

ГЕОГРАФИЯ ГОРОДОВ

УДК 551.588.7

ОСОБЕННОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ Г. НАДЫМА ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.И. Варенцов¹, И.А. Репина², А.В. Глазунов³, Т.Е. Самсонов⁴, П.И. Константинов⁵,
В.М. Степаненко⁶, **В.Н. Лыкосов⁷**, А.Ю. Артамонов⁸, А.В. Дебольский⁹,
А.С. Печкин¹⁰, А.В. Соромотин¹¹

^{1, 2, 3, 6, 7, 9} Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова

^{1, 2, 8, 9} Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН

^{1–4, 6, 7} Московский центр фундаментальной и прикладной математики

^{3, 7} Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН

^{1, 4, 5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹⁰ Научный центр исследования Арктики

¹¹ Тюменский научный центр СО РАН, Научно-исследовательский институт экологии и рационального использования природных ресурсов ТюмГУ

¹ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

² Зав. лабораторией взаимодействия атмосферы и океана, д-р физ.-мат. наук; e-mail: repina@ifaran.ru

³ Вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: and.glas@gmail.com

⁴ Кафедра картографии и геоинформатики, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

⁵ Кафедра метеорологии и климатологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: kostadini@mail.ru

⁶ Зам. директора, д-р физ.-мат. наук; e-mail: stepanen@srcc.msu.ru

⁷ Гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: lykosov@yandex.ru

⁸ Лаборатория взаимодействия атмосферы и океана, мл. науч. сотр.; e-mail: sailer@ifaran.ru

⁹ Лаборатория взаимодействия атмосферы и океана, мл. науч. сотр.; e-mail: and.debol@gmail.com

¹⁰ Научно-исследовательский отдел, науч. сотр.; e-mail: a.pechkin.ncia@gmail.com

¹¹ Отдел методологии междисциплинарных исследований криосферы,
гл. науч. сотр., д-р биол. наук; e-mail: a.v.soromotin@utmn.ru

В работе представлены результаты исследования формирования городского острова тепла в небольших городах арктического и субарктического регионов на примере г. Надыма (ЯНАО) в зимний период в условиях устойчивой стратификации атмосферы. В результате трех измерительных кампаний с использованием контактных и дистанционных измерений получены сведения об интенсивности и вертикальной протяженности городского острова тепла. Одновременные измерения профилей температуры и скорости ветра внутри города и за городом показали, что при сильно устойчивой стратификации в городе формируется перемешанный пограничный слой со стратификацией, близкой к нейтральной и высотой порядка 50 м. Для объяснения выявленного феномена было проведено вихреразрешающее моделирование турбулентного течения. В качестве набегающего на город потока использовалось типичное для зимних условий турбулентное течение в квазистационарном устойчиво стратифицированном пограничном слое над плоской поверхностью. Использовалась реальная трехмерная схема городской застройки, полученная на основе базы данных OpenStreetMap и уточненная оценками высот зданий по цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM и полевым наблюдениям их этажности. Результаты моделирования подтвердили формирование в городской среде перемешанного слоя и показали, что одним из важных механизмов образования городского острова тепла у поверхности является механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы. Это подтверждается тем, что турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) в городе по расчетам более чем в 10 раз выше, чем за его границами. Основным источником ТКЭ в городе является ее сдвиговая генерация на высоте зданий при их обтекании. Экспериментальные исследования и теоретические расчеты подтвердили факт существования выраженного городского острова тепла в условиях устойчивой стратификации для небольших полярных городов и позволили впервые оценить высоту его вертикального развития.

Ключевые слова: городской остров тепла, пограничный слой атмосферы, устойчивая стратификация

DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-64-78

ВВЕДЕНИЕ

Городские территории из-за активной антропогенной деятельности и особенностей свойств подстилающей поверхности оказывают существенное воздействие на микроклимат и состояние пограничного слоя атмосферы. Кроме хорошо исследованного эффекта городского острова тепла (далее – ОТ) [Huang, Lu, 2017; Oke et al., 2017; Tzavali et al., 2015, Юшков и др., 2019], города также влияют на облачность, осадки, мезомасштабные циркуляции и загрязнение атмосферы [Han et al., 2014; Varentsov et al., 2018]. Урбанизация оказывает существенное влияние на почву [Lokoshchenko et al., 2015], грунтовые воды [Benz et al., 2016] и растительные сообщества [Esau et al., 2016]. Влияние городов выходит далеко за пределы границ застроенных территорий. Это выражается, в частности, в существовании теплового следа за пределами города [Zhou et al., 2015] – вытянутых по ветру «городских шлейфов» более теплого и загрязненного воздуха, интенсификации конвективных процессов и увеличения сумм осадков с подветренной стороны от города [Han et al., 2014].

Но если для городов, и особенно мегаполисов умеренных и тропических широт, существует значительный объем исследований, в полярных областях до недавнего времени анализ ограничивался небольшим количеством наблюдений для городов Барроу [Hinkel et al., 2003] и Фэрбенкс [Magee et al., 1999] на Аляске, эпизодическими измерениями в российских городах Норильск [Варенцов и др., 2014] и Апатиты [Константинов и др., 2015]. В настоящее время эти данные дополнены продолжительными экспериментальными исследованиями микроклимата городов арктической зоны России (Апатиты, Надым, Новый Уренгой, Салехард и Воркута) в рамках кампании UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018], а также данными дистанционного зондирования [Miles, Esau, 2017]. Установлено, что зимой в высоких широтах может формироваться интенсивный ОТ: разность температуры между центром города и загородными территориями может достигать 5–6°C [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018]. Тем не менее полученные данные характеризуют лишь приземный метеорологический режим, тогда как влияние городской среды на структуру атмосферного пограничного слоя (АПС) для условий высоких широт остается практически неизученным.

Города высоких широт, как правило, невелики по размерам и расположены на слабо заселенных территориях. Известно, что накопление загрязнителей в городской среде определяется не только размещением источников загрязнения. Заметное влияние

оказывают рельеф, структура застройки и метеорологические факторы, определяющие рассеяние и накопление загрязняющих веществ [Baklanov et al., 2008; Регионы..., 2014]. Городские кварталы, особенно многоэтажные, представляют собой сложную, продуваемую на разных уровнях и с разным уклоном воздушными потоками систему поверхностей. Здания сильно изменяют ветровой режим в приземном слое атмосферы [Старченко и др., 2015], создавая участки осаждения пыли в замкнутых дворах и эффект «каньона» на крупных автомагистралях. Этот фактор приводит к значительной неоднородности поля загрязнения городской среды. Соответственно, оценка и прогноз микроклимата и экологической обстановки в городах и их окрестностях тесно связаны с задачей определения статистических характеристик стратифицированных турбулентных течений на масштабах отдельных зданий.

Учет влияния отдельных крупных городов (с характерным горизонтальным размером в несколько десятков километров) на состояние пограничного слоя атмосферы возможен в рамках мезомасштабных моделей атмосферы, таких как COSMO или WRF [Varentsov et al., 2018b; Юшков и др., 2019]. Шаг расчетных сеток по горизонтали в этих моделях составляет от нескольких сотен метров до нескольких километров, что требует использования специальных параметризаций, описывающих особенности обмена теплом, влагой и импульсом между атмосферой и урбанизированной поверхностью [Garuma et al., 2018]. В случае небольших городов такое разрешение становится явно недостаточным.

Одним из инструментов для изучения микромасштабной динамики турбулентных атмосферных течений и переноса примесей в городской среде является численное моделирование с использованием детализированных вихреразрешающих (large eddy simulation – LES) моделей. Задачей таких моделей является проведение расчетов турбулентных течений над идеализированными поверхностями городского типа с целью выяснения общих закономерностей взаимодействия атмосферного пограничного слоя с урбанизированной поверхностью [Anderson et al., 2015], а также для получения сведений об особенностях переноса примесей в городской среде [Li et al., 2016], особенно в условиях устойчивой стратификации [Глазунов и др., 2014а, 2014б].

