

УДК 551.501.8+551.584

О ВЛИЯНИИ МИКРОКЛИМАТА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА

В.И. Демин, Б.В. Козелов

*Полярный геофизический институт, г. Апатиты
demin@pgia.ru*

На примере г. Апатиты показано, что в условиях неоднородной подстилающей поверхности и сложного рельефа ИК-картирование городских территорий с целью оценки городского острова тепла должно дополняться микроклиматическими изысканиями. Обнаруженные в городе аномалии должны быть соотнесены с соответствующими аномалиями в схожих по ландшафту фоновых условиях.

Ключевые слова: микроклимат, городской остров тепла, дистанционное зондирование.

Наиболее известной чертой городского климата является существование внутри застройки области более высокой по сравнению с окружающей его сельской местностью температурой воздуха – городской остров тепла (ГОТ). Его возникновение происходит за счет целого ряда физических процессов: наличие поверхностей (стены зданий, крыши, дороги), поглощающих солнечную радиацию; использование строительных материалов, накапливающих тепло в дневные часы; снижение турбулентного выноса тепла и меньших энергозатрат на испарение; удержание загрязненным воздухом и уличными каньонами уходящего длинноволнового излучения; выделение тепла при работе автотранспорта, отоплении города, функционировании электрических установок. Остров тепла является следствием урбанизации и рассматривается как один из самых наглядных примеров мезомасштабного изменения климата в результате деятельности человека [6].

Городской остров тепла традиционно обнаруживается по положительной разности температур между городскими и ближайшими сельскими метеорологическими станциями (мс). Однако города, как правило, занимают значительные площади с различными ландшафтами, а на территориях с неоднородной подстилающей поверхностью или сложным рельефом всегда встречаются участки с более высокой или низкой температурой, контраст между которыми может быть даже сильнее, чем при переходе из одной климатической зоны в другую [1]. Например, в [4] сообщается, что в условиях очень выровненного участка

протяженностью около 500 м и с перепадом высот 20 м разность минимальных температур при ясной штилевой погоде во все сезоны превышала 5–6 °С, достигая 9 °С. В таких условиях результат оценки ГОТ может оказаться зависящим от микроклимата в районе положения сравниваемых городских и фоновых мс.

Необходимость сведения к минимуму факторов, формирующих естественные аномалии в поле температуры, при установлении количественной оценки техногенного воздействия на тепловой режим приземного слоя воздуха накладывает существенные ограничения на использования сетевых данных: из-за небольшого числа мс трудно подобрать довольно близкие из них и в то же время схожие по микроклимату. Кроме того, метеорологические наблюдения в городах часто представлены всего одной мс. Из-за особенностей положения (например, внутри парковой зоны или на берегу водоема) ее показания могут оказаться не вполне пригодными для изучения ГОТ, так как тепловой режим оказывается нехарактерным для других территорий города.

Эффективным инструментом изучения ГОТ могла бы стать инфракрасная (ИК) тепловая космическая съемка, по результатам которой восстанавливается температура земной поверхности. На ИК-снимках ГОТ (поверхностный ГОТ) выделяется как зона повышенной яркости, соответствующей положительной тепловой аномалии в пределах города. Очевидным преимуществом использования спутниковых снимков перед сетевыми измерениями при ограниченном числе мс является одновременный охват значительной территории, позволяющий сравнивать городские и пригородные участки и исследовать пространственные неоднородности ГОТ внутри районов города. Данный метод исследования ГОТ получил большую популярность благодаря открытому (Интернет) доступу к многолетним данным дистанционного зондирования (например, на сайте <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).

При изучении ГОТ по ИК-снимкам основное внимание уделяется неоднородностям, создаваемым промышленными и жилыми зонами, районами с различной плотностью застройки и озеленения, лесопарками, водными объектами. Вместе с тем температура подстилающей поверхности и температура искусственных городских поверхностей (стены зданий, крыши, дорожные покрытия и т. д.) являются параметрами, чувствительными к микроклимату, в т. ч. и потому, что зависят от температуры воздуха.

