Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191

Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat)

В.И. Горный[1], В.И. Лялько[2], С.Г. Крицук[1], И.Ш. Латыпов[1], А.А. Тронин[1] В.Е. Филиппович[2], С.А. Станкевич[2], О.В. Бровкина[3], А.В. Киселев[1], Т.А. Давидан[1], Н.С. Лубский[2], А.Б. Крылова[2]

[1] Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru
[2] Научный Центр Аэрокосмических Исследований Земли Института Геологических Наук Национальной Академии Наук Украины, Киев, 01601, Украина
E-mail: casre@casre.kiev.ua
[3] Global Change Research Institute (CzechGlobe), Brno, 603 00, Czech Republic
E-mail: olgabrovkina@mail.ru

Работа направлена на прогнозирование температур поверхности городской среды (ПГС) Киева и Санкт-Петербурга, которые следует ожидать в 2024 г., если тенденции наблюдающегося потепления климата сохранятся. Для этого использованы архивные материалы тепловых космических съемок, выполненных спутниками серий EOS и Landsat. По этим данным построены временные ряды температур ПГС, рассчитаны тренды и выполнен прогноз ожидаемых средних и максимальных температуры ПГС. В результате в Киеве к 2024 г. в июле – августе следует ожидать возрастание средней многолетней по площади дневной температуры ПГС до +30,6°С ÷ +31,6°С а в наиболее жаркие дни – до +41,6°С с дополнительным нагревом поверхности отдельных участков ПГС до +51,0°С. Соответственно, в Санкт-Петербурге следует ожидать возрастание средней многолетней по площади дневной температуры ПГС до +28°С (повышение еще на +3,0°С), в наиболее жаркие дни – до +37,0°С с дополнительным нагревом поверхности отдельных участков городской среды до +45,1°С. Верхняя оценка прогноза дает для Киева и Санкт-Петербурга возможность нагрева отдельных участков ПГС, соответственно, до 56,6°С и 50,4°С. Показано, что многолетний тренд средней по городу температуры ПГС является надежной количественной характеристикой накопленных объемов вводимого жилья, что является научным обоснованием теплового космического мониторинга активности жилищного строительства. Показано, что температура земной поверхности является надежным индикатором вырубок, проводимых в лесопарковых зонах, что может быть использовано в рамках регулярного космического мониторинга их состояния.

Ключевые слова: город, тепловой остров, климат, потепление, спутник, температура, временной ряд, прогноз, нагрев, строительство, вырубки

Одобрена к печати: 18.01.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-176-191

Введение

Для предотвращения негативных экологических последствий глобального потепления мировое сообщество планирует к концу столетия не допустить возрастание среднегодовой температуры на +2°С относительно доиндустриального уровня (Доклад…, 2012). Вместе с тем, над крупными городскими и промышленными агломерациями выявлены так называемые «тепловые острова», характеризующиеся аномально высокими температурами поверхности городской среды (ПГС). «Тепловые острова» над городами формируются в результате высокой тепловой инерции конструкционных материалов (ночное время), энергопотерь в системах городского теплоснабжения и в промышленности, из-за повышенной концентрации в городах парниковых газов и аэрозоля, снижения испаряемости с поверхности почвы из-за «запечатывания» ее асфальтом, сокращения площади зеленых зон. В крупных мегаполисах, таких, как Нью-Йорк, температура ПГС может на +17°С превышать температуру поверхности в пригородах (Price, 1979). Столь значитель-

ное повышение температуры ПГС негативно влияет на здоровье населения. Особенно опасны зоны перегрева ПГС, в пределах которых с мая по сентябрь в 15 часов дня результирующая температура[1] превышает +23°С. Для территорий школ, детских дошкольных учреждений, спортивных площадок, мест отдыха не допускается превышение этой температуры в течение одного наиболее жаркого месяца (Инструкция…, 2008). Кроме того, повышение температуры приводит к дополнительному расходованию энергии на системы климат-контроля, ускоряет размножение насекомых (Марченко,1980), коррозию металлов, стимулирует выделение эко-токсикантов в результате химических реакций. Поэтому в крупных городах ситуация со снижением уровня экологической безопасности населения под влиянием наблюдаемого глобального потепления стоит более остро, чем в целом по планете. Следовательно, особо актуальными являются меры по парированию риска перегрева ПГС. Но для их разработки требуется, прежде всего, детальное изучение пространственно-временных изменений температуры ПГС за последние десятилетия.

В США существует несколько научных программ и фондов, исследующих влияние городских «островов тепла» на здоровье населения, на рост энергозатрат, на качество атмосферного воздуха и воды (US EPA Heat Island Reduction Program (HIRP)), разрабатываются стратегии по сокращению «тепловых островов» на уровне штат – город – отдельное здание (Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies) и др. В Европейском Союзе развернута большая программа, охватывающая 10 городов (Monitoring and forecasting of Urban Heat Island phenomenon in ten European cities the UHI project), главной задачей которой является интеграция спутникового дистанционного зондирования и данных наземных метеорологических станций в городские климатические модели, предназначенные для разработки мер по парированию угрозы перегрева ПГС.

В последние годы в Китае также уделяется значительное внимание изучению городских «островов тепла» (Guoyin et al., 2011; Yonghong et al., 2015). Так, по материалам тепловых космических съемок и наземных метеорологических режимных наблюдений детально исследована пространственно-временная изменчивость теплового острова над Пекином. Отмечено, что зимой тепловой остров не наблюдается, а появляется весной и последовательно развивается от весны к лету и осени. Кроме того, показано, что в Пекине эффект городского теплового острова не пропорционален наблюдающейся в последние годы урбанизации территорий (Guoyin et al., 2011). В (Yonghong et al., 2015) при урбанизации территорий выявлено значительное влияние изменений альбедо ПГС на радиационный форсинг.

На пространстве СНГ исследованиями городских островов тепла с использованием материалов тепловых космических съемок в последние годы занимаются В.И. Горный, А.А. Тронин, Б.В. Шилин (Горный и др., 1997), Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко, И.А. Лабутина и др. (Балдина, Грищенко, 2011; Лабутина и др., 2012), В.И. Лялько, С.А. Станкевич,

[1] **Результирующая температура** – комплексный показатель теплового ощущения человека, объединяющий в единой числовой величине температуру, влажность и движение воздуха и лучистую теплоту (радиационную температуру). Определяется по специальной температурной шкале (по номограммам). Так, при температуре воздуха +25°С, абсолютной влажности, равной 15 мм рт. ст., скорости ветра 0,5 м/с и средней радиационной температуре +15°С результативная температура будет равна +19,5°С.

