

УДК 551.509+515

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ В ПЛАНЕТАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ МЕГАПОЛИСА МОСКВЫ

© 2024 г. Р. В. Журавлев<sup>а</sup>, Е. А. Миллер<sup>а</sup>\*, А. К. Князев<sup>а</sup>, Н. А. Баранов<sup>б</sup>, Е. А. Лезина<sup>с</sup>, А. В. Троицкий<sup>д</sup>

<sup>а</sup>Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, ул. Первомайская, 3, Долгопрудный, 141700 Россия

<sup>б</sup>Вычислительный центр им. А. А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, ул. Вавилова, 40, Москва, 119333 Россия

<sup>с</sup>ГПБУ Мосэкомониторинг, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1, Москва, 119992 Россия

<sup>д</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, ул. Ашхабадская, 4, Нижний Новгород, 603105 Россия

\*e-mail: tissary@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 24.09.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

В данной работе проводится поиск оптимальной параметризации мезомасштабной метеорологической модели на основе сравнительного анализа модельных прогнозов и результатов измерений температурных инверсий в планетарном пограничном слое атмосферы московского мегаполиса. Тестировалась модель WRF-ARW с несколькими различными комбинациями физических параметризаций для оценки качества прогнозов параметров инверсии температуры над г. Москва. При отборе критериев для сравнений была проведена оценка динамических и статистических характеристик температурных инверсий. Представлены результаты оценки сроков разрушения температурных инверсий в зависимости от типа инверсий. Источником данных были результаты измерений профилей температуры в слое до 1 км, полученные пассивным микроволновым профилимером МТР-5 с 2018 по 2021 гг. Один МТР-5 на севере Москвы использовался для настройки параметров модели, а другой на востоке Москвы – для валидации. Результаты сравнения показывают, что для настройки модели может быть оптимален набор из нескольких вариантов параметризации.

**Ключевые слова:** температурные инверсии, пограничный слой атмосферы, параметризация модели WRF, микроволновый профилимер МТР-5, дистанционное зондирование  
**DOI:** 10.31857/S0002351524010047

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования качества воздуха обычно проводятся на основе расчетов химико-транспортных моделей [Шалыгина и др., 2017], которые используют кадастры эмиссий различных химических компонент над интересующим регионом, а начальные и граничные условия – из различных (глобальных или локальных) метеорологических моделей численного прогноза погоды (NWP/ЧПП). Поэтому воспроизведение и прогнозирование региональных метеорологических условий является ключевой задачей для деталь-

ной оценки благоприятных и неблагоприятных условий рассеивания загрязняющих веществ в интересующем регионе [Kim et al., 2013; Zhang et al., 2013]. Полученные из моделей численного прогноза погоды температура воздуха, ветер, удельная влажность и высота планетарного пограничного слоя (ППС) являются основными параметрами исходных данных моделей прогноза качества воздуха и напрямую влияют на результаты прогноза [Govardhan et al., 2015].

Следует учитывать, что качество метеорологических моделей ЧПП определяется полно-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

той и качеством источников данных измерений метеорологических параметров. Руководство Всемирной метеорологической организации (ВМО/ВМО) по применению численного прогноза погоды (ЧПП) [ВМО, 2020] подчеркивает необходимость усвоения и коррекции прогноза профилей ветра, температуры и влажности. Для реализации функции усвоения данных и коррекции результатов прогноза необходимо иметь плотную сеть наблюдений, особенно в первых километрах атмосферы [EPA, 2000], так как в планетарном пограничном слое ошибки численного моделирования имеют критическое значение [Vaisala, 2016].

Формирование и развитие сетей измерений в планетарном пограничном слое (ППС), таких как: ACTRIS (Aerosols, Clouds and Trace gases Research Infrastructure), ADnet (Asian Dust and aerosol lidar observation network), AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay), ARM (Atmospheric Radiation Measurement), EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network), EUMETNET E-PROFILE (European Profile of the European Meteorological Network), IAGOS (In-service Aircraft for a Global Observing System), IGRA (Integrated Global Radiosonde Archive), LALINET (Latin America Lidar Network), MPLnet (NASA Micro-Pulse Lidar Network), MWRnet (Microwave Radiometer Network), NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), NYS Mesonet (New York State Mesonet) [Kotthaus et al., 2023], – решает задачу компенсировать недостаток измерений в планетарном пограничном слое наземных контактных станций измерений и неопределенность спутниковых данных в первых сотнях метров от поверхности земли.

Для реализации процедур усвоения данных и коррекции данных по результатам измерений в ППС инициирован в последние годы ряд проектов, таких как NYS Mesonet, COST 720, COST ES1303 TOPROF, SOFOG3D, PROBE, TEAMx [Cimini, et al., 2020]. Результаты в этом направлении представлены в ряде публикаций [Illingworth et al., 2019; Martinet et al., 2022].