Последнее время все чаще осуществляются попытки смоделировать турбулентность и перенос загрязнений в областях, имеющих геометрию, приближенную к топографии земной поверхности и архитектуре реальных городов [Giometto et al., 2016; Wang et al., 2018; Geletič et al., 2021]. В большинстве случаев такие расчеты проводятся на предельно грубых сетках, позволяющих только в первом

приближении учесть конфигурацию строений. Как правило, вычисления выполняются при нейтральной или неустойчивой стратификации. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений в городской среде, что характерно для полярных городов в зимний период, накладывает дополнительные требования как к качеству LES-моделей и их пространственному разрешению, так и к методикам постановки численного эксперимента [Глазунов, 2014б; Tomas et al., 2016; Li et al., 2016].

В настоящей работе на примере г. Надыма (ЯНАО) представлены результаты исследований влияния города на атмосферные процессы в городских условиях при устойчивой стратификации атмосферы по данным экспериментальных наблюдений и численного моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования городского пограничного слоя атмосферы. Важной особенностью зимнего метеорологического режима высоких широт является высокая повторяемость атмосферных инверсий. Долгоживущие устойчивые пограничные слои атмосферы способствуют концентрации загрязняющих веществ вблизи поверхности. При этом воспроизведение таких устойчивых слоев в моделях атмосферы пока затруднено. Проведенные ранее измерения UHIARC показали, что развитие ОТ в арктических городах характерно именно для ясной и безветренной антициклональной погоды, т. е. для условий, способствующих формированию приземных инверсий [Konstantinov et al., 2018; Varentsov et al., 2018]. С целью изучения взаимосвязи термического режима внутри городской застройки и стратификации АПС на фоне развития приземных инверсий с декабря 2018 г. по январь 2021 г. были проведены три интенсивные измерительные кампании в г. Надыме, направленные на получение экспериментальных данных о структуре приземного и пограничного слоя атмосферы.

Первая, наиболее продолжительная и масштабная по программе измерений кампания была проведена в декабре 2018 г. и включала в себя следующие виды наблюдений:

1. Мониторинг температуры в приземном слое атмосферы в городе и его окрестностях проводился с использованием сети из компактных термодатчиков iButton (производство Maxim Integrated) и градиентных термодатчиков Hobo MX2300 2x Ext Temp (производство Onset). Датчики iButton были установлены на ветвях кустов на высоте ≈ 2 м над поверхностью вдоль профиля, проходящего через город и фоновые территории. Градиентные датчики

Hobo были установлены на высотах 1,5 и 3 м над поверхностью в трех точках: в центре города рядом с ранее установленной автоматической метеостанцией UHIARC (рис. 1); на территории метеостанции Росгидромета в аэропорту Надыма и на территории Научного центра изучения Арктики в северной части города.

2. Мониторинг вертикального профиля температуры в фоновых (загородных) условиях выполнялся с использованием микроволнового температурного профилера (сканирующего радиометра) МТР-5 [Kadygrov, Pick, 1998]. Профилер был установлен на территории аэропорта г. Надыма, на крыше контейнера на высоте ≈ 3 м над поверхностью. Вертикальный диапазон измерений составлял от 0 до 1000 м, дискретность по вертикали – 50 м с уменьшением до 25 м в нижнем 100-метровом слое. В точке установки профилера также была размещена AMC Vaisala.

3. Мониторинг компонент радиационного баланса поверхности в фоновых условиях проводился с использованием измерительного комплекса Kipp&Zonen, который был установлен на территории метеостанции Росгидромета в аэропорту.

4. Для мониторинга условий температурной стратификации над городом использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro с установленными на нем контактными термодатчиками iMet-XF и iMet-XQ (производство Intermetsystems, США). Точка запуска квадрокоптера располагалась на бульваре Стрижева в южной части города в окружении плотной застройки (см. рис. 1). Вертикальный профиль температуры измерялся в ходе последовательного подъема и спуска квадрокоптера с вертикальной скоростью $\approx 0,5$ м/с (описание методики измерений и анализа данных см. в работах: [Varentsov et al., 2019; 2021; Репина и др., 2020]). Также по данным телеметрии квадрокоптера была получена оценка вертикального профиля скорости ветра [Varentsov et al., 2021].

Измерения проводились в условиях, близких к полярной ночи (высота солнца над горизонтом не превышала 3° , продолжительность светового дня составляла 3 ч).

Для проверки гипотез, выдвинутых по результатам кампании 2018 г., далее были проведены более короткие эксперименты в декабре 2019 и январе 2021 гг., в ходе которых удалось осуществить квазисинхронные профильные измерения в городе и за городом с использованием одного квадрокоптера, запускаемого поочередно в двух точках, или двух одновременно запускаемых квадрокоптеров. В данной работе приведены результаты предварительного анализа взаимосвязи эффекта ОТ и термической структуры АПС в устойчиво стратифицированных условиях по данным выполненных измерений.



Рис. 1. Оценка высоты зданий в г. Надыме по этажности в базе данных OSM, уточненная по ЦМР ArcticDEM: 1 – точка установки автоматической метеостанции UHIARC и датчика Hobo в городском парке; 2 – точка запуска квадрокоптера в 2018 и 2021 гг.; 3 – точка запуска квадрокоптера в 2019 г.; черным прямоугольником отмечена расчетная область LES-модели; стрелкой указано направление приземного ветра в модели

Fig. 1. Estimation of the buildings height in the city of Nadym by the number of storeys in the OSM database, refined using the ArcticDEM:

1 – location of the UHIARC automatic weather station and Hobo sensor in the urban park; 2 – quadcopter launch site in 2018 and 2021 and 3 – quadcopter launch site in 2019. The black rectangle marks the computational domain of the LES model. The arrow indicates the surface wind direction in the model

Цифровая модель городской застройки. Для интерпретации наблюдаемых эффектов и механизмов их формирования был поставлен численный эксперимент с вихреразрешающей моделью атмосферы для реальной застройки Надыма. Проведение такого эксперимента требовало построения трехмерной модели застройки. Для решения данной задачи использовалась открытая база пространственных данных OpenStreetMap (OSM) [https://www.openstreetmap.org/], методика работы с которой описана в статьях [Samsonov et al., 2015; Samsonov, Konstantinov, 2014], и цифровая модель рельефа ArcticDEM [Porter et al., 2018]. Была создана детальная база данных параметров городской среды Надыма с разрешением 1 м. Из базы данных OSM были извлечены контуры объектов застройки и выполнена оценка высоты каждого объекта. Оценка выполнялась двумя методами: на основе данных об этажности, присутствующей в OSM, и на осно-

вании фильтрации данных ArcticDEM. Для уточнения оценки высоты строений была произведена независимая оценка с использованием данных ЦМР ArcticDEM. Результирующая карта высоты зданий представлены на рис. 1.

Численное моделирование устойчиво стратифицированного турбулентного течения в городской застройке. Вихреразрешающая (LES, англ. Large Eddy Simulations) модель турбулентных течений ИБМ РАН [Глазунов, 2014а, 2014б; Glazunov et al., 2016] была адаптирована для расчета стратифицированной турбулентности для фрагмента реальной застройки в юго-западной части г. Надыма (см. рис. 1). Схема расчетов заключалась в совместном интегрировании LES-модели для двух расчетных областей, первая из которых служит генератором турбулентного потока, натекающего на городскую среду, а во второй рассчитывается динамика турбулентного течения между зданиями и над

городской поверхностью. Методика постановки подобного численного эксперимента описана в [Глазунов, Степаненко, 2015].