В.Е. Филипович, А.Б. Крылова (Станкевич и др., 2015; Крылова, 2014), Б.С. Бусыгин, И.Н. Гаркуша, (Бусыгин, Гаркуша, 2012). В работах перечисленных авторов рассмотрены вопросы применения тепловой аэрокосмической съемки при исследованиях энергоэффективности городской инфраструктуры и экологического состояния крупных городов, в том числе и для городов Заполярья (Варенцов и др., 2014).

В настоящее время эффективным и доступным инструментом изучения «тепловых островов» над городами является инфракрасная (ИК) тепловая космическая съемка, по результатам которой восстанавливается температура земной поверхности (ТЗП). Материалы этой съемки, регулярно выполняемой в течение последних 20–30 лет спутниками систем EOS и Landsat, хранятся в архивах свободного доступа.

В качестве объектов настоящего исследования были выбраны Киев и Санкт-Петербург. Эти два крупных города расположены в различных физико-географических условиях, что позволяет вычленить общие закономерности, не обусловленные природными факторами. Предметом исследования является тепловая реакция ПГС на изменение климата и рост урбанизации.

Целью настоящей статьи является прогноз температуры ПГС Санкт-Петербурга и Киева в условиях изменяющегося климата, основанный на выявлении закономерностей изменений уходящего длинноволнового излучения городов, зарегистрированного ИК-тепловой космической съемкой за последние несколько десятков лет. Такой прогноз необходим для создания моделей карт ожидаемого к 2025 г. нагрева ПГС Санкт-Петербурга и Киева под действием глобального потепления. Прогноз может быть использован для уточнения разрабатываемых планов социально-экономического развития городов, таких, как «Стратегия 2020 – Санкт-Петербург» и «Концепции «Невская перспектива – 2025». Окончательный прогноз пространственного распределения температуры ПГС в дальнейшем предполагается выполнить на основе спутникового картографирования теплофизических свойств ПГС.

Материалы и методы

Анализ изменения температуры ПГС проводился на основе космических данных спутников NOAA(AVHRR) и Aqua/Terra(MODIS) (продукт Land Surface Temperature (LST) and Emissivity 8-Day L3 Global 1km) – региональный уровень и спутников серии Landsat – локальный уровень.

Для формирования базы космических данных из архивов NASA и USGS для территорий Ленинградской и Киевской областей (*рис. 1*) на период с 1983 по 2014 гг. в формате Hierarchical Data Format было получено более 1500 цифровых карт ТЗП, восстановленных по материалам съемки спутниками NOAA (AVHRR), Aqua/Terra (MODIS) (8-ми суточные композиты на период с 4 июля по 5 августа каждого года – время наибольшего прогрева ПГС). При анализе результатов учитывалось,

что спутник Terra (MODIS) выполнял съемку в утреннее время суток ~ 11 ч по МСК, а Aqua (MODIS) днем в ~ 13 ч МСК.

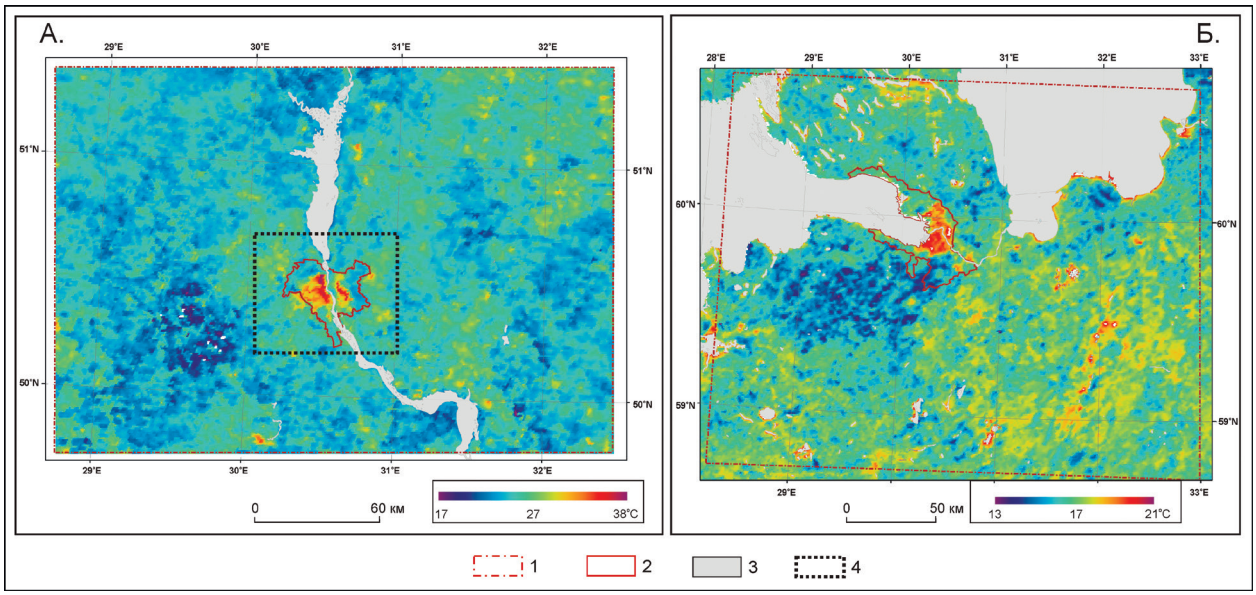

Рис. 1. Карты ТЗП, восстановленных по материалам тепловой съемки спутником Aqua (MODIS) на территории: А. Киева и Киевской области. Дата съемки: 04.08.2010 г. Б. Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Дата съемки: 07.08.2010 г.
1. Внешняя граница исследуемой территории Киевской и Ленинградской областей.
2. Территории Киева и Санкт-Петербурга. 3. Акватории. 4. Границы карты на рис. 3

Для наиболее жарких дней самого теплого за исследуемый период времени лета 2010 г. (4 августа для Киева и 7 августа для Санкт-Петербурга) были получены исходные тепловые изображения со спутника Aqua (MODIS) (*рис. 1*).

Все изображения были приведены к картографической основе и размещены в ГИС проектах. Далее были созданы маски городов и неурбанизированных территорий суши, в пределах которых с 1983 по 2014 гг. для каждого ежегодного интервала времени с 4 июля по 5 августа вычислялась усредненная по этому интервалу времени и по площади (*рис. 1*) ТЗП. Результатом явились многолетние ряды ТЗП (*рис. 2*).