В последние десятилетия распространение как часть MWRnet [Caumont et al., 2016] получили одноканальные микроволновые профилимеры МТП-5 [Troitsky et al., 1993] и современная модификация МТП-5 [EPA, 2011; Ilyin, Troitsky, 2017]. Данный тип измерителей позволяет получать непрерывные данные о динамике профилей

температуры в слое 1 км. Параметры динамики температурной стратификации в ППС важны в задачах экологического мониторинга и имеют значение как составляющая характеристик класса устойчивости Паскуилла [Pasquill, 1961; РБ-046–21, 2021] или метеорологический показатель рассеивания примеси и загрязнения приземного воздуха МПРЗ [Кузнецова и др., 2014]. Ряды измеренных данных профилей температуры ППС позволяют оценить ошибки моделирования [Юшков, 2022], контролировать в режиме реального времени характеристики термического состояния с анализом аномалий суточного хода температуры [Кузнецова и др., 2010]. Приборы применяются для исследований характеристик ППС как автономно [Кузнецова и др., 2004; Rotach et al., 2004; CHANG et al., 2006; Ferrario et al., 2008; Kadygrov et al., 2012; Эзау и др., 2013; Kiktev et al., 2015], так и в составе измерительных комплексов [Matsui et al., 1996; Westwater et al., 1999; Triantafyllou et al., 2018; Odintsov et al., 2021]. Для задач прогноза применение данных МТП-5 развивалось по ряду направлений: построение прогноза в точке измерений [Baranov, Lemishchenko, 2018; Баранов, 2021] на основе эмпирических данных, усвоение данных [Akhmetshina et al., 2015; Вазаева и др., 2018; Rivin et al., 2020; Starchenko et al., 2022; Gochakov et al., 2022] и настройка модели по данным измерений. В районе московского мегаполиса с 2014 г. 3 прибора МТП-5 (с 2022 уже 4) являются источником данных для рутинного усвоения в ЧПП.

Одной из наиболее популярных моделей, используемой по всему миру для прогноза региональных метеорологических условий, является модель WRF-ARW. Это негидростатическая мезомасштабная модель численного прогнозирования погоды, которая включает широкий спектр различных физических параметризаций, что позволяет локально настраивать ее в соответствии с потребностями конкретной задачи. Начальные и граничные условия могут быть взяты либо из данных моделей общей циркуляции, либо из данных реанализа. Поскольку выбор комбинации таких параметров оказывает существенное влияние на результат моделирования, подбор оптимальной комбинации для конкретной задачи в заданном регионе становится достаточно важной задачей. В работе [Stergiou, 2017] проводилась оценка чувствительности результатов моделирования для Европейского домена к пара-

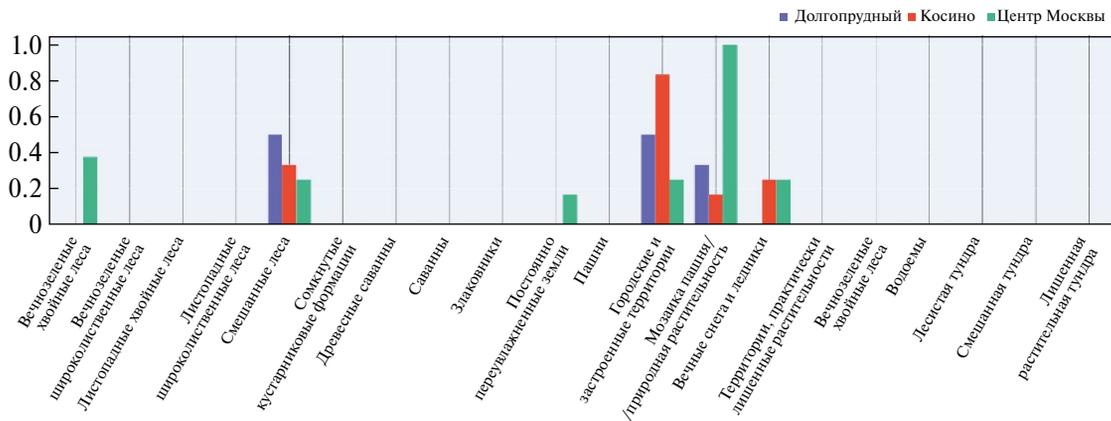


Рис. 1. Распределение долей площадей классов подстилающей поверхности в области чувствительности двух приборов МТП-5 (Долгопрудный и Косино) и квадрата вокруг центра Москвы со стороной 20 км (центр Москвы).

метрам микрофизики, приземного пограничного слоя, длинноволновой и коротковолновой радиации, облачности и модели подстилающей поверхности. [Pervin, Gan, 2020] также проводили оценку чувствительности модели WRF для региона реки Маккинзи в высоких широтах в Канаде. Mendoza and Lugo [Mendoza, Lugo, 2020] была проведена достаточно объемная работа по подбору оптимальных комбинаций параметризаций модели WRF для штата Пуэбло в Мексике. Всего в эксперименте проверялось 768 различных комбинаций параметров модели WRF. Стоит отметить, что в результате их эксперимента оптимальные комбинации зависели от выбранной метрики, например, систематическая ошибка, среднеквадратичное отклонение или корреляция по Пирсону. В результате авторам удалось агрегировать метрики на весь штат и отобрать всего 10 лучших комбинаций.

Детализация расчетов численных моделей может быть улучшена, среди прочих факторов, за счет использования более высокого пространственного и временного разрешения модели, соответствующих параметризаций или ассимиляции данных наблюдаемых метеорологических параметров, таких как температура, осадки, скорость ветра [Borge, 2008; Misenis, 2010]. Однако использование таких методов требует больших вычислительных ресурсов и сложной настройки самой процедуры усвоения данных.

