О циркуляции воздушных масс в «тепловых островах» городов

В.И. Горный¹, В.К. Донченко^{1,2}, Д.А. Самуленков², М.В. Сапунов², О.В. Бровкина³,
С.Г. Крицук¹, И.Ш. Латыпов¹, А.А. Тронин¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: mikesf@mail.ru

³ Институт исследования глобальных изменений Чешской академии наук
Брно, 60300, Чехия
E-mail: olgabrovkina@mail.ru

В связи с наблюдающимся потеплением климата следует ожидать опережающий рост температуры в пределах так называемых «тепловых островов» крупных городов. Поэтому изучение механизма повышения температуры поверхности городской среды становится все более актуальным для прогнозирования и поддержания необходимого уровня экологической безопасности населения крупных городов. В настоящем кратком сообщении приведены научные факты, полученные с применением методов дистанционного зондирования и подтверждающие модель конвективной циркуляции воздушных масс в пределах «тепловых островов». Модель была построена по результатам математического моделирования скоростей движения воздушных масс над городской территорией, лишенной растительности. Для верификации этой модели использованы результаты теплового космического мониторинга Санкт-Петербурга и Киева и наземные лидарные измерения скоростей ветра в центре Санкт-Петербурга. Признаками циркуляции воздушных масс стали противоположные тенденции в изменении температуры поверхности городской среды в центре Санкт-Петербурга и Киева и на областных территориях, а также специфическое распределение вертикальных и горизонтальных скоростей ветра в центре Санкт-Петербурга. Отмечено, что экспериментальная верификация модели конвективной циркуляции воздушных масс, возникающей при формировании городского «теплового острова», позволяет спланировать эксперимент по определению возможных дальностей аэротехногенного переноса загрязнений, продуцируемых в городах.

Ключевые слова: «тепловой остров», атмосферная конвекция, космическая съемка, лидар

Одобрена к печати: 25.05.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-207-212

Введение

Известно, что над крупными городскими и промышленными агломерациями формируются так называемые «тепловые острова» (urban heat islands), в которых температура поверхности городской среды (ПГС) на несколько градусов выше, чем в пригородных территориях (Cotton, Pielke, 2007; Price, 1979). В последние десятилетия наблюдается глобальное потепление климата, вызывающее дополнительное повышение температуры «тепловых островов». Установлено, что превышение температуры над уровнем биоклиматического комфорта человека вызывает возрастание риска климаточувствительных заболеваний у городского населения. Поэтому становится актуальным парирование возрастающего негативного влияния «тепловых островов» на уровень экологической безопасности населения городов.

Разработка эффективных методов снижения нагрева ПГС требует знания механизма формирования «тепловых островов». Последние достижения дистанционного зондирования окружающей среды городов показали справедливость теоретически обоснованной гипотезы циклической конвекции в атмосфере над крупными городами (Cotton, Pielke, 2007).

Целью настоящего краткого сообщения является информация научной общественности об этих новых, экспериментально полученных научных фактах, подтверждающих образование конвективной циркуляции воздушных масс при летнем нагреве ПГС.

1. Гипотеза циркуляции воздушных масс над крупными городами

Математическое моделирование позволило построить модель конвекции воздушных масс, возникающей при формировании «тепловых островов» над городами (*рис. 1*) (Avisar, Pielke, 1989; Cotton, Pielke, 2007).

Было показано, что при отсутствии ветра в городах следует ожидать подъем нагретого сухого воздуха со скоростью 0,1–0,2 м/с до высоты ~500 м, и на замену — поступление в атмосферу города холодного и влажного воздуха пригородов (Avisar, Pielke, 1989) (*рис. 1*). Авторами этой модели выдвинуто гипотетическое предположение¹ (Cotton, Pielke, 2007), что в пригороде из-за большего процента территории, покрытой растительностью, испарение выше, и по сравнению с городом, соответственно, ниже температура земной поверхности (ТЗП).

2. Экспериментальные научные факты, доказывающие циркуляцию воздушных масс «тепловых островов»

2.1. Специфика динамики ТЗП в городе и на окружающих территориях

По результатам анализа многолетних рядов ТЗП Санкт-Петербурга и Киева, построенных по материалам тепловой космической съемки, выявлена противоположная тенденция трендов изменений ТЗП в пределах Санкт-Петербурга и Киева и на окружающих эти города территориях (Горный и др., 2016): рост температуры в пределах «теплового острова» и ее падение на окружающих территориях (*рис. 1*).