Для более локального анализа температуры ПГС Киева и близлежащих территорий использован архив многозональных изображений видимого, ближнего ИК и ИК-теплового диапазонов спектра электромагнитных волн, полученных USGS по результатам съемки спутниками серии Landsat за период с 1985 по 2015 г. Сцены отбирались на наиболее теплые месяцы года (июнь – август). Обработка изображений, полученных спутниками Landsat, включала несколько этапов (Станкевич и др., 2015):

- выделение фрагментов, радиометрическая калибровка;
- создание маски растительности на основе вегетационного индекса NDVI и расчет плотности растительности;
- районирование территории на основе классификации многоспектральных изображений с последующим выбором для каждого типа поверхности справочных коэффициентов теплового излучения;

- восстановление термодинамической температуры поверхности с учетом влияния атмосферы по тепловым изображениям и полученной карты коэффициентов теплового излучения;
- построение временного ряда на основе всех карт температур ПГС.

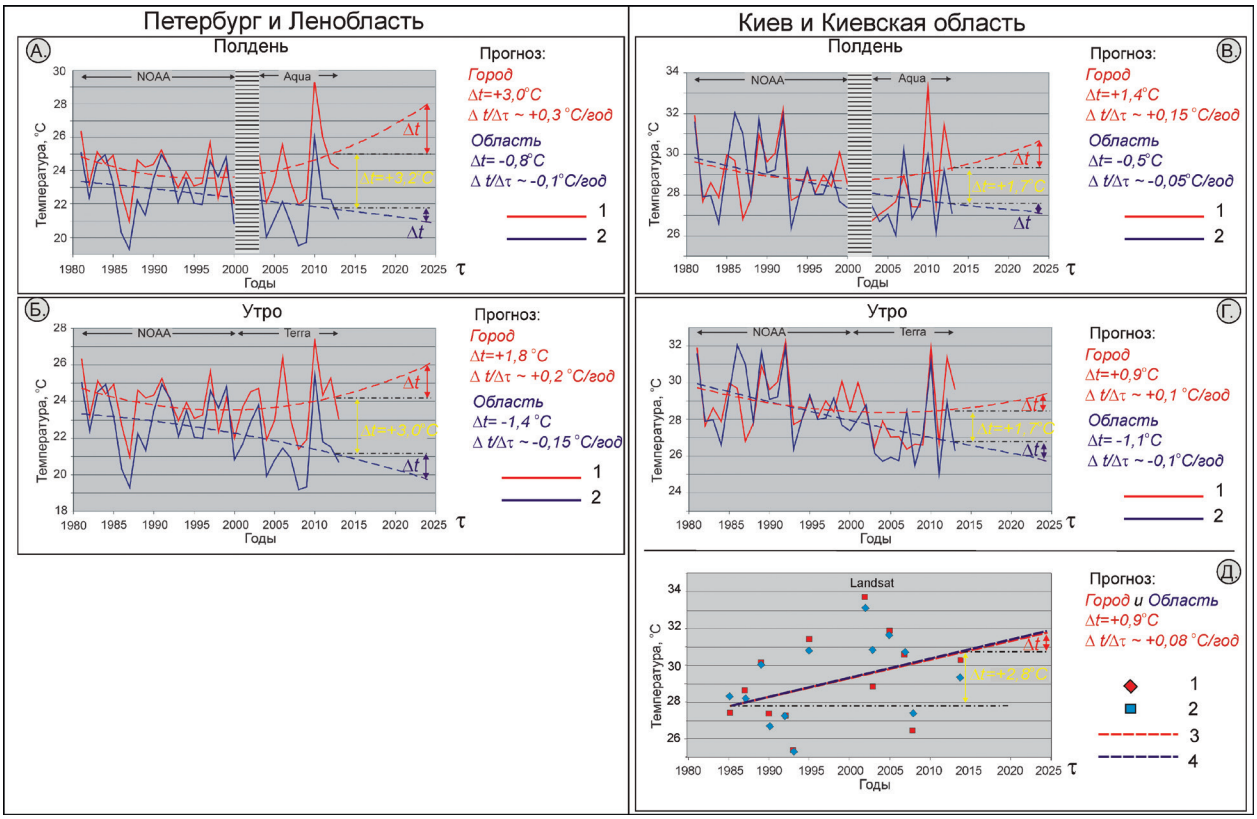

Рис. 2. А–Д. Многолетние временные ряды ТЗП, усредненной за сезон максимального прогрева (с 4 июля по 5 августа), полученные по материалам съемок территорий Санкт-Петербурга и Ленобласти, Киева и Киевской области спутниками серий EOS и Landsat. Скорость изменения температуры рассчитана как отношение приращения температуры ПГС Δt за временной интервал Δτ=10 лет на который выполнялся прогноз.

А) Дневные температуры (спутники NOAA и Aqua): 1. Санкт-Петербурга. 2. Ленинградской области.
Б) Утренние температуры (спутники NOAA и Terra): 1. Санкт-Петербурга. 2. Ленинградской области.
В) Дневные температуры (спутники NOAA и Aqua): 1. Киева. 2. Киевской области.
Г) Утренние температуры (спутники NOAA и Terra): 1. Киева. 2. Киевской области. Пунктиром показаны линии многолетних трендов, рассчитанных полиномом второго порядка. Горизонтальной штриховкой отмечен промежуток времени, между запусками спутников Terra и Aqua.
Д) Утренние температуры (спутники Landsat): 1. Киева. 2. Киевской области. 3 и 4, соответственно, многолетние линейные тренды температуры ПГС Киева и Киевской области

Для временных рядов в каждой точке строились линейные тренды температур ПГС за исследуемый период. Результатом явилась цифровая карта скорости изменения температур ПГС Киева и пригородной зоны для утреннего времени суток (*рис. 3*).

Для всей исследуемой площади Киева и пригородной зоны, как и для каждого административного района города (*рис. 3*), были проанализированы среднегодовые приросты температур, вычислялись статистические данные, строились многолетние тренды температуры поверхности, анализировались тенденции их развития.