Одним из методов улучшения качества ЧПП является настройка модели по результатам измерений температурной стратификации в точке [Юшков, 2022]. Такое решение позволяет получить прогноз на территории в условиях недостаточно плотных измерительных сетей измерений.

Целью данной работы является демонстрация подхода по поиску оптимальной комбинации параметризаций модели WRF с наилучшей обобщающей способностью по данным температурных профиломеров МТП-5 на территории г. Москвы и окрестности.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Наличие в московском мегаполисе многолетних (с 2000 г.) измерений температурной стратификации микроволновыми температурными профиломерами (МТП-5 и МТП-5) дает возможность использовать в качестве источника данных временные ряды профилей температуры в слое до 1 км в пространственно-разнесенных точках измерений. Расчет и анализ проводился по массивам данных за период времени с 2018 по 2021 гг. С учетом пространственной изменчивости городского острова тепла [Golitsyn et al., 2002] и масштаба ландшафтных неоднородностей ППС [Khaikine et al., 2006] для анализа использовались точки измерений с равноудаленным от центра мегаполиса положением (примерно 20 км). Для эксперимента были выбраны 2 прибора: один МТП-5 SN050 на севере Москвы (г. Долгопрудный) использовался для настройки параметров модели, а другой на юго-востоке Москвы МТП-5 SN068 (р-н Косино-Ухтомский) — для валидации. Расстояние между приборами по прямой — около 35 км.

В проведенных экспериментах для модели WRF использовалась модифицированная классификация подстилающей поверхности MODIS-IGBP. Рассмотрим распределения по классам вокруг двух приборов, участвующих в эксперименте, и сравним их с классами характерными

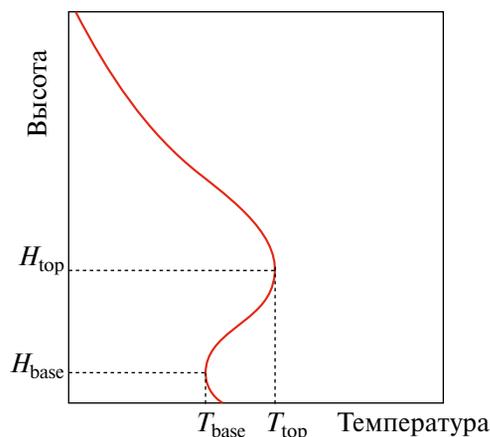


Рис. 2. Характеристики температурных инверсий.

для центральной части города с учетом сетки внутреннего домена с разрешением 2 км (рис. 1). Видно, что профили двух приборов отличаются наличием класса 14 (естественная мозаика растительности) в р-не Косино-Ухтомский. Суммарно оба прибора покрывают большую часть классов, которые встречаются на территории самого города. Классы, которые не встречаются в районе приборов, связаны с другими типами леса (хвойный) или отличными типами трав, однако, если посмотреть внутренние параметризации модели, применяемые к этим классам, то они близки к тем, которые присутствуют вблизи приборов, например, “смешанный лес” или “естественная мозаика растительности”. Таким образом, можно сделать предположение о том, что параметры, полученные как оптимальные с точки зрения модели по двум приборам, могут быть применимы для всего г. Москвы.

### 2.1. Выбор критериев для анализа

Зависимость условий для накопления и рассеяния загрязнений в нижней атмосфере представлена во множестве исследовательских работ и руководящих документах отраслей, связанных с регулированием и контролем потенциально опасных технологических процессов, а также метеорологических и экологических служб, контролирующих результаты антропогенного воздействия города как сложной системы транспортной и коммунальной инфраструктуры [Оке, 1982; РБ-046–21, 2021; Al-Nemoud et al., 2019]. Классификация типов погоды связана с загрязнениями через характеристики категории устойчивости Паскуилла [Pasquill, 1961] или МПРЗ [Кузнецова и др., 2014] и дополня-

ются условиями, когда в случае приподнятой инверсии (рис. 2) происходит “копчение” нижних слоев атмосферы [Оке, 1982]. Такие инверсии формируются при переходе от приземной G-инверсий (когда  $H_{base}$  — нижняя граница инверсии равна 0 м) к приподнятым E-инверсиям (с нижней границей выше уровня 0 м) в случае радиационных процессов, или как адвективные инверсии, или как смешанные при трансформации от одного типа к другому и обратно [Кузнецова и др., 2010]. Дополнительно инверсии можно разделить на: инверсии, которые формируются как результат стационарного процесса (радиационные), когда происходит накопление выброса при условии слабого ветра; на инверсии в результате адвекции, которая ведет к смене воздушной массы; смешанный тип. Эти процессы принципиально различны для условий накопления и рассеяния потенциальных загрязнений атмосферы.

Характеристики температурных инверсий — значимый фактор, определяющий условия накопления и рассеяния загрязнений [Звягинцев и др., 2011; Ячмёнова, Гольвей, 2011], и возможность получить репрезентативные данные оптимизированного по данному параметру прогноза на территории мегаполиса имеет важный прикладной эффект для задач управления процессами, связанными с загрязнением атмосферы. Для оценки качества прогнозов модели в качестве целевых параметров (характеристик) температурных инверсий были выбраны: тип инверсии, высота инверсии (разница верхней и нижней границы  $H_{top} - H_{base}$  (рис. 2 — ось ординат) и глубина/величина инверсии  $T_{top} - T_{base}$  (рис. 2 — ось абсцисс).

