</b> act	значение $\psi_{cal}$	Ψ <sub>cal</sub> , %
0,14	0,59	0,50	+18,0
0,29	0,20	0,19	+5,3
0,52	0,064	0,69	-5,9

По итогам верификации данных установлено, что максимальное отклонение фактического значения  $\psi_{act}$  от расчетного  $\psi_{cal}$  отмечается при небольших расстояниях от точки наблюдения до объекта (+18,0%). При удалении камеры от объекта ошибка измерений сначала уменьшается, достигая нуля при I=0,4 м, а затем возрастает. Данная методика позволяет определить местоположение камеры, которое дает минимальную погрешность измерений.

# 2.3 Processing of photo images and calculation of SVF / Обработка фотоизображений и вычисление SVF

Для обработки фотоизображений был применен метод черных, белых и серых пикселей. Количество белых пикселей определяет долю видимого участка небосвода из данной точки Kornienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;



через крону дерева, количество черных пикселей — долю затенения листвой и ветвями различного порядка (рис. 5). При обработке фотоизображений фон (угловые участки на рис. 5, а) был исключен

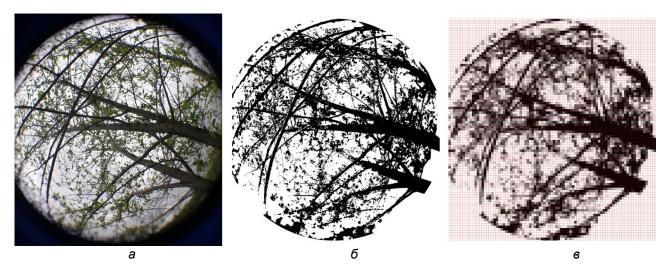


Fig. 5 – Scheme of determination of SVF when shading by a tree: a – the photo image received by means of a hemispherical lens; b – a black-and-white substrate; c — net (pixel) model Рис. 5 – Схема определения SVF при затенении деревом: а — фотоизображение, полученное с помощью полусферической линзы; б — черно-белая подложка; в — сеточная (пиксельная) модель

Первоначально обработка черно-белых изображений была выполнена в программновычислительном комплексе Photoshop. Однако при замене цветного изображения на чернобелое возможно образование так называемых краевых пикселей с меньшей плотностью, которые позволяют дополнительно выявить оттенки серого. В дальнейшем фотоизображения были обработаны в специализированном программно-вычислительном комплексе Pixel Color Counter. Главной особенностью этого комплекса является возможность разделения изображения на пиксели заданного уровня интенсивности (рис. 6), что в ряде случаев повышает точность результатов.

				<b>₩</b>				
			Pixel (	Counts	by Col	or		
				343 unique colo	ors			
: 149	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1
: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 1	: 4
: 6	: 4	: 2	: 1	: 4	: 5	: 4	: 3	: 2
: 1	: 1	: 1	: 1	: 5	:8	: 6	: 4	: 1
: 4	:1	: 2	: 5	: 5	: 6	: 6	: 5	: 4
: 3	:1	: 1	:1	: 1	: 4	: 2	: 3	: 2
: 3	: 4	: 2	: 2	:1	: 5	: 6	: 6	: 4
: 4	: 3	: 3	: 1	: 1	: 1	: 1	: 2	: 3
: 3	: 5	: 9	: 4	: 37	: 3	: 3	: 3	: 5
: 3	: 2	: 5	: 4	: 2	: 1	: 1	: 1	: 6

Fig. 6 – An example of dividing a photo image into pixels of a given intensity level Рис. 6 – Пример разделения фотоизображения на пиксели заданного уровня интенсивности

В связи с наличием в каждом из вариантов обработки определенной доли погрешности результаты были усреднены.

### 3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

Результаты фактического определения SVF для образцов указанных выше видов деревьев в различные моменты времени представлены в табл. 3. Здесь же даны средние значения SVF для каждого вида дерева и каждой временной точки.