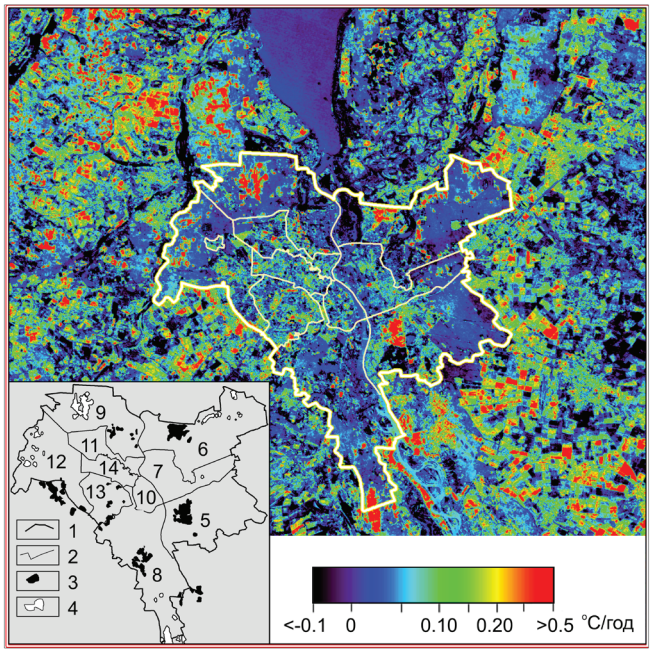

Рис. 3. Карта скорости изменения утренних температур ПГС Киева в июле-августе за период 1985 – 2015 гг. Условные обозначения на врезке: 1 – Городская черта Киева. 2 – Границы административных районов. 3. Участки нового строительства. 4. Вырубки в лесопарковых зонах. Районы: 5. Дарницкий, 6. Деснянский, 7. Днепровский, 8. Голосеевский, 9. Оболонский, 10. Печерский, 11. Подольский, 12. Святошинский, 13. Соломенский, 14. Шевченковский

Прогноз температуры ПГС на основании анализа временных рядов ТЗП выполнялся путем построения в программе Excel тренда и продления его на 10 лет вперед. Для ТЗП, полученных спутниками NOAA и EOS тренд рассчитывался как полином второго порядка (*рис. 2А–Г*), а для данных по Киеву, полученных спутниками серии Landsat, использован линейный тренд (*рис. 2Д*).

Для оценки достоверности прогнозирования температуры ПГС в 2024 г. применялась методика расчета доверительных интервалов, разработанная для случая представления многолетних тенденций полиномом второго порядка. (Болышев, Смирнов, 1983; Шалабанов, Роганов, 2002). Результаты оценок приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Среднеквадратические ошибки отклонения температуры ПГС от линии регрессии σ_r и прогноза в 2024 г. σ_f.

Спутник	***Киев***		***Киевская обл.***		***Санкт-Петербург***		***Лен. область***	
	σ_r,°C	σ_f,°C	σ_r,°C	σ_f,°C	σ_r,°C	σ_f,°C	σ_r,°C	σ_f,°C
NOAA-Aqua	±1,70	±5,69	±1,61	±5,36	±1,56	±5,20	±1,75	±5,83
NOAA-Terra	±1,73	±6,17	±1,84	±6,56	±1,57	±5,59	±1,76	±6,29

Превышение температуры ПГС над температурой линии тренда в 2010 г. в +4,5°С (*рис. 2А*) соответствует приблизительно трем среднеквадратическим отклонениям

(σ_r=1,56°C). Достаточно большие ошибки прогноза на 2024 г. являются результатом значительного интервала времени, на который выполнен этот прогноз. Тем не менее, для обоснования мероприятий по парированию угрозы перегрева ПГС целесообразно использовать как статистически усредненные значения трендов, так и возможные максимальные границы доверительного интервала прогноза.

Результаты

Интегральная динамика температуры ПГС

Петербург и Ленинградская область. Анализ временных рядов (*рис. 2*) показывает, что с 2004 по 2014 гг. наблюдался рост температуры ПГС Санкт-Петербурга, в том числе и по сравнению с окружающей, неурбанизированной территорией Ленинградской области. Летом 2014 г. многолетний тренд дневной температуры ПГС более, чем на +3,2°C превышал уровень тренда ТЗП Ленинградской области (*рис. 2А*). Вместе с тем, за период с 1983 г. по 2014 г. дневная температура поверхности территории Ленинградской области монотонно снизилась на 1,4°C (*рис. 2А*).

Киев и Киевская область. Многолетние изменения температуры ПГС Киева и окружающей территории Киевской области качественно аналогичны наблюденным в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. На количественном же уровне видно (*рис. 2В, Г*), что в многолетнем плане превышение температуры ПГС в Киеве по отношению к областным территориям почти в два раза меньше, чем в Санкт-Петербурге, и в 2014 г. составило в дневное время суток +1,7°C (в Санкт-Петербурге составило + 3,2°C).

Локальная динамика температуры ПГС Киева

По результатам обработки материалов съемки спутниками Landsat с 1985 по 2014 гг. отмечается устойчивое увеличение усредненных температур поверхностей ПГС и ближайших пригородов на +2,2°C (*рис. 2Д*). Средний ежегодный прирост для июля – августа за период 1985–2014 гг. составил по Киеву и по пригородной зоне +0,08 °C/год (*рис. 2Д*).

В черте города прирост температур распределен неравномерно (*табл. 2*). Наибольший прирост (+3,1 ÷ +3,7°C) наблюдается в центральных (Шевченковский, Соломенский, Подольский и Печерский) районах, где в последние 20 лет бурно развивалось офисно-жилищное строительство и сокращались зеленые зоны. Наименьший прирост температур ПГС (+2,3 ÷ +2,5°C) фиксируется в Голосеевском и Деснянском районах, значительные площади которых составляют лесопарковые и рекреационные зоны. Тем не менее и в этих зонах отмечается высокая скорость роста среднегодовых летних температур +0,015°C/год. Анализ материалов показал, что аномальный прирост ТЗП соответствует

площади вырубки в лесопарковой зоне (Оболонский район) (*4* и *9* на *рис. 2*). Проявляется это в значительном повышении ТЗП оголенной почвы или травянистого покрова по сравнению с температурой крон деревьев. Необходимо отметить, что в пригородной зоне высокими скоростями прироста ТЗП характеризуются сельскохозяйственные угодья. Скорее всего, это вызвано не природными, а антропогенными факторами, например, сменой агротехнологий или агрикультур. Эти изменения могли привести к более раннему, чем 30 лет назад, сбору урожая с последующей вспашкой, приводящей к высыханию верхнего слоя почвы и, соответственно, к дополнительному ее нагреву в дневное время суток из-за пониженной тепловой инерции.