Температурные инверсии московского мегаполиса имеют в значительной части случаев четко выраженные временные границы образования и разрушения [Локошенко и др., 2021; Vorobyeva et al., 2009], при наличии данных о профилях температуры от МТР-5 каждые 5 мин обеспечивается достаточная плотность данных для сравнения со сроками образования и разрушения инверсий по данным модели ЧПП. Для решения задачи о сроках формирования и разрушения для различных инверсий в зависимости от типа были рассчитаны статистические и динамические характеристики профилей температуры для г. Москвы. Из статистических характеристик рассчитывались: продолжительность наблюдения инверсии, се-

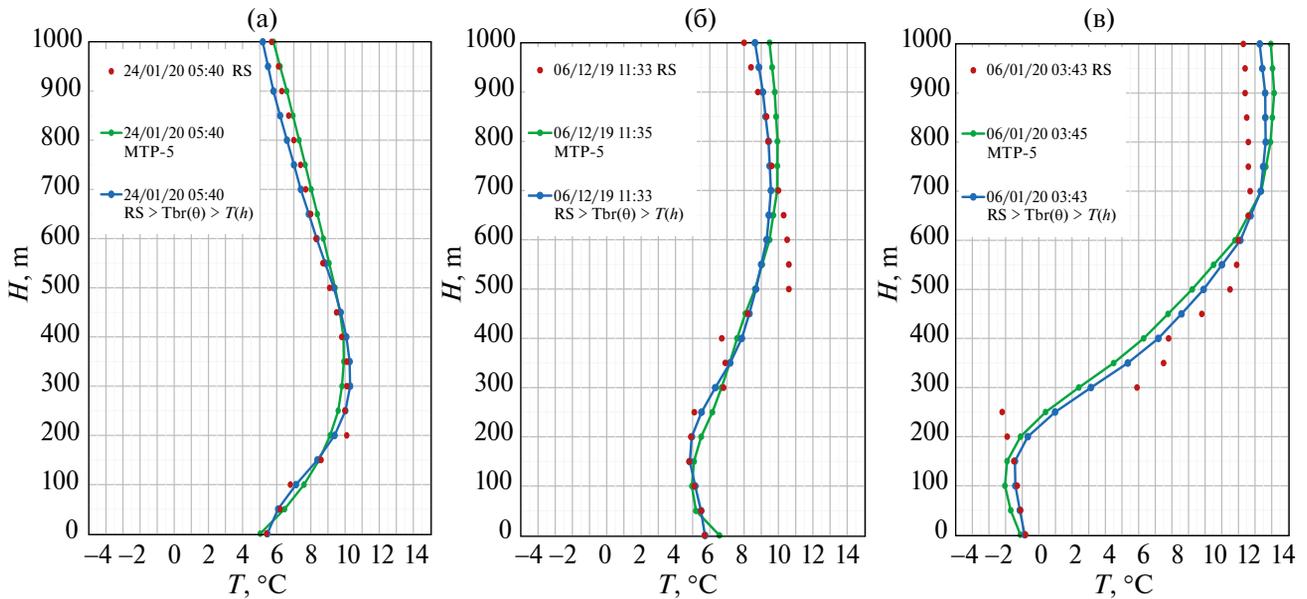


Рис. 3. Пример сравнений измеренных профилей MTP-5 (зеленая линия) с радиозондами (RS-красные точки) в SOFOG3D и голубая линия – профили  $T(h)$ , посчитанные из яркостных температур  $Tbr(\theta)$  радиозонда. (а) G-инверсия; (б) приподнятая E-инверсия; (в) высоко приподнятая инверсия НЕ.

зонная характеристика мощности. Была выполнена оценка факторов, определяющих условия и сроки разрушения инверсий.

2.2. MTP-5 как источник данных

MTP-5 представляет собой само-калибрующийся, само-тестирующийся одноканальный сканирующий микроволновый метеорологический температурный профилемер [Shin, Troitsky, 2017] для измерения профилей температуры от уровня установки до высоты 1000 м при любых погодных условиях. Прибор пришел серию международных сравнений с раз-

личными альтернативными измерительными системами: радиозондами, RASS, метеорологическими мачтами и др. [Koldaev et al., 2010; ERA., 2011; Klügel et al., 2019; Martinet et al., 2022]. Достаточная точность одноканального микроволнового радиометра (MTP-5) в нижних слоях ППС позволяет получить репрезентативное описание динамики характеристик до 1 км.

На рис. 3 показан пример сравнений измеренных профилей MTP-5 (зеленая линия) с данными измерений радиозондов (RS-красные точки) во время проекта SOFOG3D зимой 2019–2020 г.