## Table 3. Actual (measured) SVF values Таблица 3. Фактические значения SVF согласно результатам измерений

Nº	Изображение	SVF, %
	Изображение Временная точка SP–1 (10.05.2021)	,
Вяз_1		41,7
Вяз_2		46,7
Вяз_3		37,6
Вяз_4		34,6
Вяз_5		58,9



Вяз_6		36,0
-	Вяз (среднее)	42,6
Дуб_1		26,9
Дуб_2		24,7
Дуб_3		27,9
Дуб_4		35,6
	Дуб (среднее)	28,8
Клен_1		45,3

Kornienko, S.; Dikareva, E. The sky visibility at shading by trees; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures;* **102** Article No 10203. doi: 10.4123/CUBS.102.3



Клен_2		42,8
	Клен (среднее)	44,1
Тополь_1		31,7
Тополь_2		27,2
	Тополь (среднее)	29,5
Вяз_1	Временная точка SP-2 (16.07.2021)	29,3
Вяз_2		28,6
Вяз_3		33,2
	Вяз (среднее)	30,4



Дуб_1		21,3
Дуб_2		24,5
	Дуб (среднее)	22,9
Клен_1		23,6
	Клен (среднее)	23,6
Тополь_1		25,6
	Тополь (среднее)	25,6
	Временная точка SP-3 (03.10.2021)	
Вяз_1		33,5
Вяз_2		36,7
	Вяз (среднее)	35,1



Дуб_1		35,4
Дуб_2		30,5
	Дуб (среднее)	33,0
Клен_1		33,3
	Клен (среднее)	33,3
Тополь_1		31,6
	Тополь (среднее)	31,6

На основании данных табл. 3 построена диаграмма усредненных значений SVF рассматриваемых типов деревьев в различные периоды годы (рис. 7).



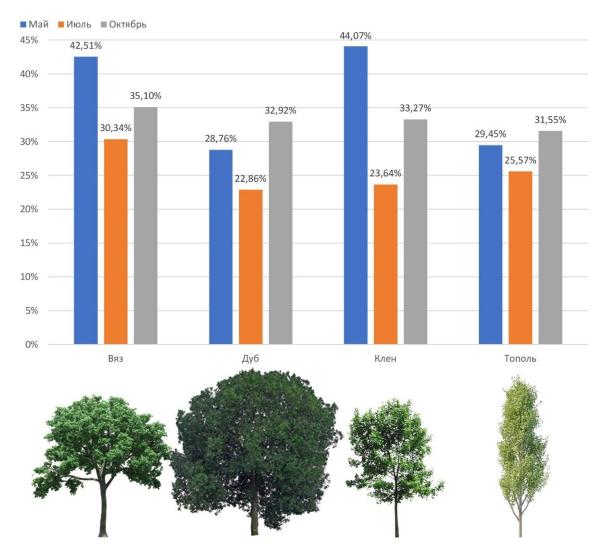


Fig. 7 – SVF values for each tree type depending on the time of year Puc. 7 – Значения SVF по каждому виду дерева в зависимости от времени года

Анализ полученных результатов показывает, что минимальные значения SVF для всех исследованных видов деревьев отмечаются в июле. В этот момент времени крона деревьев наиболее плотная, что ограничивает видимость большей части небосвода. Максимальный эффект затенения летом обеспечивается дубом (SVF = 22,9 %), минимальный — вязом (SVF = 30,4 %). По сравнению с вязом дуб имеет очень плотную крону. В мае и октябре значения SVF выше, чем в июле. Это можно объяснить тем, что в мае листва еще не раскрылась в полной мере, а в октябре начинается процесс листопада.

В работе [32] получены экспериментальные данные по SVF и SP для трех видов деревьев, расположенных в жилых зонах г. Катания (Италия). Согласно климатической классификации Кеппена [21] для этого региона характерен средиземноморский климат (подтип «Сsa») с жарким летом и мягкой зимой.