Таблица 2. Средние утренние температуры ПГС Киева по материалам съемок спутниками серии Landsat. Прогнозные значения получены на основе линейных трендов прироста температур

Административные единицы	***Результаты мониторинга***			***Прогноз***	
	Температура ПГС 1985 г., °C	***Температура ПГС 2014 г., °C***	***Скорость нагрева с 1985 по 2014 гг., °C /год***	***Скорость нагрева с 2014 по 2024 гг., °C /год***	***Температура 2024 г., °C***
г. Киев (в черте города)	27,3	30,3	+0,097	+0,010	31,6
Дарницкий район	27,7	30,4	+0,079	+0,010	31,3
Деснянский район	27,5	29,8	+0,093	+0,089	30,6
Днепровский район	28,8	31,5	+0,086	+0,089	32,3
Голосеевский район	27,4	29,9	+0,106	+0,078	30,6
Оболонский район	27,3	30,4	+0,107	+0,010	31,3
Печерский район	29,5	32,6	+0,114	+0,122	33,6
Подольский район	29,2	32,5	+0,100	+0,122	33,6
Святошинский район	27,1	30,0	+0,121	+0,122	31,1
Соломенский район	30,8	34,3	+0,128	+0,178	35,9
Шевченковский район	30,3	34,1	+0,093	+0,133	35,3
Пригородная зона	27,9	30,7	+0,097	+0,111	31,7

Прогноз максимальных температур ПГС

Для сезона максимального прогрева прогноз средней температуры ПГС Киева и Санкт-Петербурга был выполнен на 10 лет вперед исходя из предположения, что все процессы, приводящие к повышению температуры ПГС, сохранятся. В этом случае следует ожидать, что в дневное время суток в многолетнем плане температура ПГС Киева повысится на +1,4°C, а Санкт-Петербурга возрастет на +3,0°C и будет на ~ +7°C превышать температуру поверхности территории Ленинградской области, которая, в свою очередь,

понизится на 0,8°С по отношению к уровню 2014 г. Вместе с тем, если будут реализованы верхние пределы доверительных интервалов (*табл. 1*), то средние по городу температуры ПГС могут для Киева возрасти на +1,4°С + 5,7°С = +7,1°С, а для Санкт-Петербурга на +3,0°С + 5,2°С = 8,2°С.

Для прогнозирования максимального нагрева на отдельных участках ПГС был выполнен анализ карт распределения дневных температур ПГС в Киеве и Санкт-Петербурге, построенных по материалам съемки спутником Aqua (MODIS) в наиболее жаркие дни 2010 г. (*табл. 3*). Было выявлено, что 4 августа 2010 г. в Киеве температура ПГС превышала уровень многолетнего тренда температуры ПГС на +11,0°С, а в Санкт-Петербурге 7 августа 2010 г. – на +9,0°С.

Таблица 3. Температуры ПГС в наиболее жаркий день 2010 г. (по результатам восстановления температуры по материалам съемки спутником Aqua (MODIS))

Температура ПГС	***Киев***	***Санкт-Петербург***	***Разность температуры ПГС Киева и Санкт-Петербурга***
	4 .08. 2010 г.	***7 .08.2010 г.***	***4.08-7.08.2010 г***
Средняя по площади, °С	+40,1	+33,6	+6,5
Уровень многолетнего тренда, °С	+29,1	+24,6	+4,5
Превышение средней по площади над уровнем многолетнего тренда, °С	+11,0°С	+9,0	+2,0
Максимальная на площади, °С	+49,4	+41,7	+7,7
Среднеквадратическое отклонение от средней по площади - σ_t, °С	±3,1	±2,7	

Добавка этого температурного отклонения к прогнозному в 2024 г. среднему значению дневной температуры в июле – августе позволяет на 2024 г. рассчитать среднюю по площади городов максимальную температуру ПГС для Киева как +41,6°С и для Санкт-Петербурга как +37,1°С. Отдельные же участки из-за пространственных вариаций тепловых свойств ПГС могут быть нагреты (*табл. 4*) в Киеве до +50,9°С, а в Санкт-Петербурге – до +45,2°С. При реализации в 2024 г. верхнего предела прогноза температуры ПГС соответственно увеличиваются и оценки (*табл. 4*).

В локальном плане (*табл. 2*), на июль – август 2024 г. прогнозная средняя утренняя температура ПГС по Киеву составит +31,6°С, в пригороде – +31,7°С, а по районам наиболее высокая температура ожидается в Соломенском (до +35,9°С) и Шевченковском (до +35,3°С), наиболее низкая – в Голосеевском и Деснянском (+30,6°С). Снижение темпов прироста утренних температур в Киеве и повышение в пригороде объясняется строительной активностью, наблюдающейся в последнее десятилетие за городской чертой.

Таблица 4. Прогноз дневной температуры ПГС на начало августа 2024 г. по материалам многолетних съемок спутниками NOAA и Aqua

Температура ПГС	***Киев***	***Санкт-Петербург***	***Разность температур ПГС Киева и Санкт-Петербурга***
Уровень многолетнего тренда в 2014 г., °С	+29,2	+25,1	+4,1
Верхний предел доверительного интервала прогноза ПГС к 2024 г. (*табл.1*), °С	+29,2 + σ_f=34,9	+25,1+ σ_f=30,3	+4,6
Прогноз нагрева к 2024 г. по отношению к 2014 г., °С	Δt=+1,4	Δt=+3,0	- 1,6
Средняя по площади в многолетнем плане к 2024 г., °С	+29,2 +1,4 =+30,6	+25,1 +3,0 =+28,1	+2,5
Верхний предел средней по площади к 2024 г., °С	34,9+1,4=+36,3	+30,3 +3,0=+33,3	+3,0
Средняя по площади в наиболее жаркий день 2024 г. при реализации многолетнего тренда, °С	+30,6 +11,0 =+41,6	+28,1 +9,0 =+37,1	+4,5
Средняя по площади в наиболее жаркий день 2024 г. при реализации верхнего предела прогноза, °С	+36,3 +11,0 =+47,3	+33,3 +9,0 =+42,3	+5,0
Максимальная дневная при реализации многолетнего тренда, °С	+41,6 +3σ_t = +50,9 σ_t = ±3,1	+37,1 +3σ_t = +45,2 σ_t = ±2,7	+5,7
Максимальная дневная при реализации верхнего предела прогноза температуры ПГС, °С	+47,3 +3σ_t = +56,6 σ_t = ±31	+42,3 +3σ_t = +50,4 σ_t = ±2,7	+6,2

Обсуждение результатов

Полученные в результате анализа материалов тепловых космических съемок разнонаправленные тенденции в изменении летних ТЗП Ленинградской и Киевской областей (*рис. 2*) оказались в противоречии с имеющимися представлениями о глобальном потеплении. Поэтому была выполнена верификация полученных результатов путем сравнения космических данных с результатами синхронных наблюдений температуры воздуха на метеостанциях (*рис. 4*).

Корреляционный анализ показал, что наблюдается надежная статистическая связь между температурой воздуха, измеренной на метеостанциях, и ТЗП по космическим данным (*рис. 4*). Таким образом, отпадают все сомнения, связанные с возможными ошибками восстановления ТЗП по данным космических съемок спутниками серий NOAA и EOS, которые могли бы явиться причиной столь неожиданных разнонаправленных тенденций изменения температур в городах и окружающих их областных территорий.