Совместный анализ модели (*рис. 1*) с результатами теплового спутникового мониторинга ТЗП в городах и на окружающих территориях (*рис. 2*) показал, что построенная только по результатам математического моделирования модель потоков воздушных масс хорошо объясняет эффекты, зарегистрированные тепловой космической съемкой. Ясно, что многолетняя тенденция повышения температуры ПГС в «тепловом острове» будет приводить к возрастанию скорости подъема нагретых воздушных масс в городе. При этом скорость движения обратной ветви циркуляционной ячейки в приземном слое атмосферы («2» на *рис. 1*) также должна возрасти в силу условия неразрывности воздушного потока, поднимающегося в центре города. Повышение скорости движения воздуха в приземном

¹ Специально отмечено авторами — Cotton W.R., Pielke R.A., что это пока еще гипотетическое предположение.

слое по направлению к центру города будет приводить к дополнительному росту испарения. Отсюда следует вывод, что разнонаправленные многолетние тенденции изменения ТЗП в пределах города и области (рис. 2) подтверждают наличие обратной ветви циркуляции воздушных масс в модели «теплового острова» («2» на рис. 1).

Рис. 1. Модель циркуляции воздушных масс в «тепловом острове» города, расположенном в гумидной зоне, соответствующая второй половине дня (по (Cotton, Pielke, 2007) с добавлением результатов верификации модели дистанционными методами (Горный и др., 2016; Сапунов и др., 2016)): 1 — векторы вертикальных и горизонтальных скоростей ветра (подтверждено лидарными съемками); 2 — векторы скорости ветра, подтвержденные результатами анализа материалов тепловой космической съемки; 3 — векторы скорости нисходящих потоков воздуха (требуется экспериментального подтверждения); H_c — высота конвективной ячейки

Рис. 2. Многолетние временные ряды дневной ТЗП, усредненной за сезон максимального прогрева (с 4 июля по 5 августа), полученные по материалам съемок Санкт-Петербурга и Ленобласти, Киева и Киевской области спутниками серий EOS и NOAA: 1 — ТЗП городов; 2 — ТЗП областных территорий. Пунктиром показаны линии многолетних трендов ТЗП, рассчитанных полиномом второго порядка: 3 — городские территории; 4 — областные территории (Горный и др., 2016)

2.2. Результаты измерений скорости движения воздушных масс «тепловом острове» Санкт-Петербурга

Еще одним научным фактом, доказывающим формирование атмосферной конвекции, вызванной «тепловым островом» становятся результаты лидарного зондирования воздушных потоков в атмосфере Санкт-Петербурга (рис. 3), выполненных в СПбГУ под руководством В.К. Донченко.

Рис. 3. Вертикальные профили скорости ветра (22 июня 2015 г. 15 ч 07 мин) по результатам зондирования атмосферы Санкт-Петербурга импульсным доплеровским лидаром (Сапунов и др., 2016). H_c — высота конвективной ячейки

Измерения выполнялись импульсным доплеровским лидаром, установленным в Ресурсном центре «Обсерватория экологической безопасности» научного парка СПбГУ в центре Санкт-Петербурга, на Васильевском острове.

Применение лидара позволило более детально, чем аэрологическим радиозондированием, изучить структуру потоков воздушных масс над городом в наиболее теплое время суток (рис. 3). Так, на высотах от 100 до 500 м наблюдалось постепенное повышение вертикальной скорости ветра от практически 0 до 0,8 м/с с последующим ее снижением до 0 м/с на высоте почти 800 м. При этом для горизонтальной скорости наблюдалась обратная картина. В приземном слое горизонтальная скорость ветра составляла около 6 м/с, на высоте 400 м горизонтальная скорость ветра упала до 2 м/с, после чего вновь возросла до 4 м/с и оставалась на таком уровне до высоты 1600 м. Такое соотношение вертикальных и горизонтальных скоростей ветра, исходя из условия неразрывности потока воздушных масс, говорит о смене направления их движения. На этой основе наблюдаемое распределение скоростей ветра может быть интерпретировано следующим образом: начиная со 100 м и до высоты 400 м превалирует подъем нагретых воздушных масс, что одновременно проявляется в снижении горизонтальной скорости ветра. Начиная с высоты 400 м и до высоты

в 800 м замедляется вертикальная скорость подъема воздушных масс, и в соответствии с моделью циркуляции (*рис. 1*) возрастает горизонтальная скорость в силу перемещения большей части воздушных масс в сторону окраины города. Необходимо отметить, что измеренная в пределах «теплового острова» Санкт-Петербурга вертикальная скорость потоков воздушных масс и высота их подъема по порядку величин совпадают со значениями, полученными при математическом моделировании (Avisar, Pielke, 1989).