В качестве набегающего на город потока использовалось типичное для зимних условий турбулентное течение в квазистационарном устойчиво стратифицированном пограничном слое над плоской поверхностью. Это течение рассчитывалось в периодической по горизонтали расчетной области размером $1600 \times 400 \times 160$ м³ на равносторонней сетке с шагом 2 м (достаточно подробной для воспроизведения значительной части турбулентной изменчивости и деталей средних профилей температуры и скорости, включая низкоуровневое струйное течение на верхней границе пограничного слоя). Для первой области моделирования с однородной горизонтальной поверхностью LES-модель интегрировалась отдельно до достижения квазиравновесного состояния (7,5 ч модельного времени). Эта конфигурация модели во многом аналогична расчетам GABLS-1 [Beare et al., 2006], за исключением более быстрого охлаждения поверхности (-2 К/час) и меньшей начальной высоты перемешанного слоя (40 м).

Турбулентное течение, сгенерированное в первой расчетной области после достижения квазистационарных условий, использовалось в качестве граничных условий для второй расчетной области с реалистичной геометрией городской застройки. Сеточный размер этой области составлял $900 \times 720 \times 60$ узлов, шаг сетки – 2 м вблизи обтекаемых объектов, к боковым границам расчетной области и к ее верхней границе сетка растягивалась. На левой (наветренной) боковой границе второй расчетной области на каждом шаге по времени задавались значения скорости ветра и температуры, вычисленные в одном из вертикальных сечений первой области. Шаг по времени составлял 0,025 с. Период совместного интегрирования модели для двух областей составлял 40 мин модельного времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные наблюдений. Измерительная кампания 2018 г. позволила получить данные наблюдений для двух периодов морозной погоды с устойчивой стратификацией атмосферы (рис. 2). Первый, более короткий период наблюдался 20 декабря, когда температура за городом упала с -20 до -30°C , а интенсивность инверсии температуры в нижних 300 м достигала 10°C . В течение второго периода (с 22 по 26 декабря) температура резко упала с -5 до -40°C , а затем опустилась до -46°C на фоне мощной температурной инверсии с интенсивностью до 20°C в нижних 300 м. В течение обоих периодов фиксировался ярко выраженный эффект ОТ, интенсивность

которого (разность температуры между центром города и фоновыми точками) достигала 5°C и более.

По данным измерений установлена связь приземного ОТ с условиями стратификации нижнего 100-метрового слоя атмосферы. ОТ выражен наиболее ярко только в условиях существования приземной инверсии температуры. Например, после пика похолодания 22 декабря инверсия температуры в нижних 300 м осталась значительной, но приземные градиенты температуры уменьшились на фоне усиления скорости ветра (см. рис. 2). Также ослабили термические различия между городом и окружающими территориями.

Зондирование с использованием квадрокоптера позволило сравнить условия стратификации атмосферы над городом и фоновой территорией. Один из запусков был произведен вечером 22 декабря, на пике похолодания и развития приземного ОТ (см. рис. 2). Он позволил получить вертикальный профиль температуры воздуха над городом до высоты 130 м. Его сравнение с данными измерений профилимера МТР-5 в аэропорту показало, что положительная разность температуры между точками сохраняется в пределах всего диапазона измерений, но выше 50 м градиент температуры совпадает (рис. 3А). Опыт использования профилимера МТР-5 позволяет предположить, что в условиях сильных инверсий прибор занижает приземные градиенты температуры и, как следствие, температуру на высоте. Если ввести эмпирическую коррекцию и увеличить градиент температуры в слое 0–75 м на $2,8^\circ\text{C}$, профили температуры совпадают выше 50 м. Соответственно, вертикальную протяженность ОТ можно оценить в 50–60 м. Два последующих зондирования были проведены 23 декабря на фоне усиления скорости ветра и ослабления ОТ и не выявили значимых различий в стратификации атмосферы в городе и за городом.

Выводы о вертикальной протяженности ОТ и его связи с инверсиями температуры подтверждают и результаты последующих экспериментов, в ходе которых профильные измерения на городской и фоновой точках выполнялись единообразно, с использованием квадрокоптеров с датчиками iMet-XQ2. Эксперимент 2019 г. проходил с 20 по 21 декабря. Для измерений использовался один квадрокоптер, запускаемый поочередно в двух точках: рядом с круговым перекрестком в центре города (см. рис. 1) и около монумента «Мамонты в Надыме» на расстоянии около 4 км на юго-запад от города. Время между зондированиями составляло около 30 мин, всего было выполнено 16 зондирований (по 8 на каждой из точек). При анализе данных профиль для одной точки сопоставлялся с осредненными за два ближайших момента времени профилями для второй точки. Наблюдавшиеся

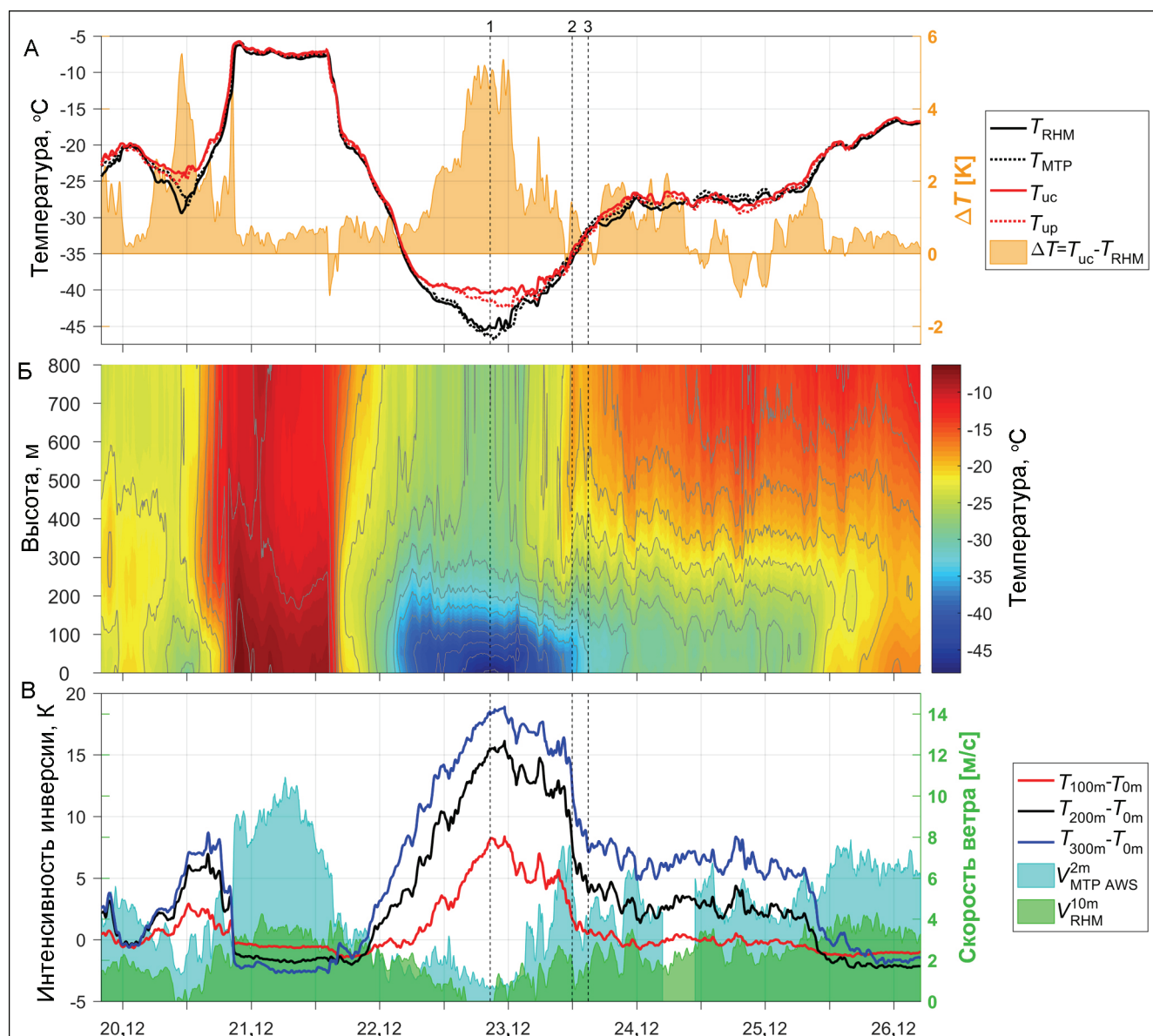


Рис. 2. Динамика основных исследуемых показателей за время интенсивной измерительной кампании в г. Надыме в 2018 г.:

А – температура приземного воздуха на метеостанции Росгидромета в аэропорту (T_{RHM}), в точке установки профилера МТП-5 (T_{MTP}), по данным датчика iButton в наиболее теплой части города (T_{uc}), по данным измерений датчика Нобо в парковой зоне в центре города (T_{up}), интенсивность городского острова тепла г. Надыма ($\Delta T = T_{uc} - T_{RHM}$); Б – температура в нижнем 800-метровом слое по данным профилера МТП-5 в аэропорту; В – интенсивность инверсий температуры в слоях 0–100, 0–200 и 0–300 м по данным профилера МТП-5 и скорость ветра по данным измерений метеостанции Росгидромета (V_{RHM}^{10m}) и в точке установки профилера (V_{MTP}^{2m}). Вертикальные пунктирные линии обозначают время проведения профильных измерений с использованием квадрокоптера

Fig. 2. Dynamics of the main studied indicators during the intensive measurement campaign in the city of Nadya in 2018:

А – the surface air temperature at the Roshydromet meteorological station at the airport (T_{RHM}), at the installation point of the MTP-5 profiler (T_{MTP}), according to the iButton sensor in the warmest part of the city (T_{uc}), according to the measurements of the Hobo sensor in the city center park zone (T_{up}), the intensity of the urban heat island of Nadya ($\Delta T = T_{uc} - T_{RHM}$); Б – temperature in the lower 800 m layer according to the MTP-5 profiler at the airport; В – the intensity of temperature inversions in the layers 0–100, 0–200, and 0–300 m according to the MTP-5 profiler and the wind speed according to the measurements of the Roshydromet meteorological station (V_{RHM}^{10m}) and at the MTP-5 profiler installation point (V_{MTP}^{2m}). Vertical dashed lines show the time of profile measurements using the quadcopter

погодные условия не способствовали формированию приземной инверсии и интенсивного ОТ. Различия приземной температуры между точками измерений не превышали 1,5°C (рис. 3Б) и были локализованы в нижних 50 м.

Следующий эксперимент был проведен в период с 9 по 10 января 2021 г. на фоне развития приземной инверсии и эффекта ОТ интенсивностью до 5°C. В ходе него удалось выполнить более 10 синхронных профильных измерений на городской (бульвар

Стрижева, см. рис. 1) и фоновой (монумент «Мамонты в Надыме») точках с использованием двух квадрокоптеров. Полученные данные в очередной раз подтвердили вывод о вертикальной протяженности ОТ до высот порядка 50 м (рис. 3В). Выше 50 м температура над городом оказалась ниже, чем

над фоновой точкой. Такая особенность известна из литературы как «кроссовер-эффект», который является следствием более интенсивного перемешивания атмосферы над городом в условиях инверсии [Duckworth, Sandberg, 1954; Локощенко и др., 2016; Varentsov et al., 2018].

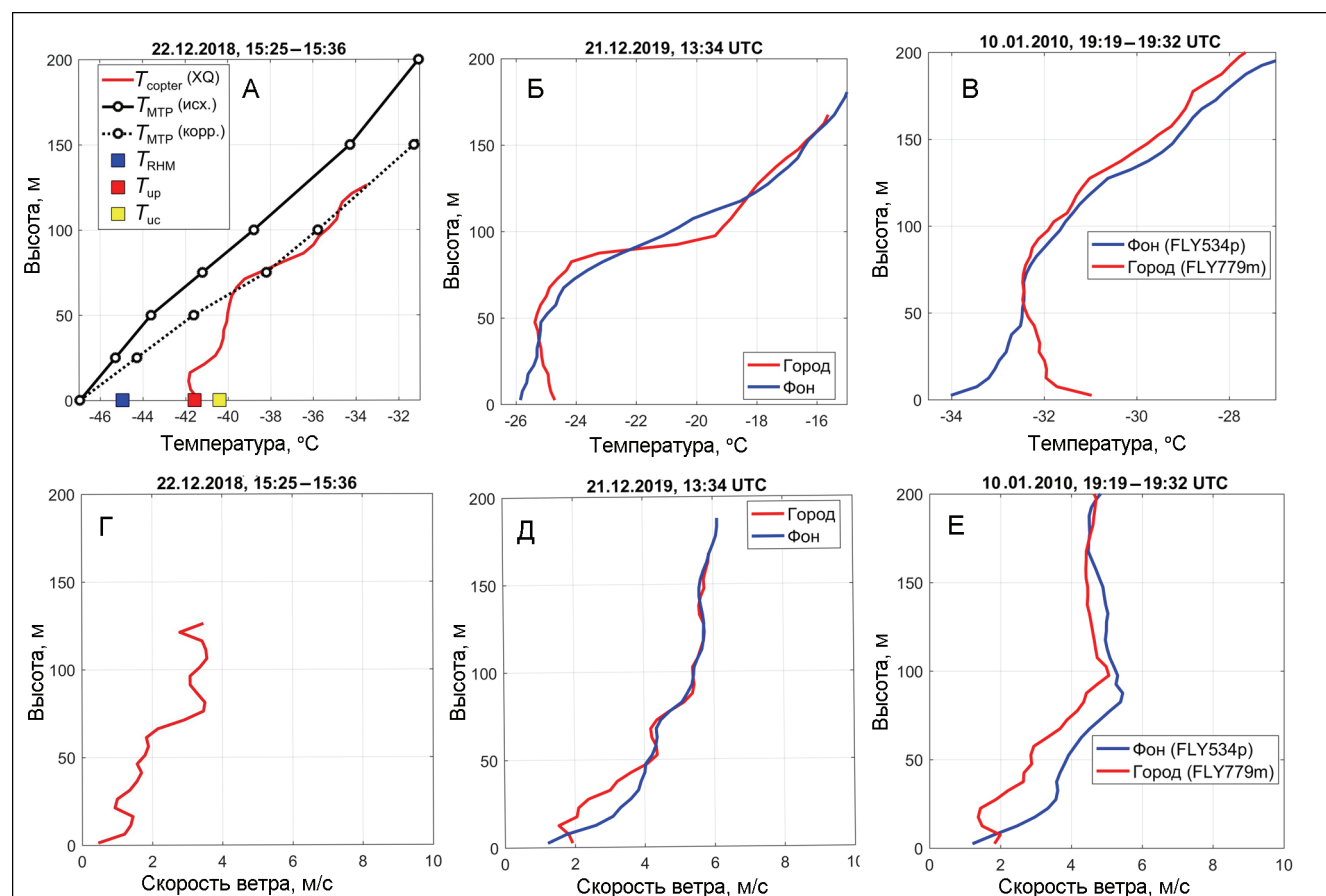


Рис. 3. Вертикальные профили температуры и скорости ветра по данным измерений:

А – сравнение вертикального профиля температуры, измеренного в южной части г. Надыма с использованием квадрокоптера с установленным на нем датчиком iMet-XQ (T_{copter}) с исходными (исх.) и скорректированными (корр.) данными измерений профилимера МТП-5 в аэропорту г. Надыма ($T_{\text{МТП}}$) для эксперимента в декабре 2018 г.; Б, В – сравнение профилей температуры, измеренных с использованием квадрокоптера в центре г. Надыма и в фоновых условиях за городом в декабре 2019 г. (Б) и в январе 2021 г. (В); Г, Д, Е – измеренные с помощью квадрокоптера профили скорости ветра в городе и за городом для тех же моментов времени, для которых приведены профили температуры. Квадратными маркерами показаны значения приземной температуры, измеренные на метеостанции Росгидромета в аэропорту (T_{RHM}), по данным датчика iButton в наиболее теплой части города (T_{uc}), по данным измерений датчика Hobo в парковой зоне в центре города (T_{up})

Fig. 3. Vertical profiles of temperature and wind speed from measurements.