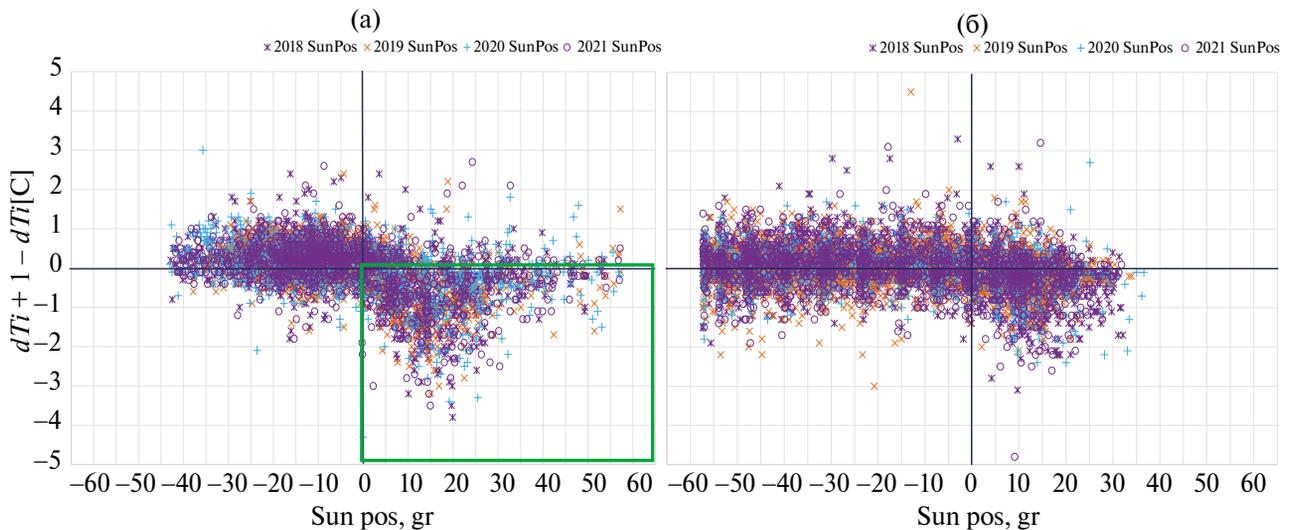


Рис. 4. Характеристики инверсий в период с 01/04 по 15/10 и с 16/10 по 31/03 по данным MTP-5 г. Долгопрудный с 2018 по 2021 гг.

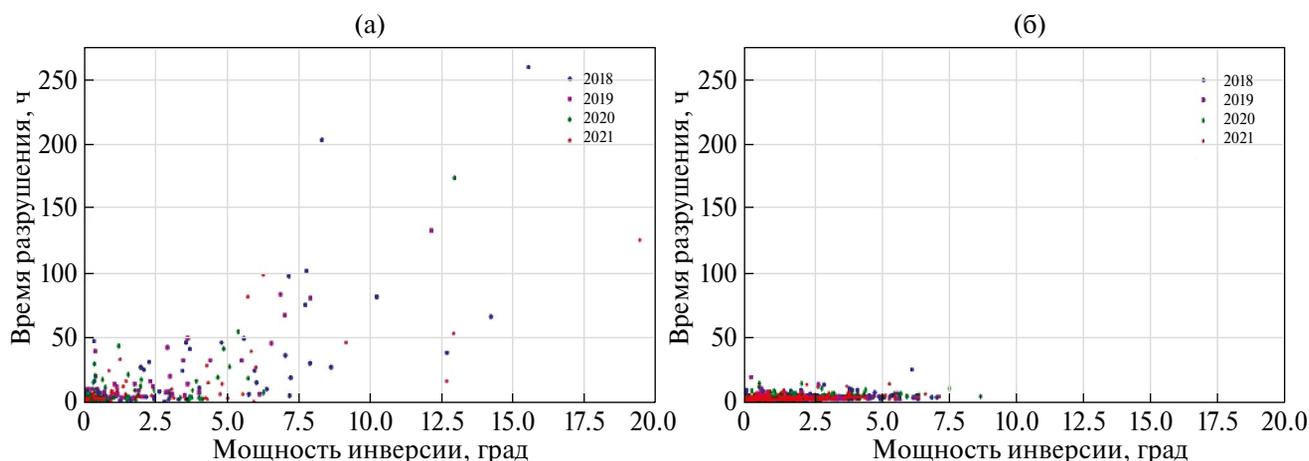


Рис. 5. Среднечасовые характеристики инверсий (а) в период с 16/10 по 31/03 и (б) в период с 01/04 по 15/10.

в Бордо (Франция) [Martinet et al., 2022]. Голубая линия на графиках – это профили  $T(h)$ , восстановленные из яркостных температур радиозонда  $Tbr(\Theta)$ , которые получены решением прямой задачи, а именно расчетом распределения  $Tbr(\Theta)$  из профиля температур радиозонда  $T(h)$ . Графики иллюстрируют качество метода восстановления и величину аппаратной ошибки. Представлены профили для случаев инверсий различного типа. На рис. 3а показан случай с приземной G-инверсией. Рисунок 3б – приподнятая E-инверсия. Рисунок 3в – высоко приподнятая инверсия HE, когда нижняя граница инверсии на высоте выше 250 м.

### 2.3. Выбор периодов измеренных данных для анализа

Для анализа был выбран период с момента, когда при суточных максимальных углах Солнца больше  $40^\circ$  (с 1 апреля) по срок, когда Солнце перестанет подниматься выше  $25^\circ$ . В этот период типовой суточный ход температуры ППС

[Кузнецова и др., 2010] встречается чаще. Можно предположить, что изменение в углах Солнца ( $40^\circ$  против  $25^\circ$ ) при переходе с зимы на лето и обратно связано с необходимым прогревом после зимнего периода.