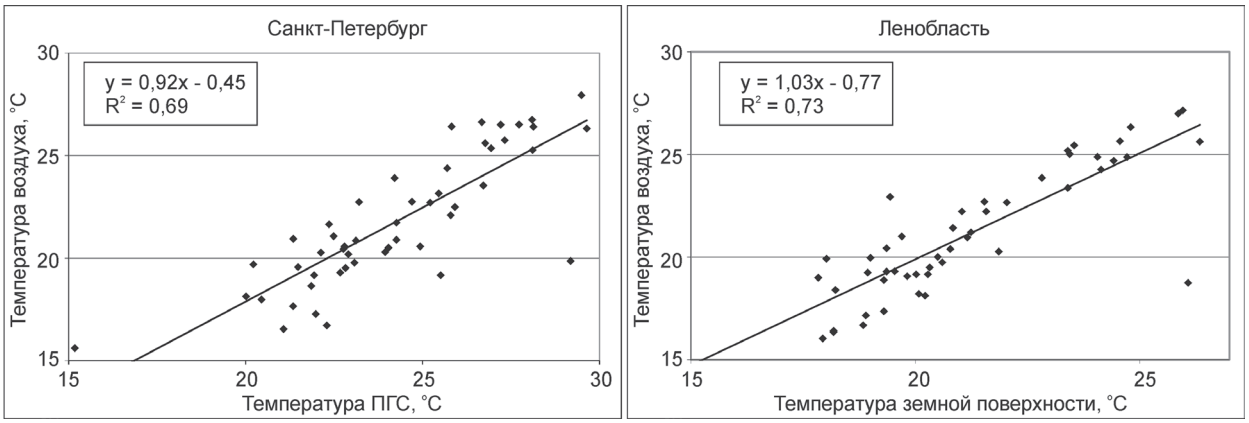

Рис. 4. Сопоставление ТЗП по данным ИК-тепловых спутниковых съемок с измерениями температуры воздуха на высоте 2 м над дневной поверхностью на метеостанциях Санкт-Петербург и Белогорка (Ленобласть). Температуры поверхности по спутниковым данным использованы для: Санкт-Петербурга – только на участках вплотную примыкающих к метеостанции; для Ленобласти – на всей исследуемой территории

Следует также отметить различие многолетних трендов утренних температур ПГС Киева и его пригородной зоны, полученных по данным съемок спутниками серий NOAA, EOS и Landsat. Это может быть как следствием того, что сцены спутников Landsat захватывают только ближайшие пригороды, в которых также велась плотная застройка, так и результатом больших погрешностей алгоритмов восстановления ТЗП по материалам съемок спутниками Landsat по сравнению с таковыми для материалов съемок спутниками EOS.

Выявленные закономерности позволили предположить, что рост температуры ПГС происходит как в результате нового строительства из-за уменьшения площади зеленых зон и, соответственно, снижения охлаждающего влияния испарения, так и из-за повышения расхода энергии. Снижение же температуры поверхности окружающих территорий Ленинградской области может происходить за счет:

- роста в последние годы количества осадков (Второй оценочный доклад…, 2014);
- роста биомассы лесных экосистем Карельского перешейка, и, соответственно, роста охлаждающего влияния эвапотранспирации влаги в лесах (большинство этих лесов были посажены после войны);
- роста биомассы и, соответственно, эвапотранспирации влаги на землях сельскохозяйственного назначения, заброшенных и зарастающих мелколесьем после изменения системы хозяйствования в начале 90-х годов прошлого века.

Кроме того, можно предположить, что городской «тепловой остров» вызывает дополнительную атмосферную конвекцию – подъем нагретого воздуха над городом и приток на его место из областных территорий более холодных воздушных масс, что должно проявляться в росте скорости движения воздушных масс в направлении от области к городу. В результате должна наблюдаться повышенная теплоотдача и охлаждение пригородных зон. Безусловно, справедливость высказанных гипотез необходимо тщательно проверить.

Наблюденный с 1981 по 2014 гг. в Киеве прирост дневной температуры ПГС (+1,7°C) в 1,9 раза ниже, чем в Санкт-Петербурге (+3,2°C). Как видно на *рис. 3,* области

новой застройки индицируются высокими скоростями роста температуры ПГС. Необходимо отметить, что в Санкт-Петербурге с 2005 по 2014 гг. введено в эксплуатацию 27,1 млн. м^2 жилой площади (Стерник, 2014). В Киеве за тот же промежуток времени введено 13,3 млн. м^2 нового жилья (Введение в эксплуатацию…, 2015), что в 2 раза меньше, чем в Санкт-Петербурге. Анализ статистической связи между объемом ввода жилья и тенденциями в изменении температуры ПГС Санкт-Петербурга (*рис. 5*) показывает наличие высокого коэффициента корреляции. Этого и следовало ожидать, т.к. при строительстве расходуется значительное количество энергии, в новостройках уменьшается площадь зеленых зон и, соответственно, снижается охлаждающее влияние растительности на температуру ПГС.

Рис. 5. Зависимость между суммарными (накопленными, начиная с 2005 г.) введенными жилыми площадями Санкт-Петербурга и трендом температуры ПГС (рис. 2А), полученным по результатам спутниковых съемок. Эпоха: 2005–2014 гг. Цифрами возле точек показаны года, для которых получены значения

Прогнозируемое к 2024 г. повышение дневной температуры ПГС Киева на +1,4°С, также приблизительно в два раза ниже, чем для Санкт-Петербурга (на + 3,0°С), что, скорее всего, произойдет при сохранении в Санкт-Петербурге удвоенного, по сравнению с Киевом, темпа ввода нового жилья.

Отсюда следует вывод о том, что температура ПГС является надежным индикатором строительной активности, а уравнение регрессии (*рис. 5*) может использоваться для получения независимых от официальной статистики количественных данных, в том числе и для ранжирования регионов по экономической активности.

Результаты наземных измерений температуры ПГС, выполненные 31.07.2014 в Киеве (*табл. 5*) в один из наиболее жарких дней года, показывают, что дневные температуры ПГС Киева 4 августа 2010 г., полученные по данным съемки спутником Aqua (*табл. 2*) по порядку величин совпадают с данными наземных измерений.