Таким образом, результаты лидарных измерений скоростей ветра над городом экспериментально подтверждают наличие восходящей и уходящей (направленной от центра к пригородам) ветвей циркуляции воздушных масс в «тепловом острове» Санкт-Петербурга («1» на *рис. 1*).

Выводы

Дистанционными наблюдениями подтверждены три ветви циркуляционной модели атмосферной конвекции, возникающей при формировании «теплового острова» городов. Остается доказать измерениями наличие нисходящей ветви циркуляции воздушных масс в «тепловом острове» и оценить расстояние от границ города, на котором она расположена. Подобное исследование позволит оценить дистанцию, на которую в пределах областных территорий осуществляется аэротехногенный перенос загрязнений, продуцируемых в городах.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 14-05-90416) и Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ.

Литература

1. Горный В.И., Лялько В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Бровкина О.В., Киселев А.В., Давидан Т.А., Лубский Н.С., Крылова А.Б. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2016t2/176-191.pdf.
2. Сапунов М.В., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Самуленков Д.А., Кузнецов А.Д. Сопоставление вертикальных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 149–160. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2016t1/149-160.pdf.
3. Avisar R., Pielke R.A. A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology // Monthly Weather Review. 1989. Vol. 117. P. 2113–2136. URL: [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493\(1989\)117%3C2113%3AAPHLS%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493(1989)117%3C2113%3AAPHLS%3E2.0.CO%3B2).
4. Cotton W.R., Pielke R.A. Human Impacts on Weather and Climate. Cambridge: University Press. 2007. 308 p. URL: <http://www.geoversum.by/catalog/item677.html>.
5. Price J.C. Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data // Monthly Weather Review. 1979. 107. P. 1554–1557. URL: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2).

On air circulation in “heat islands” of urban areas

V.I. Gornyy¹, V.K. Donchenko^{1,2}, D.A. Samulenkoy², M.V. Sapunov², O.V. Brovkina³,
S.G. Kritsuk¹, I.Sh. Latypov¹, A.A. Tronin¹

¹*Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

²*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: mikecf@mail.ru*

³*Global Change Research Institute CAS, Brno 60300, Czech Republic
E-mail: olgabrovkina@mail.ru*

The ongoing global warming process leads to surpassing rise of temperature within the so-called “heat islands” of large cities. Thus, it is important to investigate the mechanics of the temperature increase within the urban environment to forecast and maintain the standards of environmental safety for population of large cities. This brief report presents the scientific facts obtained by remote sensing methods that confirm the model of convective circulation of air masses within “heat islands”. That semi-quantitative model was built on the basis of mathematical simulation of air masses movements over urban areas. Model verification was performed with the help of infrared thermal satellite monitoring of St. Petersburg and Kiev and ground-based lidar sounding of wind speeds in St. Petersburg city center. Opposite trends in temperature dynamics of urban environment in the city centers and surrounding areas as well as specific distribution of vertical and horizontal wind speeds in the center of St. Petersburg indicate air mass circulation. It was concluded that experimental verification of the convective air mass circulation model allows planning an experiment to estimate the possible distance range of air transportation of pollutants produced in city.

Keywords: “heat island”, air circulation, model, satellite imagery, lidar

Accepted: 25.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-207-212

References

1. Gornyy V.I., Lyal'ko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A., Lubskii N.S., Krylova A.B., Prognoz teplovoi reaktsii gorodskoi sredy Sankt-Peterburga i Kiev na izmenenie klimata (po materialam s'emok sputnikami EOS i Landsat) (Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 176–191, available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2016t2/176-191.pdf.
2. Sapunov M.V., Mel'nikova I.N., Donchenko V.K., Samulenkoy D.A., Kuznetsov A.D., Sopostavlenie vertikal'nykh profilei skorosti i napravleniya vetra, poluchennykh na osnove lidarnykh i aerologicheskikh izmerenii (Correlation between lidar and upper-air measurements of vertical profile of wind speed and direction), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 149–160, available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2016t1/149-160.pdf.
3. Avissar R., Pielke R.A., A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Monthly Weather Review*, 1989, Vol. 117, pp. 2113–2136, available at: [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493\(1989\)117%3C2113%3AAPOHLS%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493(1989)117%3C2113%3AAPOHLS%3E2.0.CO%3B2).
4. Cotton W.R., Pielke R.A., *Human Impacts on Weather and Climate*, Cambridge: University Press, 2007, 308 p, available at: <http://www.geoversum.by/catalog/item677.html>.
5. Price J.C., Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data, *Monthly Weather Review*, 1979, 107, pp. 1554–1557, available at: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1554:AO-TUHI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AO-TUHI>2.0.CO;2).