Рисунок 4 показывает распределение изменения (приращение/уменьшение) значения градиента инверсии  $dT$  (рассчитанного по среднечасовым профилям температуры) от угла Солнца “SunPos” в период с 01/04 по 15/10 и с 16/10 по 31/03 по данным МТП-5 SN050 в Долгопрудном с 2018 по 2021 гг. Характер распределения в условно летний и условно зимний период различны, но похожи для 4-х лет с 2018 по 2021. Инверсии разрушаются быстрее с восходом Солнца в летний период.

На рис. 4а (зеленый сектор) – при положительных углах Солнца – отрицательный градиент инверсий больше и разрушение инверсии быстрее. Для зимнего периода (рис. 4б) градиенты инверсий наблюдаются без определенной зависимости от угла Солнца.

Рисунок 5 демонстрирует распределение по срокам разрушения характеристик инверсий а) в период с 16/10 по 31/03 и б) в период с 01/04 по 15/10, и рис. 6 – распределение по продолжительности инверсий в период с 16/10 по 31/03 (“зима”) и с 01/04 по 15/10 (“лето”). Графики показывают количественные характеристики изменения характера температурного режима ППС для “зимнего” и “летнего” сезонов, которые условно определены по срокам в зависимости от суточного максимума угла Солнца и связаны со степенью прогрева воздуха у земли.

Рисунок 7 иллюстрирует среднечасовые характеристики инверсий в период с 01/04 по 15/10

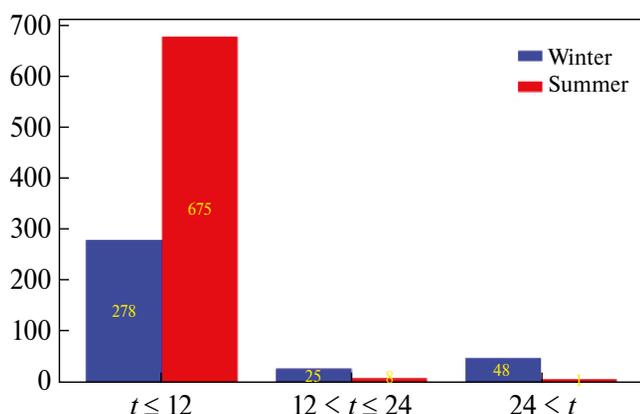


Рис. 6. Распределение по продолжительности инверсий в период с 16/10 по 31/03 (“зима”) и с 01/04 по 15/10 (“лето”)

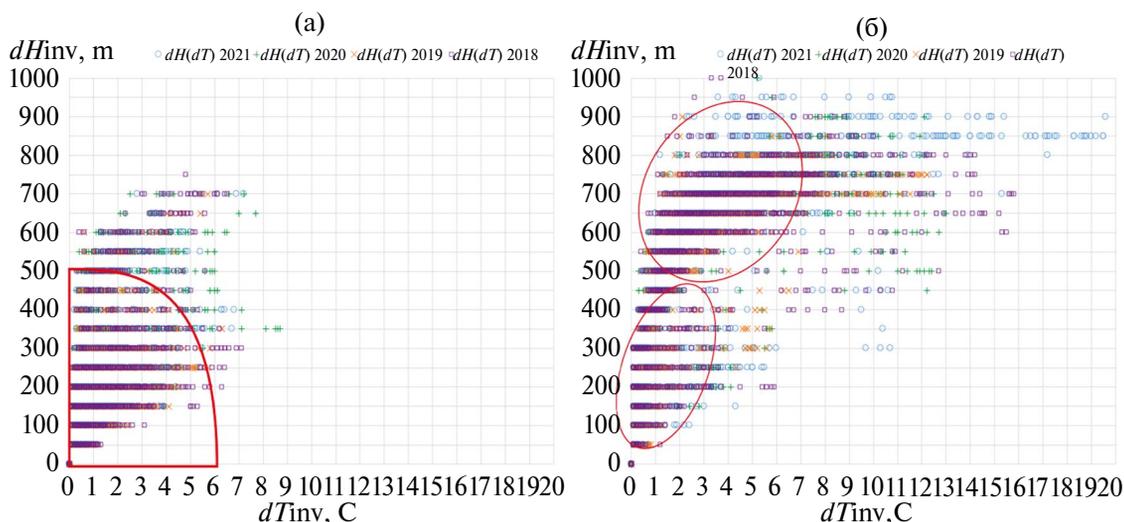


Рис. 7. Среднечасовые характеристики инверсий в период с 01/04 по 15/10 и с 16/10 по 31/03 по данным МТР-5 SN050с 2018 по 2021 гг.

и с 16/10 по 31/03 (по данным МТР-5 SN050 в Долгопрудном с 2018 по 2021) как распределение показателя мощности по высоте  $H_{top} - H_{base}$  от глубины/величина инверсии  $T_{top} - T_{base}$ . “Летние” инверсии менее мощные по обоим показателям, при этом для “зимних” инверсий в распределении их параметров можно выделить два кластера, отражающих увеличенную частоту смешанного типа инверсий в этот период. В летний период преобладают инверсии со слоем до 500 м и мощностью меньше  $9^\circ$ .