А – Comparison of the vertical temperature profile measured in the southern part of the city of Nadym using a quadcopter with an iMet-XQ (T_{copter}) sensor installed on it with the original (raw) and corrected (corr) data of the MTP-5 profiler measurements at the Nadym airport ($T_{\text{МТП}}$) for the experiment in December 2018; Б, В – Comparison of temperature profiles measured using a quadcopter in the center of Nadym and in background conditions outside the city in December 2019 (Б) and in January 2021 (В); Г, Д, Е – Wind speed profiles measured with a quadcopter in the city and outside the city for the same time the temperature profiles are given. Square markers show the surface temperature values measured at the Roshydromet weather station at the airport (T_{RHM}), according to the iButton sensor in the warmest part of the city (T_{uc}), according to the Hobo sensor measurements in the city center park zone (T_{up})

Результаты зондирования также позволили диагностировать различия профилей скорости ветра над городом и фоновой территорией, восстановленных по данным телеметрии квадрокоптеров, и

сравнить условия ветровой стратификации для рассматриваемых примеров (рис. 3Д, Е). Для случая в декабре 2018 г. скорость ветра в нижних 100 м не превышала 3,5 м/с, что способствовало развитию

приземной инверсии и ОТ. В эксперименте 2019 г. скорость ветра была выше и на высоте 100 м достигала 5 м/с. Вероятно, это способствовало более интенсивному перемешиванию и не давало развиться интенсивной приземной инверсии за городом. Впрочем, в январе 2021 г. развитие более интенсивной инверсии наблюдалось на фоне лишь незначительно меньших скоростей ветра, что говорит о сложности процессов формирования приземной стратификации атмосферы и необходимости их дальнейшего исследования. Для большинства зондирований в 2019 и 2021 гг., скорость ветра в АПС в городе была меньше загородной, что демонстрируют и примеры на рис. 3Д, Е. Такие различия можно объяснить большей шероховатостью городской поверхности. При этом градиент скорости ветра вблизи поверхности в городе чаще всего был меньше загородного, что указывает на более интенсивное перемешивание.

Выполненные измерения однозначно указывают на взаимосвязь интенсивности приземного ОТ в зимний период со стратификацией АПС и наличием приземных инверсий. Во всех рассмотренных случаях инверсия температуры разной интенсивности наблюдалась за городом, а в городе вблизи поверхности сохранялась стратификация, близкая к нейтральной. Вертикальная протяженность ОТ в

подобных условиях составляет около 50 м. Ряд вопросов (влияние города на ветровую стратификацию, условия возникновения «кроссовер-эффекта» и т. д.) требуют дальнейшего изучения, для чего планируется расширить выборку данных путем проведения в Надыме квазирегулярных зондирований с участием сотрудников Научного центра изучения Арктики.

Результаты численного моделирования. В численном эксперименте с вихреразрешающей моделью ИВМ РАН для первой расчетной области был сформирован сильно устойчивый пограничный слой (масштаб Обухова у поверхности составляет приблизительно $1/5$ от высоты погранслоя). Некоторые характеристики полученного турбулентного течения, осредненные за последние 0,5 ч интегрирования, приведены на рис. 4. Вблизи верхней границы АПС, на высоте около 70 м, располагается низкоуровневая струя с выраженным максимумом скорости, температура воздуха увеличивается приблизительно на 14° от поверхности до верхней границы АПС. Турбулентное течение с указанными характеристиками задавалось в качестве граничных условий для второй расчетной области с реалистичной геометрией городской застройки (см. рис. 1). Далее обсуждаются результаты моделирования для второй расчетной области.

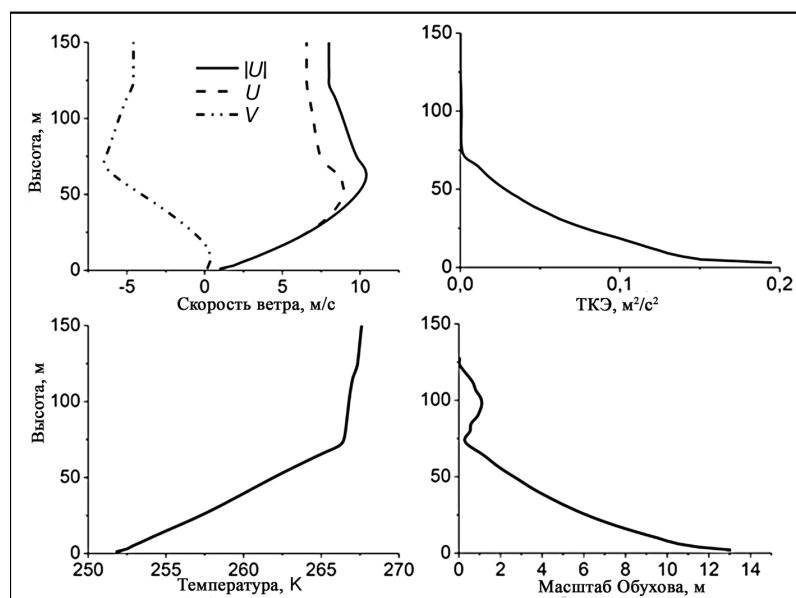


Рис. 4. Характеристики набегающего потока: средние профили скорости ветра; ТКЭ (оценка, включающая «подфильтровые» и «подсеточные» флуктуации скорости); средний профиль температуры; вертикальный профиль масштаба Обухова.

$|U|$ – модуль скорости ветра; U – продольная компонента горизонтальной скорости ветра; V – поперечная компонента горизонтальной скорости ветра

Fig. 4. Oncoming flow characteristics: average wind velocity profiles; TKE (the estimate includes “subfilter” and “subgrid” velocity fluctuations); average temperature profile; vertical profile of the Obukhov length.

$|U|$ – wind speed module; U – the longitudinal component of the horizontal wind speed; V – the transverse component of the horizontal wind speed

На рис. 5 изображена скорость ветра на высоте 1 м, среднее значение за последние 20 мин расчета (см. рис. 5А) и максимальные зафиксированные значения порывов ветра за тот же период (см. рис. 5Б). Приземная скорость ветра у поверхности в городской среде может существенно превышать ее значение за городом.

Результаты моделирования показали, что одним из важных механизмов формирования эффекта ОТ у поверхности может быть механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы, обеспечивающее вовлечение к поверхности более теплого воздуха сверху. Ключевым фактором фор-

мирования ОТ в зимний период для умеренных и высоких широт принято считать антропогенный поток тепла, в первую очередь от отапливаемых зданий [Oke, 1982; Varentsov et al., 2018]. В проведенных расчетах антропогенные источники тепла отсутствовали, также не учитывалось влияние геометрических особенностей застройки на режим радиационного выхолаживания. Тем не менее аномалия средней приземной температуры воздуха (см. рис. 5В) достигала 4–5°, что отражает практически полное перемешивание и формирование слоя со стратификацией, близкой к нейтральной, в городской среде только за счет динамического перемешивания (было проверено,