Table 4. Sky View Factor (SVF) and Solar Permeability (SP) for the tree-species [32] Таблица 4. Фактор видимости неба (SVF) и солнечной проницаемости (SP) для трех видов деревьев [32]

Вид дерева	SVF, %	SP, %
Сосна приморская (Pinus Pinaster)	22,7	21,6
Платан западный ( <i>Platanus Occidentalis</i> )	12,1	11,5
Фикус бенджамина ( <i>Ficus Benjamina</i> )	14,7	14,3

Из табл. 4 видно, что разница между значениями SVF и SP для указанных видов деревьев составляет примерно 5 %.

Сравнение полученных результатов с приведенными выше данными (табл. 4) показывает



хорошую согласованность для дуба и сосны приморской. Для других видов деревьев данные заметно различаются, что можно объяснить различными климатическими условиями, морфологическими особенностями дерева, а также формой посадки деревьев.

Согласно данным ЦНИИП градостроительства РААСН снижение температуры поверхности днем в летний период при рядовой посадке деревьев составляет 6–12 К, что обеспечивает высокий эффект солнцезащиты.

Оценим приближенно влияние деревьев на городской тепловой остров. Для этого используем данные [27] в виде уравнения линейной регрессии, устанавливающего связь между SVF и разностью температур  $\Delta T$  на застроенной и открытой поверхностях:

$$\Delta T = -10.5(SVF) + 11.2$$
. (4)

Из формулы (4) видно, что чем меньше значение SVF, тем больше  $\Delta T$ , следовательно, риск образования UHI выше на застроенной территории, чем на открытой. Деревья с более плотной кроной (меньшее значение SVF) блокируют длинноволновые радиационные потоки в ночное время суток, что приводит к повышению  $\Delta T$ , а, следовательно, к росту теплового острова. Сравнивая полученные результаты, можно отметить, что минимальное значение ( $\Delta T = 8.0$  K) дает вяз, максимальное ( $\Delta T = 8.8$  K) — дуб. Поэтому для защиты от прямой солнечной радиации в дневное время лучше всего подходит дуб, а для смягчения теплового острова ночью — вяз.

#### 4 Conclusions / Заключение

По итогам проведенного исследования сформулированы следующие основные выводы.

- 1. Актуальной задачей при разработке стратегии городского планирования для снижения эффекта городского теплового острова и улучшения городской экосистемы является развитие зеленой инфраструктуры. Целью данного исследования является оценка видимости небосвода при затенении деревьями при решении задач прогноза образования городского теплового острова и разработке рекомендаций по его смягчению.
- 2. При рассмотрении городского острова теплоты важно правильно оценить видимость небосвода в точке подстилающей поверхности при затенении деревьями. Количественной мерой видимости небосвода является фактор видимости неба (SVF). Рассмотрены различные подходы к определению видимости небосвода. Общим ограничением вычислительных методов является возможность определения SVF для сравнительно простых конфигураций объектов. Поэтому для нахождения SVF сложных гетерогенных систем, таких как деревья, нами выполнены прямые измерения посредством фотографирования с помощью специального объектива «рыбий глаз» и смартфона. Верификация данных подтверждает возможность применения данного оборудования для натурных исследований. Для обработки фотоизображений был применен метод черных, белых и серых пикселей, позволяющий повысить точность результатов.
- 3. Исследования проведены в условиях умеренно-континентального климата в городе Волгограде (согласно международной классификации климата Кöppen тип «Dfa»). Были выбраны несколько видов деревьев, наиболее часто встречающихся при озеленении в рассматриваемых климатических условиях: вяз (*Ulmus* L.), дуб (*Quercus* L., 1753), клен (*Acer* L., 1753) и тополь (*Populus* L., 1753). По каждому из этих видов деревьев были выбраны несколько образцов, необходимых для усреднения данных. Всего было исследовано 27 образцов. Натурные исследования проведены в различные месяцы года (10.05.2021, 16.07.2021 и 03.10.2021).
- 4. Анализ полученных результатов показывает, что минимальные значения SVF для всех исследованных видов деревьев отмечаются в июле. В этот момент времени крона деревьев наиболее плотная, что ограничивает видимость большей части небосвода. Максимальный эффект затенения летом обеспечивается дубом (SVF = 22,9 %), минимальный вязом (SVF = 30,4 %). Показано, что деревья с более плотной кроной блокируют длинноволновые радиационные потоки в ночное время суток, что приводит к росту теплового острова. Сравнивая полученные результаты, можно отметить, что