Для иллюстрации на рис. 1 приведены разности температуры воздуха и дорожного покрытия (асфальт) между автоматическими дорожными метеорологическими станциями (АДМС) «1166» и «1203», установленными на федеральной трассе «Кола». Первая из них находится в верхней части холма (210 м н.у.м.), а вторая – в 30 км к северу на равнине (130 м н.у.м.). Выбор зимнего времени обусловлен тем, что в это

время года благодаря снежному покрову в значительной степени сглажены неоднородности подстилающей поверхности, и в формировании микроклимата в наибольшей степени проявляется роль рельефа. При установлении ясной и тихой погоды из-за сильного радиационного выхолаживания холодный воздух стекает с приподнятых участков местности, вследствие чего разность температур между вершинами холмов (АДМС «1166») и прилегающей равниной (АДМС «1203») сильно увеличивается. Как видно на рис. 1, несмотря на тепловую инерцию дорожных сооружений [5] разность температур асфальта в местах размещения данных АДМС меняется аналогичным образом.

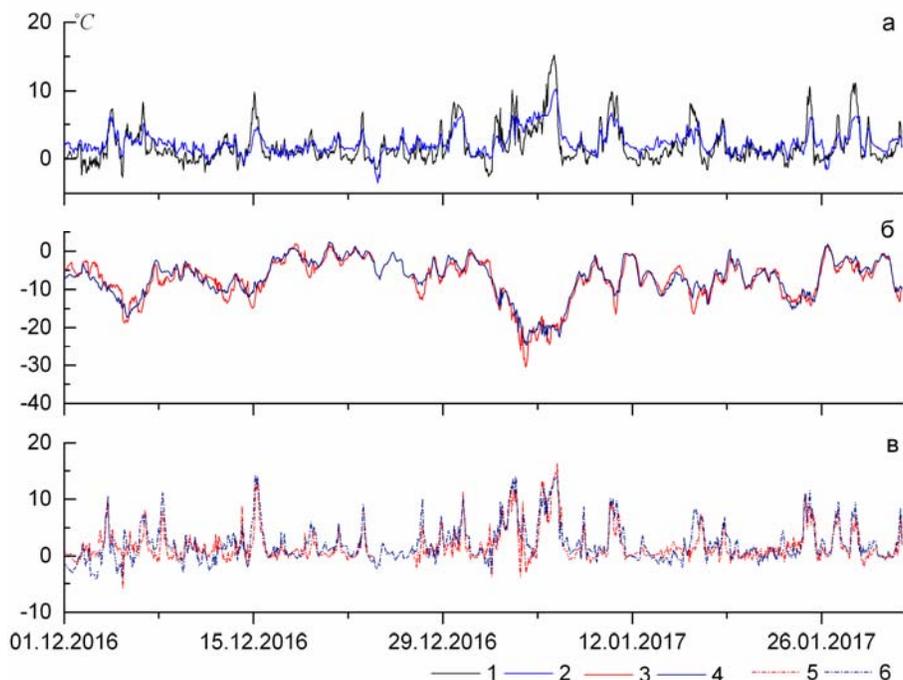


Рис. 1. Разность температур дорожного покрытия (1) и воздуха (2) между АДМС «1166» и «1203» (а); температура воздуха на крыше ПГИ (3) и на АДМС «1166» (4) (б); разность температур воздуха на крыше ПГИ и АМСГ «Апатиты» (4), АДМС «1166» и АМСГ «Апатиты» (5) (в).

На рис. 2 показана разность температур воздуха над плоской крышей (в 50 см от ее поверхности) Полярного геофизического института (ПГИ), находящегося в верхней части холма, занимаемого г. Апатиты (200 м. н.у.м.), и на АДМС «1166» (расстояние между ними около 53 км). Датчик на крыше оказывается подверженным тепловым потокам из здания и города в целом. Тем не менее вариации температуры на крыше очень похожи на вариации на расположенной в схожих орографических условиях фоновой АДМС «1166». Однако более

важно, что разности температур воздуха над крышей ПГИ и на фоновой АМСГ «Апатиты» (160 м. н.у.м.; расстояние ~15 км) практически синхронны с изменениями разности между АДМС «1166» и АМСГ «Апатиты» (расстояние ~55 км), что указывает на единую природу возникновения аномалий: радиационное выхолаживание захватывает большую территорию, и сток холодного воздуха, как правило, наблюдается одновременно и с городского холма, и с холма, где расположена АДМС «1166». Полной синхронности между разностями не наблюдается из-за неоднородностей в поле облачности и ветра.