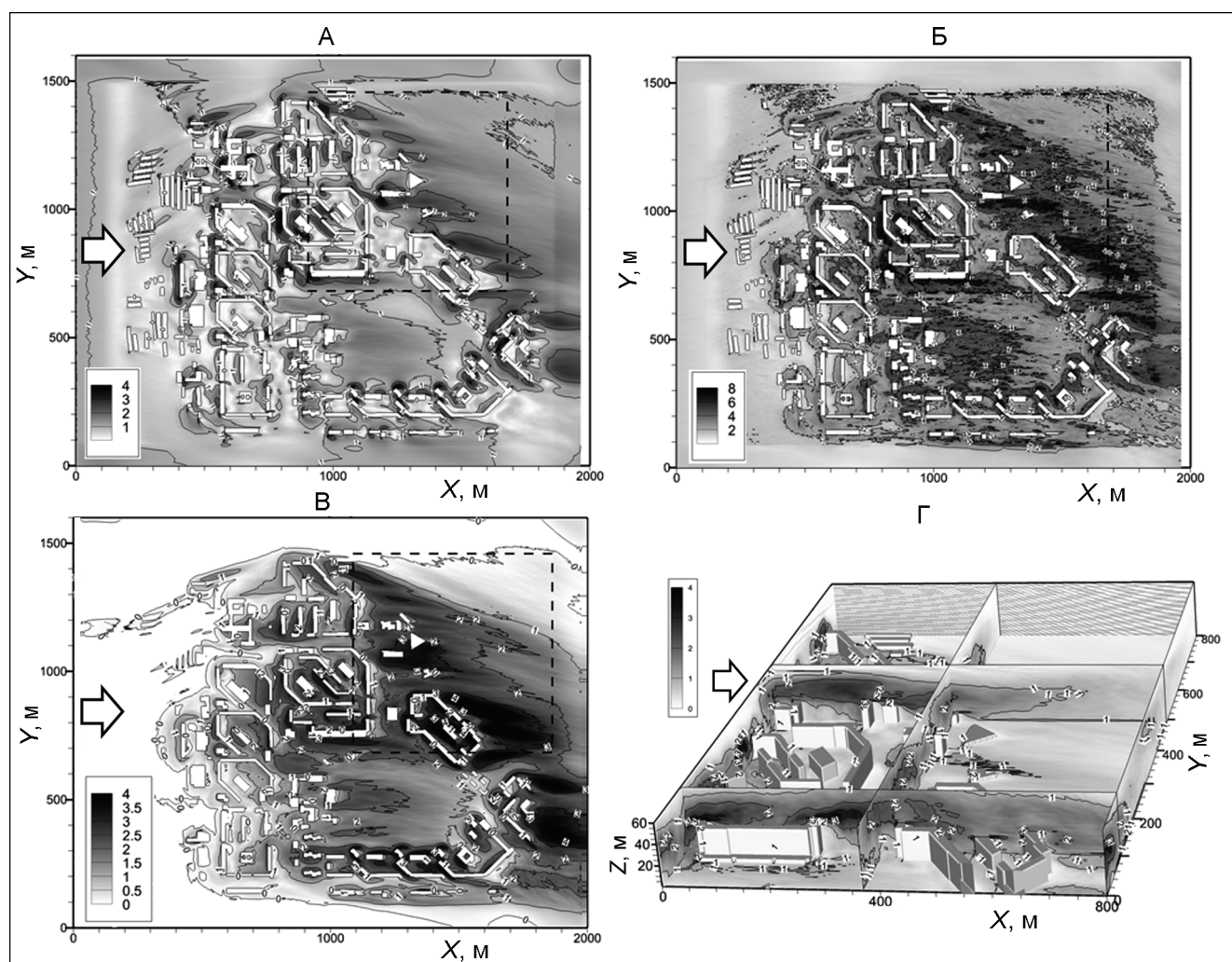


Рис. 5. Результаты моделирования структуры ветрового потока над реалистичной городской застройкой:

А – средняя скорость ветра на высоте 1 м; Б – максимальные порывы ветра на той же высоте, зафиксированные за 20 мин расчета; В – аномалии средней температуры у поверхности на высоте первого расчетного уровня модели (1 м) относительно температуры воздуха на той же высоте за городом; Г – турбулентная кинетическая энергия флуктуаций скорости ветра в городе, приведены изолинии в различных вертикальных сечениях и у поверхности для подобласти, показанной пунктиром на остальных рисунках. Стрелка показывает направление набегающего потока

Fig. 5. The results of numerical modelling of wind flow structure above realistic city buildings.

А – Average wind speed at a height of 1 m; Б – maximum wind gusts at the same height recorded during 20 minutes of calculation; В – anomalies of the average temperature near the surface at the height of first model level (1 m) as compared with the air temperature at the same altitude outside the city; Г – turbulent kinetic energy of wind speed fluctuations in the city (isolines in various vertical sections and at the surface) for the sub-area, shown by dotted line in subplots. Arrow indicates the inflow wind direction

что в значительной части расчетной области, занятой городской застройкой, осредненная по времени потенциальная температура приблизительно постоянна от поверхности до высот 40–60 м).

Выводы о более интенсивном турбулентном перемешивании в городе подтверждаются воспроизведенными моделью значениями турбулентной кинетической энергии (ТКЭ). На рис. 5Г в различных вертикальных сечениях показаны изолинии турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) для фрагмента расчетной области (см. рис. 5А, Б). ТКЭ в городе существенно превышает ТКЭ за его границами (по нашим оценкам более чем в 10 раз, см. профиль ТКЭ в набегающем потоке на рис. 4 вверху слева). Основным источником ТКЭ в городе является ее сдвиговая генерация на высоте зданий при их обтекании.

ВЫВОДЫ

Актуальность исследования климатических особенностей арктических городов связана не только с их слабой изученностью по сравнению с другими регионами. В силу высокой повторяемости приземных инверсий в зимний период, города высоких широт представляют собой уникальные площадки по изучению механизмов взаимодействия атмосферы с неоднородной поверхностью в условиях устойчивой стратификации. Недавние исследования показали, что в периоды зимней морозной и безветренной погоды в городах высоких широт возникает ярко выраженный эффект острова тепла (ОТ). Однако, взаимосвязь приземного ОТ таких городов со структурой атмосферного пограничного слоя (АПС) до текущего момента оставалась не изучена.

В данном исследовании рассмотрена структура АПС над г. Надымом по данным экспериментальных наблюдений и численного вихреразрешающего моделирования. Экспериментальные измерения были направлены на мониторинг структуры и динамики устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы в условиях формирования ОТ. Наличие эффекта ОТ фиксировалось сетью приземных температурных датчиков, вертикальная структура атмосферы в городе и за городом измерялась с использованием квадрокоптеров и дистанционного температурного профилимера МТП-5. Результаты трех измерительных кампаний показали, что развитие ОТ интенсивностью до 5°C происходит на фоне замедления скорости ветра

и формирования приземной инверсии температуры за городом, при этом в городе сохраняется перемешанный слой со стратификацией, близкой к нейтральной. Высота слоя составляет порядка 50 м, что можно интерпретировать как вертикальное развитие городского ОТ. Измерение профилей скорости ветра также показало более интенсивное перемешивание атмосферы над городом.

Для объяснения выявленных эффектов было проведено вихреразрешающее моделирование турбулентного течения в условиях реалистичной застройки г. Надыма. Трехмерная модель застройки была получена на основе базы данных OpenStreetMap и уточнена по ЦМР ArcticDEM и визуальным оценкам этажности зданий. При этом в модели не учитывался антропогенный нагрев и радиационные эффекты. В качестве набегающего на город потока использовалось типичное для зимних условий турбулентное течение в квазистационарном устойчиво стратифицированном пограничном слое над плоской поверхностью. Результаты моделирования подтвердили формирование в городской среде перемешанного слоя со стратификацией, близкой к нейтральной, и аномалий приземной температуры до 4–5°C относительно фоновых территорий. Таким образом, несмотря на отсутствие в модели антропогенных источников тепла, результаты моделирования и наблюдений согласуются на качественном уровне. Это позволяет сделать вывод о том, что одним из важных механизмов образования приземного ОТ может быть механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы. Он подтверждается тем, что турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) в городе по расчетам более чем в 10 раз превышает ТКЭ за его границами. Основным источником ТКЭ в городе является ее сдвиговая генерация на высоте зданий при их обтекании.

Проведенные экспериментальные исследования и численное моделирование подтвердили факт существования выраженного эффекта ОТ в условиях устойчивой стратификации для небольших городов высоких широт, позволили впервые оценить высоту его вертикального развития и установили связь данного феномена с перемешиванием пограничного слоя атмосферы. Последнее обстоятельство может иметь существенное значение для условий распространения загрязнений в городской застройке, что будет изучено более детально в наших дальнейших исследованиях.