Kornienko, S.; Dikareva, E.

The sky visibility at shading by trees;



- минимальное значение ( $\Delta T$  = 8,0 K) дает вяз, максимальное ( $\Delta T$  = 8,8 K) дуб. Поэтому для защиты от прямой солнечной радиации в дневное время лучше всего подходит дуб, а для смягчения теплового острова ночью вяз. Таким образом, рассмотренная выше методика позволяет выбрать вид дерева, обеспечивающего требуемое затенение и эффект смягчения городского теплового острова.
- 5. Дальнейшие исследования связаны с уточнением математической модели городского теплового острова для оценки микроклимата урбанизированных территорий в жаркий период.

#### References

- 1. Oke, T.R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1982. 108(455). Pp. 1–24. DOI:10.1002/qj.49710845502.
- 2. Schade, J., Lidelöw, S., Lönnqvist, J. The thermal performance of a green roof on a highly insulated building in a sub-arctic climate. Energy and Buildings. 2021. 241. DOI:10.1016/j.enbuild.2021.110961.
- 3. Gorshkov, A.S., Vatin, N.I., Rymkevich, P.P. Climate change and the thermal island effect in the million-plus city. Строительство Уникальных Зданий И Сооружений. 2020. 89(4). Pp. 8902–8902. DOI:10.18720/CUBS.89.2. URL: https://unistroy.spbstu.ru/article/2020.89.2.
- 4. Hamburg, A., Kalamees, T. How well are energy performance objectives being achieved in renovated apartment buildings in Estonia? Energy and Buildings. 2019. 199. Pp. 332–341. DOI:10.1016/i.enbuild.2019.07.006.
- 5. Korniyenko, S., Dikareva, E. Generation, Development, and Mitigation of the Urban Heat Island: A Review. AlfaBuild. 2021. (1605). DOI:10.34910/ALF.16.5.
- 6. Korniyenko, S. Advanced Hygrothermal Performance of Building Component at Reconstruction of S. Radonezhskiy Temple in Volgograd. MATEC Web of Conferences. 2016. 53. Pp. 2–7. DOI:10.1051/matecconf/20165301003.
- 7. Korniyenko, S. V. Renovation of Residential Buildings of the First Mass Series. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 463(2). DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022060.
- 8. Korniyenko, S. V, Astafurova, T.N., Kozlova, O.P. Housing in a Smart City. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1079(2). Pp. 022050. DOI:10.1088/1757-899x/1079/2/022050. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1079/2/022050/pdf.
- 9. Hsieh, C.M., Li, J.J., Zhang, L., Schwegler, B. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. Energy and Buildings. 2018. 159. Pp. 382–397. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.10.045.
- 10. Alev, Ü., Eskola, L., Arumägi, E., Jokisalo, J., Donarelli, A., Siren, K., Broström, T., Kalamees, T. Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region. Energy and Buildings. 2014. 77. Pp. 58–66. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.03.049. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.049.
- 11. Zemitis, J., Borodinecs, A., Frolova, M. Measurements of moisture production caused by various sources. Energy and Buildings. 2016. 127. Pp. 884–891. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.06.045.
- 12. Li, D.H.W., Cheung, G.H.W., Lau, C.C.S. A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept. Building and Environment. 2006. 41(5). Pp. 578–589. DOI:10.1016/j.buildenv.2005.02.027.
- 13. Fachinello Krebs, L., Johansson, E. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. Energy and Buildings. 2021. 241. DOI:10.1016/j.enbuild.2021.110963.
- 14. Hoelscher, M.T., Nehls, T., Jänicke, B., Wessolek, G. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. Energy and Buildings. 2016. 114. Pp. 283–290. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.047.
- 15. Chung, W.J., Lim, J.H. Cooling operation guidelines of thermally activated building system considering the condensation risk in hot and humid climate. Energy and Buildings. 2019. 193. Pp. 226–239. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.03.049.
- 16. Buchin, O., Hoelscher, M.T., Meier, F., Nehls, T., Ziegler, F. Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. Energy and Buildings. 2016. 114.