Таблица 5. Результаты наземных измерений температуры ПГС Киева 31.07.2014 г

Тип ПГС	$t_д$, ˚C	$t_к$, ˚C	$t_в$, ˚C	***Время, (местное) чч : мм***
Крыша железная, окрашенная	69,0	54,0[2]	29,3	09 : 50
Асфальт	47,7	49,5	34,6	11 : 38
Тротуарная плитка	48,0	44,0	33,7	12 : 00
Газон на проспекте	41,7	41,0	33,1	12 : 19
Газон на стадионе	30,5	36,5	33,7	12 : 32
Песок (берег озера)	42,3	52,3	37,1	12 : 40
Вода (озеро)	20,7	20,8	37,1	12 : 45

$t_д$ – температура поверхности измеренная дистанционно,°C;
$t_к$ – температура поверхности измеренная контактно, °C;
$t_в$ – температура воздуха измеренная на высоте 1,5 –2,0 м, °C.

[2] Столь существенное занижение контактной температуры по сравнению с дистанционно-измеренной может объясняться малой толщиной и, соответственно, малой тепловой инерционностью кровельного железа. В результате контактный датчик при измерениях может существенно увеличивать тепловую инерцию всей системы и в дневное время суток снижать температуру тонкого листа кровельного железа. Кроме того, кровельное железо, даже окрашенное, имеет низкий коэффициент теплового излучения. Если это не учтено, то и термодинамическая (контактная) температура будет занижаться.

Полученные в рамках настоящего исследования результаты показывают, что спутниковые ИК-тепловые съемки также могут рассматриваться как перспективный инструмент для обнаружения зон перегрева ПГС, что является важной задачей сохранения необходимого уровня экологической безопасности городского населения.

Анализ полученных результатов показывает, что критика академика К.Я. Кондратьева, высказанная по поводу причин «глобального потепления», подтверждается результатами сравнительного спутникового мониторинга температуры поверхности городской среды и окружающих их областных территорий. К.Я. Кондратьев отмечал, что основные метеостанции расположены вблизи крупных городов, где наблюдаются «тепловые острова» и рост измеряемых на этих метеостанциях температур частично обусловлен локальными техногенными факторами, в частности возрастанием расходования энергии, а не только глобальным повышением в атмосфере концентраций парниковых газов.

Полученные результаты показывают чрезвычайную актуальность настоящего исследования, одной из задач которого является научное обоснование подходов к снижению угроз экологической безопасности населению городов, вызванных «глобальным потеплением».

Выводы

1. За последние 30 лет выявлено превышение дневной температуры ПГС по сравнению с окружающими областными территориями: для Санкт-Петербурга на +3,2°C,

а для Киева на +1,7°С. Одновременно на пригородных территориях Ленинградской и Киевской областей отмечено монотонное снижение ТЗП. Выдвинута гипотеза, что рост количества осадков, зарастание областных территорий растительностью, а также специфическая атмосферная конвекция, вызванная «тепловым островом» могут быть возможными причинами этой тенденции.

2. Прогноз показывает, что в Киеве к 2024 г. в июле – августе следует ожидать возрастание средней многолетней по площади дневной температуры ПГС до +30,6°С ÷ +31,6°С, при верхней оценке нагрева отдельных участков ПГС до +56,6°С. Соответственно, в Санкт-Петербурге следует ожидать возрастание средней многолетней по площади дневной температуры ПГС до +28°С (повышение еще на +3,0°С), при верхней оценке нагрева отдельных участков ПГС до +50,4°С.
3. Температура ПГС является количественной характеристикой строительной активности и может быть использована для дистанционного мониторинга ввода нового жилья в крупных городах.
4. ТЗП также оказалась и надежным индикаторам выявления вырубок в лесопарковых зонах, что может использоваться при контроле их экологического состояния.
5. На региональном уровне достоверные результаты о распределении ТЗП могут быть оперативно получены в результате анализа материалов съемок спутниками серии EOS. При решении локальных задач предпочтительнее использовать данные спутников серии Landsat.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант №14-05-90416 и НАН Украины, грант № 10-05-14 (У) “Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок)”.

Литература

1. *Балдина Е.А., Грищенко М.Ю.* Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat 7/ETM+ // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 62–69.
2. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
3. *Бусыгин Б.С., Гаркуша И.Н.* Геоинформационная технология температурного картографирования городов по данным космических съемок // GeoInformatics. 2012. 14 May. http:// www.earthdoc.org/publication/(актуально в 2015).
4. *Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А.* Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.
5. Введение в эксплуатацию жилья. Укрстат. Киев. [Электронный ресурс]: http://www.kiev.ukrstat.gov.ua (актуально в 2015).
6. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. М.: 2014. 61 с.
7. *Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Шилин Б.В.* Дистанционный измерительный мониторинг теплопотерь городских и промышленных агломераций (на примере Санкт-Петербурга и Хельсинки) // Теплоэффективные технологии. Информационный бюллетень. № 2. 1997. С.17–23.
8. Доклад Конференции Сторон о работе ее семнадцатой сессии, состоявшейся в Дурбане с 28 ноября по 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 (актуально в 2015).

9. Инструкция по проведению инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации строительства, реконструкции объектов в г. Москве МОСКОМАРХИТЕКТУРА. Москва. 2008 г. (http://www.complexdoc.ru/ntdtext/537016) (актуально в 2015).
10. *Крылова А. Б.* Мониторинг формирования и развития «теплового острова» города Киева // Український журнал дистанційного зондування Землі. № 2. 2014. С. 35–37.
11. *Лабутина И.А., Балдина Е.А., Грищенко М.Ю., Хайбрахманов Т.С.* Опыт использования космических снимков при экологических исследованиях территории Москвы // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2012. Выпуск 12. С. 50–55.
12. *Марченко М.И.* Классификация энтомофауны трупа. Биология мух и их судебно-медицинское значение // Судебно-медицинская экспертиза. 1980. № 2. С. 17–20.
13. *Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В., Горный В.И., Тронин А.А.* Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съемки // Український журнал дистанційного зондування Землі. 2015. № 7. С. 14–23.
14. *Стерник Г.М.* Рынок жилья городов России в 2014году: колебательная стабилизация. http://sofgi.ru/upload/iblock/da0/da06323218e019c287bcc521021814ed.pdf. (актуально в 2015 г).
15. *Шалабанов А.К.*, *Роганов Д.А.* Эконометрика: Учебно-методическое пособие // Казань: ТИСБИ, 2002. 56 с.
16. *Cai G., Du M., Yong Xue.* Monitoring of urban heat island effect in Beijing combining ASTER and TM data // International Journal of Remote Sensing. Vol. 32. No. 5. 2011. P. 1213–1232.
17. *Price J.C.* Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data // Monthly Weather Review. 1979. Vol. 107. No. 11. P. 1554–1557. doi: http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2 (актуально в 2015).
18. *Yonghong Hu, Gensuo Jia, Christine Pohl, Qiang Feng, Yuting He, Hao Gao, Ronghan Xu, John van Genderen, Jinming Feng.* Improved monitoring of urbanization processes in China for regional climate impact assessment // Environmental Earth Sciences. June 2015. Vol. 73. No. 12. P. 8387–8404.

Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery)

V.I. Gornyy[1], V.I. Lyalko[2], S.G. Kritsuk[1], I.Sh. Latypov[1], A.A. Tronin[1]
V.E. Filippovich[2], S.A. Stankevich[2], O.V. Brovkina[3], A.V. Kiselev[1], T.A. Davidan[1], N.S. Lubskii[2], A.B. Krylova[2]

[1] Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint-Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru
[2] Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth NAS of Ukraine, Kiev 01601, Ukraine
E-mail: casre@casre.kiev.ua
[3] Global Change Research Institute (CzechGlobe), Brno 603 00, Czech Republic
E-mail: olgabrovkina@mail.ru

The paper attempts to predict surface temperatures of the urban environment of Kiev and St. Petersburg that can be expected in 2024 if the observed trend of warming will continue. The archival materials of satellite infrared thermal survey performed by the EOS and Landsat satellites were used. Time series of urban surface temperature (UST) for a long period (from 1984 to 2014) were compiled from those data and UST trends were calculated. A forecast of the expected average and maximum UST was done. As a result, in Kiev in July–August of 2024 the average noon time UST should be expected at +30,6°C ÷ +31,6°C and for the hottest days +41,6°C with maximal UST in certain locations of +51,0°C. Accordingly, in St.-Petersburg the average noon time UST can be +28°C (increasing by +3.0°C), for the hottest days +37,0°C with maximal UST in certain locations of +45,1°C. The upper UST estimations for Kiev and Saint-Petersburg hold quite high values, accordingly, 56,6°C and 50,4°C. It is shown that the multi-year trend of average UST is a reliable quantitative characteristic of the accumulated volumes of building industry activity. Therefore, it is a scientific basis for application of satellite infrared-thermal data for monitoring the building industry activity. It is also shown that surface temperature is a reliable indicator of deforestation. Thus, infrared-thermal satellite monitoring can be used for environmental control of forested areas.

Keywords: urban area, “heat island”, climate, warming, satellite, temperature, time series, forecast, heating, building industry, deforestation

Accepted: 18.01.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-176-191

References

1. Baldina E.A., Grishchenko M.Yu., Issledovanie "teplovogo ostrova" Moskvy po raznosezonnym snimkam Landsat 7/ETM+ ("Heat Island" of Moscow Investigation by using multi-time images of Landsat 7/ETM+), *Geoinformatika*, 2011, No. 3, pp. 62–69.
2. Bol'shev L.N., Smirnov N.V., *Tablitsy matematicheskoi statistiki* (Tables of mathematical statistics), Moscow: Nauka, 1983, 416 p.
3. Busygin B. S., Garkusha I. N., Geoinformatsionnaya tekhnologiya temperaturnogo kartografirovaniya gorodov po dannym kosmicheskikh s'emok (Geoinformative technology of urban areas temperature mapping by using results of satellite survey), *GeoInformatics*, 2012, 14 May. http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=66439 (November 01, 2015).
4. Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A., Izuchenie fenomena gorodskogo ostrova tepla v usloviyakh polyarnoi nochi s pomoshch'yu eksperimental'nykh izmerenii i distantsionnogo zondirovaniya na primere Noril'ska (Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 329–337.
5. http://www.kiev.ukrstat.gov.ua (November 01, 2015).
6. Vtoroi otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii (The second evaluation report about climate change at the territory of Russian Federation), Rosgidromet, Moscow, 2014, 61 p.
7. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Shilin B.V., Distantsionnyi izmeritel'nyi monitoring teplopoter' gorodskikh i promyshlennykh aglomeratsii (na primere St-Peterburga i Khel'sinki) (Remote measuring monitoring of urban and industrial heat losses (on the example of Saint-Petersburg and Helsinki), *Teploeffektivnye tekhnologii. Informatsionnyi byulleten'*, No. 2, 1997, pp. 17–23.
8. http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/rus/09a01r.pdf (November 01, 2015).
9. http://www.complexdoc.ru/ntdtext/537016 (November 01, 2015).
10. Krylova A. B., Monitoring formirovaniya i razvitiya "teplovogo ostrova" goroda Kieva (Monitoring of "Heat Island" of Kiev formation and development), *Ukraïns'kii zhurnal distantsiinogo zonduvannya Zemli*, No. 2, 2014, pp. 35–37.
11. Labutina I.A., Baldina E.A., Grishchenko M.Yu., Khaibrakhmanov T.S., Opyt ispol'zovaniya kosmicheskikh snimkov pri ekologicheskikh issledovaniyakh territorii Moskvy (Experience of satellite images application on environmental investigations of Moscow territory), *Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya*, 2012, Issue 12, pp. 50–55.
12. Marchenko M.I., Klassifikatsiya entomofauny trupa. Biologiya mukh i ikh sudebno-meditsinskoe znachenie (Classification of entomofauna of cadaver. Biology of flies and their medical value), *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*, 1980, No. 2, pp. 17–20.
13. Stankevich S.A., Filippovich V.E., Lubskii N.S., Krylova A.B., Kritsuk S.G., Brovkina O.V., Gornyy V.I., Tronin A.A., Interkalibratsiya metodov vosstanovleniya termodinamicheskoi temperatury poverkhnosti urbanizirovannoi territorii po materialam teplovoi kosmicheskoi s'emki (Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal-infrared satellite imaging), *Ukraïns'kii zhurnal distantsiinogo zonduvannya Zemli*, 2015, No. 7, pp. 14–23.
14. http://sofgi.ru/upload/iblock/da0/da06323218e019c287bcc521021814ed.pdf. (November 01, 2015).
15. Shalabanov A.K., Roganov D. A., *Ekonometrika* (Econometrics), Kazan': TISBI, 2002, 56 p.
16. Cai G., Du M., Xue Y., Monitoring of urban heat island effect in Beijing combining ASTER and TM data, *International Journal of Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 5, pp. 1213–1232.
17. Price J.C., Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data, *Monthly Weather Review*, 1979, Vol. 107, No. 11, P. 1554–1557. doi: http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2 (November 01, 2015).
18. Yonghong Hu, Gensuo Jia, Christine Pohl, Qiang Feng, Yuting He, Hao Gao, Ronghan Xu, John van Genderen, Jinming Feng, Improved monitoring of urbanization processes in China for regional climate impact assessment, *Environmental Earth Sciences*, June 2015, Vol. 73, No. 12, pp. 8387–8404.