Благодарности. Экспериментальные измерения в г. Надыме в 2018 и 2019 гг., расчеты с LES-моделью выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 18-05-60126. Экспериментальные измерения в Надыме в 2021 г. выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-55-71004. Анализ результатов измерений был проведен при поддержке гранта РНФ 21-17-00249. Анализ результатов LES-моделирования выполнен при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению № 075-15-2022-284. Разработка методики комплексного исследования поддержана грантом Минобрнауки России № 075-15-2021-574.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над городской поверхностью. Спектры и масштабы, параметризация профилей температуры и скорости // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014а. Т. 50(4). С. 406–419.
- Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над плоской и городской поверхностями // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014б. Т. 50(3). С. 271–281.
- Глазунов А.В., Степаненко В.М. Вихреразрешающее моделирование стратифицированных турбулентных течений над неоднородными природными ландшафтами // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 4. С. 403–415.
- Константинов П.И., Гриценко М.Ю., Варенцов М.И. Картографирование островов тепла городов Заполярья по Совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область) // *Исследования Земли из космоса*. 2015. № 3. С. 27–33.
- Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В., Дубовецкий А.З., Новицкий М.А., Разин П.Е. О высотной протяженности городского «Острова тепла» над Москвой // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 466. № 2. С. 213–217.
- Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП «Филимонов М.В.», 2014. 560 с.
- Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Калягин М.Ю., Живоглозов Д.Н., Шевченко А.М., Варенцов А.И., Куксова Н.Е., Степаненко В.М., Шестакова А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Инноватика и экспертиза*. 2020. Т. 2. № 30. С. 20–39.
- Старченко А.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2015. 252 с.
- Юшков В.П., Курбатова М.М., Варенцов М.И., Лезина Е.А., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Каллистратова М.А. Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55(5). С. 13–31.
- Anderson W., Li Q., Bou-Zeid E. Numerical simulation of flow over urban-like topographies and evaluation of turbulence temporal attributes, *Journal of Turbulence*, 2015, vol. 16, no. 9, p. 809–831.
- Baklanov A., Mestayer P., Clappier A., Zilitinkevich S., Joffre S., Mahura A., Nielsen N.W. Towards improving the simulation of meteorological fields in urban areas through updated / advanced surface fluxes description, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, p. 523–543.
- Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.-C., Jimenez M.A., Khairoutdinov M., Kosovic B., Lewellen D. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer, *Boundary Layer Meteorol.*, 2006, vol. 118, p. 247–272.
- Benz S.A., Bayer P., Goettsche F.M., Olesen F.S., Blum P. Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures, *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, no. 1, p. 70–78.
- Duckworth F.S., Sandberg J.S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1954, vol. 35, no. 5, p. 198–207.
- Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, vol. 16, no. 15, p. 9563–9577.
- Geletić J., Lehnert M., Krč P., Resler J., Krayenhoff E.S. High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 2, p. 175.
- Garuma G.F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models, *Urban Clim.*, 2018, vol. 24, p. 830–851.
- Giometto M.G., Christen A., Meneveau C., Fang J., Krafczyk M., Parlange M.B. Spatial characteristics of roughness sublayer mean flow and turbulence over a realistic urban surface, *Boundary-layer meteorology*, 2016, vol. 160, no. 3, p. 425–452.
- Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer, *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 9, p. 2925–2949.
- Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 2014, vol. 50, no. 1, p. 17–30.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska, *Int. J. Climatol.*, 2003, vol. 23, no. 15, p. 1889–1905.
- Huang Q., Lu Y. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis, *Theor. Appl. Climatol.*, 2017, no. 1, p. 1–13.
- Kadyrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular scanning single channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations, *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modeling*, 1998, vol. 5, no. 4, p. 393–404.
- Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 7, p. 075007.
- Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, p. 47–59.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A. Underground urban heat island below Moscow city, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 1–13.

- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska, *Theor. Appl. Climatol.*, 1999, vol. 64, no. 1–2, p. 39–47.
- Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities, *Remote Sens.*, 2017, vol. 9, no. 10, p. 989–1004.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, no. 455, p. 1–24.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban climates*, Cambridge University Press, 2017, 520 p.
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I. OpenStreetMap data assessment for extraction of urban land cover and geometry parameters required by urban climate modeling, *Ext. Abstr. Proc. GIScience*, 2014, p. 395–399.
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 122–139.
- Tomas J.M., Pourquie M., Jonker H.J.J. Stable stratification effects on flow and pollutant dispersion in boundary layers entering a generic urban environment, *Boundary-Layer Meteorology*, 2016, vol. 159, no. 2, p. 221–239.
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E. Urban heat island intensity: A literature review, *Fresenius Environ. Bull.*, 2015, vol. 24, no. January, p. 4535–4554.
- Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, p. 17573–17587.
- Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 380–411.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia, *Atmosphere (Basel)*, 2018b, vol. 9, no. 2, p. 50–73.
- Varentsov M.I., Artamonov A.Y., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 231, p. 12053.
- Wang W., Xu Y., Ng E. Large-eddy simulations of pedestrian-level ventilation for assessing a satellite-based approach to urban geometry generation, *Graphical Models*, 2018, vol. 95, p. 29–41.
- Zhou D., Zhao S., Zhang L., Sun G., Liu Y. The footprint of urban heat island effect in China, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 2–12.

Электронный ресурс

Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. ArcticDEM, 2018, Harvard Dataverse, V1, DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH, URL: <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/OHHUKH> (дата обращения 31.03.2021).

Поступила в редакцию 06.04.2021

После доработки 25.01.2022

Принята к публикации 13.05.2022

SPECIAL CHARACTERISTICS OF THE BOUNDARY ATMOSPHERE IN THE CITY OF NADYM ACCORDING TO EXPERIMENTAL MEASUREMENTS AND EDDY-RESOLVING MODELING

**M.I. Varentsov¹, I.A. Repina², A.V. Glazunov³, T.E. Samsonov⁴, P.I. Konstantinov⁵,
V.M. Stepanenko⁶, V.N. Lykosov⁷, A.Yu. Artamonov⁸, A.B. Debolskiy⁹, A.S. Pechkin¹⁰,
A.V. Soromotin¹¹**

^{1, 2, 3, 6, 7, 9} *Research Computing Center of the Lomonosov Moscow State University*

^{1, 2, 8, 9} *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS*

^{1-4, 6, 7} *Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics*

^{3, 7} *G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS*

^{1, 4, 5} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹⁰ *Scientific Center for Arctic Studies*

¹¹ *Tumen scientific center SB RAS, Research Institute of Ecology and Rational Utilization of Natural Resources,
Tyumen State University*

¹ *Senior Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru*

² *Head of air-sea interaction laboratory, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: repina@ifaran.ru*

³ *Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: and.glas@gmail.com*

⁴ *Department of Cartography and Geoinformatics, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography;
e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru*

⁵ *Department of Meteorology and Climatology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kostadini@mail.ru*

⁶ *Deputy Director, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: stepanen@srcc.msu.ru*

⁷ *Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: lykosov@yandex.ru*

⁸ *Air-sea interaction laboratory, Junior Scientific Researcher; e-mail: sailer@ifaran.ru*

⁹ *Air-sea interaction laboratory, Junior Scientific Researcher; e-mail: and.debol@gmail.com*

¹⁰ *Department of scientific research, Scientific Researcher; e-mail: a.pechkin.ncia@gmail.com*

¹¹ *Department of methodology for the multidisciplinary research of cryosphere,
Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; e-mail: a.v.soromotin@utmn.ru*

The paper presents the results of studying the urban heat island formation in winter under the stable atmospheric stratification for small Arctic and subarctic cities (case study of the Nadym city). As a result of three measurement campaigns using contact and remote measurements, information was obtained on the intensity and vertical extent of the urban heat island. Simultaneous measurements of temperature and wind speed profiles within and outside the city showed that, with a strongly stable stratification, a mixed boundary layer is formed in the city with close to neutral stratification and a height of about 50 m. To explain the revealed phenomenon, LES modeling of the turbulent flow was carried out. A turbulent flow typical for winter conditions in a quasi-stationary, stable-stratified boundary layer above a flat surface was used as a flow approaching the city. A real 3D model of urban built-up area was used, obtained from the OpenStreetMap database and refined using the ArcticDEM data and by visual evaluation of building height. The simulation results confirmed the formation of a mixed layer in the urban environment and showed that mechanical mixing of a stably stratified atmosphere is an important mechanism of urban heat island formation at the surface. This is confirmed by the fact that, according to calculations, the turbulent kinetic energy in the city is more than 10 times higher than the TKE outside its borders. The main source of TKE in the city is its shear generation at the height of buildings as they are flown around. Experimental studies and theoretical calculations have confirmed the existence of a pronounced urban heat island in small polar cities under stable stratification and for the first time made it possible to estimate the height of its vertical development.