- Pp. 27-37. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.038.
- 17. Steyn, D.G. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs: Research note. Atmosphere Ocean. 1980. 18(3). Pp. 254–258. DOI:10.1080/07055900.1980.9649091.
- 18. Rakovec, J., Zakšek, K. On the proper analytical expression for the sky-view factor and the diffuse irradiation of a slope for an isotropic sky. Renewable Energy. 2012. 37(1). Pp. 440–444. DOI:10.1016/j.renene.2011.06.042.
- 19. Stewart, I.D., Oke, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. 93(12). Pp. 1879–1900. DOI:10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- 20. Park, S., Tuller, S.E. Advanced view factor analysis method for radiation exchange. International Journal of Biometeorology. 2014. 58(2). Pp. 161–178. DOI:10.1007/s00484-013-0657-8.
- 21. Chen, D., Chen, H.W. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901-2010. Environmental Development. 2013. 6(1). Pp. 69–79. DOI:10.1016/j.envdev.2013.03.007.
- 22. Holmer, B., Postgård, U., Ericksson, M. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. Theoretical and Applied Climatology. 2001. 68(1–2). Pp. 33–40. DOI:10.1007/s007040170051.
- 23. Evangelisti, L., Guattari, C., Asdrubali, F. On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review. Energy and Buildings. 2019. 183. Pp. 607–625. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.11.037.
- 24. Calcerano, F., Martinelli, L. Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. Energy and Buildings. 2016. 112. Pp. 234–243. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.12.023.
- 25. Yang, J., Wong, M.S., Menenti, M., Nichol, J. Modeling the effective emissivity of the urban canopy using sky view factor. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. 105. Pp. 211–219. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2015.04.006.
- 26. Svensson, M.K. Sky view factor analysis Implications for urban air temperature differences. Meteorological Applications. 2004. 11(3). Pp. 201–211. DOI:10.1017/S1350482704001288.
- 27. Guo, C., Buccolieri, R., Gao, Z. Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment. Energy and Buildings. 2019. 203. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.109433.
- 28. Gál, T., Lindberg, F., Unger, J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: Comparison and application to urban climate. Theoretical and Applied Climatology. 2009. 95(1–2). Pp. 111–123. DOI:10.1007/s00704-007-0362-9.
- 29. Tan, Z., Lau, K.K.L., Ng, E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. Energy and Buildings. 2016. 114. Pp. 265–274. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.031.
- 30. Souza, L.C.L., Rodrigues, D.S., Mendes, J.F.G. SKY VIEW FACTORS ESTIMATION USING A 3D-GIS EXTENSION São Paulo State University, Bauru, Brazil University of Minho, Braga, Portugal. Eighth International IBPSA Conference. 2003. (2001). Pp. 1227–1234.
- 31. Hämmerle, M., Gál, T., Unger, J., Matzarakis, A. Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. Theoretical and Applied Climatology. 2011. 105(3). Pp. 521–527. DOI:10.1007/s00704-011-0402-3.
- 32. Palme, M., Privitera, R., La Rosa, D. The shading effects of Green Infrastructure in private residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning. Energy & Buildings. 2020. 229. Pp. 110531.