Для анализа сроков разрушения инверсий был выбран показатель мощности по температуре  $T_{top} - T_{base} = dT$ , в большей степени зависящий от

прогрева. На рис. 8 показано распределение срока разрушения инверсии мощностью  $dT$ , выраженного через угловое положение Солнца, т.е. на каких углах Солнца разрушится инверсия, мощность которой в момент восхода Солнца была  $dT$ . Для инверсий мощностью более  $5^\circ$  разрушение инверсии наступало на углах Солнца выше  $10^\circ$ .

В табл. 1 и 2 представлено распределение сроков разрушения инверсии, мощность которой в момент восхода Солнца была  $dT$  через угловое положение Солнца (табл. 1) и от срока времени (табл. 2), прошедшего с момента восхода, рассчитанные по среднечасовым профилям температуры. Расчеты производились по результатам

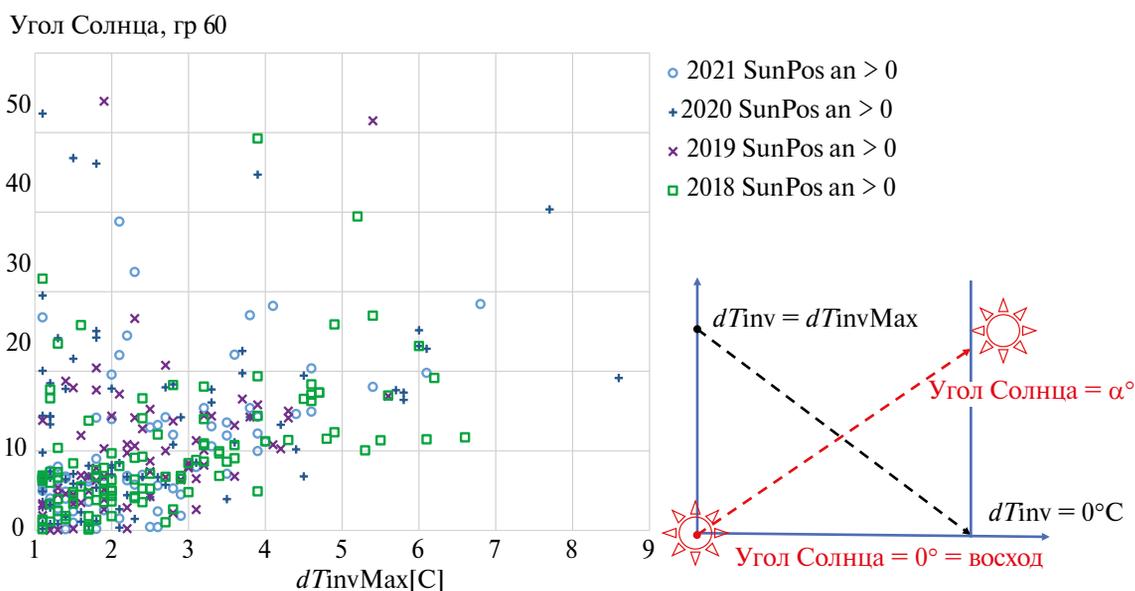


Рис. 8. Распределение срока разрушения инверсии мощностью  $dT$  от угла Солнца инверсий в период с 01/04 по 15/10 по данным МТР-5 в Долгопрудном.

Таблица 1. Распределение сроков разрушения инверсий  $dT$  через угловое положение Солнца

		Угол Солнца [гр]																														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
dTinvMax[C]	1	7	7	4	6	2	4	6	8	1	1	3	0	1	2	5	2	2	1	4	2	4	1	1	2	1	0	0	0	0	0	1
	2	6	5	4	6	12	12	7	10	9	3	4	2	1	1	4	4	2	4	5	1	4	0	2	0	1	2	2	1	0	0	
	3	0	1	2	3	3	2	3	8	6	4	4	4	1	2	7	2	2	0	6	0	2	4	0	0	0	1	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	2	1	1	2	0	2	2	5	0	2	4	1	2	3	1	1	1	2	1	3	0	0	0	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	2	0	0	0	1	4	1	2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	3	1	1	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Таблица 2. Распределение сроков разрушения инверсий  $dT$  времени с момента восхода

		Число часов после восхода [hh]												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
dTinvMax[C]	1	0	45	8	9	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	2	0	58	29	9	4	0	2	1	0	0	1	1	0
	3	0	22	34	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	3	25	5	3	0	1	0	1	0	0	0	0
	5	0	0	7	7	0	2	0	1	0	1	0	0	0
	6	0	0	2	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

измерений с 2018 по 2021 гг. Мощность по температуре округлена до целого значения.

Неоднозначность динамики характеристик температурных инверсий продемонстрирована на рис. 9. С прогревом ППС с 18 до 21 июня наблюдалось последовательное уменьшение мощности инверсии по температуре, и время разрушения инверсий было 18/06 в 06:20, 19/06 в 06:05, 20/06 в 06:25, 21/06 06:30. Возможно, после дождя 22 июня мощность инверсии по  $dT$  выросла почти в 2 раза, и время разрушения инверсий сместилось на час: 22/06 – в 07:25, далее 23/06 – в 07:15, 24/06 – в 07:05. С учетом сложности прогноза сроков разрушения инверсий в ППС можно оценить ожидаемое время  $\Delta t_{\text{сегодня}}$  разрушения инверсии мощностью  $dT_{\text{сегодня}}$  (C) на момент восхода Солнца  $t_{\text{восход}}$ , если использовать данные о сроке разрушения инверсии с мощностью  $dT_{\text{вчера}}$  (C) за время  $\Delta t_{\text{вчера}}$  накануне. Оценка срока разрушения инверсии будет иметь вид  $dT_{\text{сегодня}}(C) \times \Delta t_{\text{вчера}} / dT_{\text{вчера}}(C) = \Delta t_{\text{сегодня}}$  при условии, что  $dT_{\text{сегодня}}(C) < dT_{\text{вчера}}(C)$ .