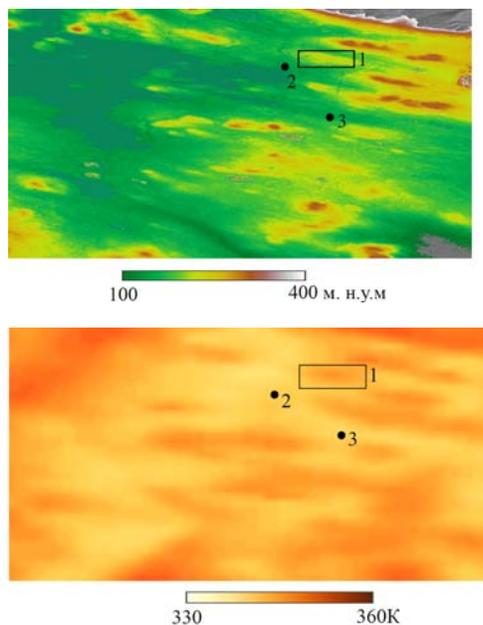


Рис. 2. Цифровая модель рельефа (сверху) и температура поверхности в центральной части Кольского п-ва 05.01.17 г. (~19.30 UT) (снизу) по данным измерений MODIS (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>); отмечено положение г. Апатиты (1), ГМС «Апатиты» (2) и АМСГ «Апатиты» (3).

Приведенные примеры показывают, что тепловое излучение искусственных городских поверхностей, которое используется для оценки величины ГОТ по результатам ИК-съемки, содержит в себе информацию не только об интенсивности антропогенных источников тепла на том или ином участке, но и особенностях окружающего микроклимата.

Как известно, главным требованием к ИК-снимкам местности является полное отсутствие облачности всех ярусов, дымки, тумана. Кроме того, качественные контрастные снимки получаются при отсутствии ветра, сглаживающего термические неоднородности отдельных

участков [2]. Таким образом, используемые для анализа пространственного распределения температуры космические снимки оказываются полученными в тех же погодных условиях, когда в наибольшей степени проявляются микроклиматические неоднородности изучаемой территории (ясное небо, штиль или слабый ветер). Естественные и антропогенные аномалии поверхностной температуры накладываются друг на друга, усиливая или ослабляя ГОТ. Этот эффект можно наглядно продемонстрировать на примере г. Апатиты (Мурманская область).

Внутри городской застройки в г. Апатиты при анализе инфракрасных спутниковых изображений довольно четко выделяется область повышенных температур. Ее существование подтверждается также данными прямых метеорологических измерений. Так, например, в 03 ч 6 января 2017 г. на территории Академгородка в г. Апатиты (180 м н.у.м.) температура воздуха была $-19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как на ближайшей к городу гидрометеорологической станции «Апатиты» (135 м н.у.м., 2,5 км к юго-западу) $-36,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на АМСГ «Апатиты» (160 м н.у.м., в 16 км южнее) $-31,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Формально данных фактов оказывается достаточным для заключения о существовании в городе на участке площадью всего $3,5\text{ км}^2$, где нет крупных промышленных объектов, интенсивного ГОТ. В [9] ГОТ в г. Апатиты, оцененный по ИК-снимкам, достигает $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что, в частности, на порядок превышает характерное значение, рассчитанное по 56 крупнейшим городам Европы в зимний период: $0,4\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10].

Однако, на наш взгляд, картина более сложная. Из-за небольших размеров город практически полностью поместился в верхней части обширного холма, на 20–70 м возвышающегося над окружающей равниной. Такие местоположения зимой (а ночью и во все сезоны) характеризуются более высокими температурами, чем прилегающие низменные участки. Антропогенный ГОТ в г. Апатиты оказывается усиленным за счет особенностей рельефа до необоснованно высоких значений, характерных для крупнейших мегаполисов мира (до $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой и $6\text{--}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом) [3]. В то же время, обнаруженные в городе аномалии не выходят за диапазон естественной микроклиматической изменчивости температуры в холмистом рельефе. Так, если не ограничиваться территорией города и самых ближайших пригородов, то по тем же ИК-изображениям легко обнаружить, что не менее теплыми оказываются и ближайшие обширные холмы, не подверженные антропогенному влиянию (рис. 2).

6.01.2017 г., когда в г. Апатиты оказалось теплее окрестностей более чем на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, на АДМС «1166», которая, как и мс в г. Апатиты, находится на обширном холме, температура оказалась почти такой же высокой, как и в городе ($-19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), и без техногенного городского тепла.