Keywords: urban heat island, boundary atmosphere, stable stratification

Acknowledgements. Experimental measurements in the city of Nadym in 2018 and 2019 and the LES-model calculations were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60126). Experimental measurements in the city of Nadym in 2021 were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-55-71004). The analysis of results was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-17-00249). LES-modeling results were analyzed with financial support from the RF Ministry of Science and Higher Education under the program of the Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics (agreement no. 075-15-2022-284 and contract no. 075-15-2021-574).

REFERENCES

- Anderson W., Li Q., Bou-Zeid E. Numerical simulation of flow over urban-like topographies and evaluation of turbulence temporal attributes, *Journal of Turbulence*, 2015, vol. 16, no. 9, p. 809–831.
- Baklanov A., Mestayer P., Clappier A., Zilitinkevich S., Joffre S., Mahura A., Nielsen N.W. Towards improving the simulation of meteorological fields in urban areas through updated / advanced surface fluxes description, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol. 8, p. 523–543.
- Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.-C., Jimenez M.A., Khairoutdinov M., Kosovic B., Lewellen D. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer, *Boundary Layer Meteorol.*, 2006, vol. 118, p. 247–272.
- Benz S.A., Bayer P., Goettsche F.M., Olesen F.S., Blum P. Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures, *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, no. 1, p. 70–78.
- Duckworth F.S., Sandberg J.S. The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1954, vol. 35, no. 5, p. 198–207.
- Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, vol. 16, no. 15, p. 9563–9577.
- Garuma G.F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models, *Urban Clim.*, 2017, vol. 24, p. 830–851.
- Geletič J., Lehnert M., Krč P., Resler J., Krayenhoff E.S. High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 2, p. 175.
- Giometto M.G., Christen A., Meneveau C., Fang J., Krafczyk M., Parlange M.B. Spatial characteristics of roughness sublayer mean flow and turbulence over a realistic urban surface, *Boundary-layer meteorology*, 2016, vol. 160, no. 3, p. 425–452.
- Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer, *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 9, p. 2925–2949.
- Glazunov A.V. Numerical simulation of stability stratified turbulent flows over an urban surface: spectra and scales and parametrization of temperature and wind-velocity profiles, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014a, vol. 50, no. 4, p. 356–368.
- Glazunov A.V. Numerical simulation of stability stratified turbulent flows over flat and urban surfaces, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014b, vol. 50, no. 3, p. 236–245.
- Glazunov A.V., Stepanenko V.M. Large eddy simulation of stratified turbulent flows over heterogeneous landscapes, *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 4, p. 351–361.
- Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 2014, vol. 50, no. 1, p. 17–30.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska, *Int. J. Climatol.*, 2003, vol. 23, no. 15, p. 1889–1905.
- Huang Q., Lu Y. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis, *Theor. Appl. Climatol.*, 2017, no. 1, p. 1–13.
- Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations, *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 1998, vol. 5, no. 4, p. 393–404.
- Konstantinov P.I., Grishchenko M.Yu., 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, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51(9), p. 992–998.
- Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic, *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 7, p. 0075007.
- Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation, *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, p. 47–59.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A. Underground urban heat island below Moscow city, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 1–13.
- Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Kochin A.V., Dubovetsky A.Z., Novitsky M.A., Razin P.Y. Vertical extension of the urban heat island above Moscow, *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, no. 1, p. 70–74.
- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska, *Theor. Appl. Climatol.*, 1999, vol. 64, no. 1–2, p. 39–47.
- Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities, *Remote Sens.*, 2017, vol. 9, no. 10, p. 989.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, no. 455, p. 1–24.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban climates*, Cambridge University Press, 2017, 520 p.
- Regiony i goroda Rossii: integral'naya ocenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Russian regions and cities: integration estimation of ecological condition], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, IP "Filimonov M.V.", 2014, 560 p. (In Russian)
- Repina I.A., Varentsov M.I., Chechin D.G., Artamonov A.Yu., Bodunkov N.E., Kalyagin M.Yu., Zhivoglotov D.N., Shevchenko A.M., Varentsov A.I., Kuksova N.E., Stepanenko V.M., Shestakova A.A. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya issledovaniya atmosfernogo pogranichnogo sloya [Application of unmanned aircraft for studying of the atmospheric boundary layer], *Innovatika i eksperiment*, 2020, vol. 2, no. 30, p. 20–39. (In Russian)
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I. OpenStreetMap data assessment for extraction of urban land cover and geometry parameters required by urban climate modeling, *Ext. Abstr. Proc. GIScience*, 2014, p. 395–399.
- Samsonov T.E., Konstantinov P.I., Varentsov M.I. Object-oriented approach to urban canyon analysis and its appli-

- cations in meteorological modeling, *Urban Clim.*, 2015, vol. 13, p. 122–139.
- Starchenko A.V., Nuterman R.B., Danilkin E.A. *Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenij i perenosa primesi v ulichnykh kan'onah* [Numerical modelling of turbulent flows and traces transport in the urban canyons], Tomsk, Tomsk universities publ., 2015, 252 p. (In Russian)
- Tomas J.M., Pourquie M., Jonker H.J.J. Stable stratification effects on flow and pollutant dispersion in boundary layers entering a generic urban environment, *Boundary-Layer Meteorology*, 2016, vol. 159, no. 2, p. 221–239.
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G., Fotiadi A., Stigka E. Urban heat island intensity: A literature review, *Fre-senius Environ. Bull.*, 2015, vol. 24, p. 4535–4554.
- Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 380.
- Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia, *Atmosphere*, 2018b, vol. 9, no. 2, p. 50.
- Varentsov M.I., Artamonov A.Y., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 231, p. 12053.
- Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A. Izuchenie fenomena gorodskogo ostrova tepla v usloviyah polyarnoj nochi s pomoshch'yu eksperimental'nykh izmerenij i distancionnogo zondirovaniya na primere Noril'ska [Investigation of urban heat island phenomenon under polar night conditions with experimental measurements and remote sensing methods (case study of Norilsk)], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 4, p. 329–337. (In Russian)
- Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, p. 17573–17587.
- Wang W., Xu Y., Ng E. Large-eddy simulations of pedestrian-level ventilation for assessing a satellite-based approach to urban geometry generation, *Graphical Models*, 2018, vol. 95, p. 29–41.
- Yushkov V.P., Kurbatova M.M., Varentsov M.I., Lezina E.A., Kurbatov G.A., Miller E.A., Repina I.A., Artamonov A.Y., Kallistratova M.A. Modeling an urban heat island during extreme frost in Moscow in January 2017, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55(5), p. 389–406.
- Zhou D., Zhao S., Zhang L., Sun G., Liu Y. The footprint of urban heat island effect in China, *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 2–12.
- Web source*
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.J., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. ArcticDEM, 2018, Harvard Dataverse, V1, DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH, URL: <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/OHHUKH> (access date 31.03.2021).

Received 06.04.2021

Revised 25.01.2022

Accepted 13.05.2022