Ситуация с г. Апатиты не является уникальной. Например, в Ханты-Мансийске наиболее теплая область города по ИК-снимкам оказалась расположенной в его наиболее высокой части (рис. 3), а значит, положительная аномалия температуры также не может быть в полной мере отнесена к антропогенному ГОТ. Заметим, что стоковые явления и перераспределение холодного воздуха по элементам рельефа возникают уже при сравнительно небольших перепадах высот (10–15 м) и уклонах всего в несколько градусов [7]. Такие вариации имеют место практически в любом городе и не могут быть игнорированы.

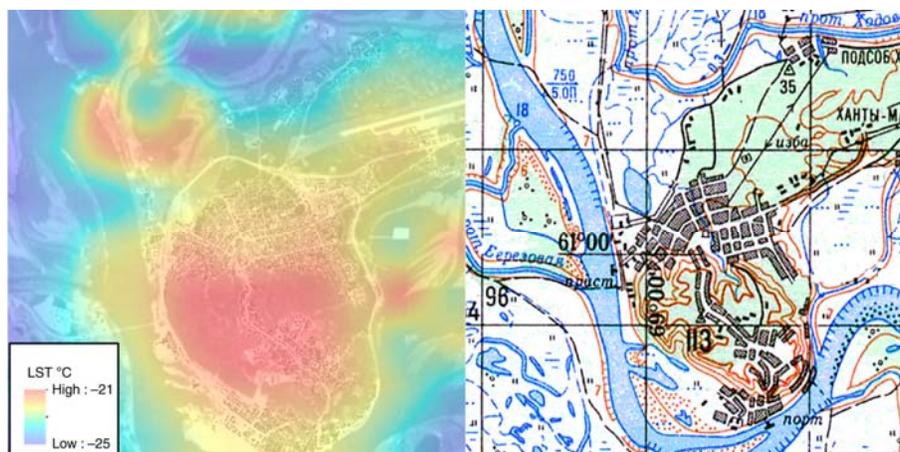


Рис. 3. Температура поверхности (городской остров тепла) в Ханты-Мансийске по данным измерений MODIS за 15-летний период (слева) [8] и рельеф города (справа).

Заключение

Приведенные примеры показывают, что в условиях неоднородной подстилающей поверхности и сложного рельефа (включая даже слабовсхолмленные участки) ИК-картирование городских территорий, по всей видимости, не является достаточным для оценки масштаба антропогенного воздействия на тепловой режим воздуха в городе. Оно должно обязательно сопровождаться дополнительными микроклиматическими изысканиями, а обнаруженные в городе аномалии должны соотноситься с соответствующими аномалиями в схожих по ландшафту фоновых условиях. Микроклиматические вариации по величине сопоставимы с ГОТ крупнейших мегаполисов мира. Они могут существенно исказить поле температуры в исследуемом городе и его окрестностях вплоть до того, что за антропогенный ГОТ может быть выдано другое явление.

Поступила в редакцию 14.08.2017 г.

Список использованных источников

1. Гольцберг И.А. Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 282 с.
2. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
3. Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В. Влияние микроклимата на точность оценки городского «острова тепла» // Труды ГГО. 2017. Вып 584. С. 74-93.
4. Каушила К.А. К вопросу о территориальном распределении и годовом ходе различий минимальной температуры воздуха, обусловленных рельефом // Труды ГГО. 1970. Вып. 264. С. 90-96.
5. Кирюхин Г.Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2014. № 30. С. 309-328.
6. Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры / под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 250 с.
7. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 360 с.
8. Davy R., Esau I. Differences in the efficacy of climate forcings explained by variations in atmospheric boundary layer depth // Nature Communication. 2016. Vol. 7. P. 11690. DOI: 10.1038/ncomms11690.
9. Konstantinov P.I., Grishchenko M.Y., Varentsov M.I. Mapping urban heat islands of arctic cities using combined data on field measurements and satellite images based on the example of the city of Apatity (Murmansk oblast) // Izvestiya RAS. Atmos. Ocean. Phy. 2015. Vol. 51, No. 9. P. 992-998.
10. Peng S. et al. Surface urban heat island across 419 global big cities // Environ. Sci. & Technol. 2011. V. 46, No. 2. P. 696-703.

SUMMARIES

About the influence of the microclimate on the results of the remote estimation methods / Demin V.I., Kozelov B.V. // Proceedings of the Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 365. P. 15-21.

Using the town Apatity as the example it is shown that thermal infrared imagery used for the detection of urban heat island in conditions of inhomogeneous underlying surface and complex relief should be supplemented by microclimate measurements. Detected temperature anomalies in the city must be compared with anomalies in similar rural landscapes.

Keywords: microclimate, urban climate, urban heat island, remote sensing.