Учет угла Солнца как косвенная оценка степени дневного прогрева ППС помогает оценить сроки перестроения динамики температурных инверсий и получить качественные оценки се-

зонно-зависимых распределений характеристик температурного режима для данного места наблюдений. На рис. 10 показана зависимость срока разрушения инверсии с мощностью  $dT$  на момент восхода Солнца от степени прогрева ( $dT(0 \text{ м}) + dT(t)$ ) слоя толщиной примерно 30 м на расстоянии 1 км (измерения МТП-5 SN050 с уровня горизонт), т.е. показано, насколько надо прогреть слой толщиной несколько десятков метров от земли для разрушения зарегистрированной на момент восхода Солнца инверсии мощностью  $dT_{\text{inv}}$  (C). По результатам наблюдений видно, что для разрушения инверсии мощностью больше 4 градусов требовался прогрев слоя у земли на более чем 1.5°.

По результатам анализа в качестве критерия для сравнения с данными модели были выбраны температурные инверсии и разделены на группы/типы: приземные (G), приподнятые (E) и высокоприподнятые (HE). Инверсии анализировались в периоды измерений как квазистационарных периодов (август как летний и декабрь как зима), так и в периоды межсезонных перестроений в апреле и октябре с учетом того, что в эти сроки часто нарушается типовой суточный ход температурой стратификации.

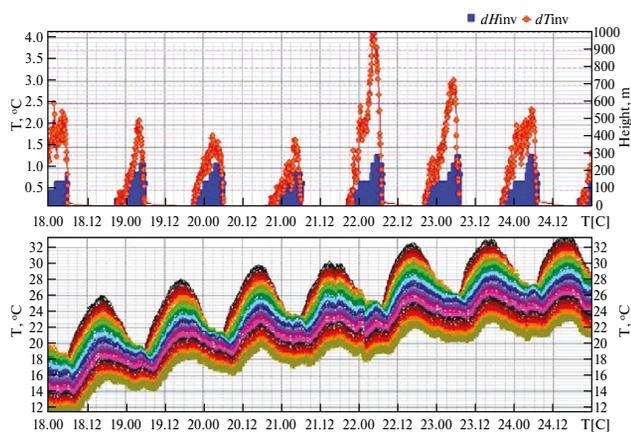


Рис. 9. Пример динамики температурных инверсий в ППС в период с 18/06 по 24/06 2021 г. (г. Долгопрудный).

### 3. WRF

Для моделирования погодных параметров использовалась мезомасштабная модель WRF-ARW версия 4.2.2.

В данной работе модель была сконфигурирована с использованием системы вложенных сеток (доменов), с пространственным разрешением внутренней целевой сетки  $2 \times 2$  км и размером  $102 \times 102$  ячейки, построенной в Ламбертовой географической проекции. Центры всех доменов были заданы в точке центра Москвы (55.7558 с.ш.; 37.6178 в.д.). Вертикальная сетка содержала в себе 40 уровней по высоте так, чтобы в приземном пограничном слое содержалось как минимум 17 вертикальных уровней. Верхняя граница модели была задана на высоте 100 мбар. Горизонт прогноза равнялся 48 ч, при этом пер-

вые 6 ч прогноза отрезались из-за “эффекта прогревания” (“spin-up period”). Запуск расчетов проводился два раза в сутки в 0 и 12 ч по UTC для выбранных месяцев (апрель, август, октябрь и декабрь). Начальное поле инициализировалось по данным NCEP FNL с пространственным разрешением  $1.0^\circ$  и временным разрешением 6 ч.

Спектр всех возможных комбинаций физических параметризаций в модели WRF очень широк, более 1 млн в версии ядра ARW. В общем случае не существует каких-то правил, по которым параметризации должны быть скомбинированы друг с другом, за исключением очень ограниченного набора, где в документации прямо указаны единственно возможные сочетания. Для уменьшения количества исследуемых комбинаций перед началом постановки экспериментов был проделан обзор статей, связанных с подобной тематикой [Kim et al., 2013; Zhang et al., 2013; Govardhan et al., 2015; Mooney et al., 2013; Stergiou et al., 2017; Pervin et al., 2020; Mendoza, Lugo, 2020]. В результате был отобран следующий список наиболее часто повторяющихся среди “победителей” физических и динамических параметризаций (табл. 3).

Поскольку работа проводится для большого города, то необходимо как-то учитывать эффекты, связанные с городской застройкой. Для этого использовались две параметризации из стандартного набора WRF-ARW.

Первый тип параметризации – это модель однослойного городского полога (UCM), разработанная Kimura, Kusaka и др. [Kusaka et al., 2001;

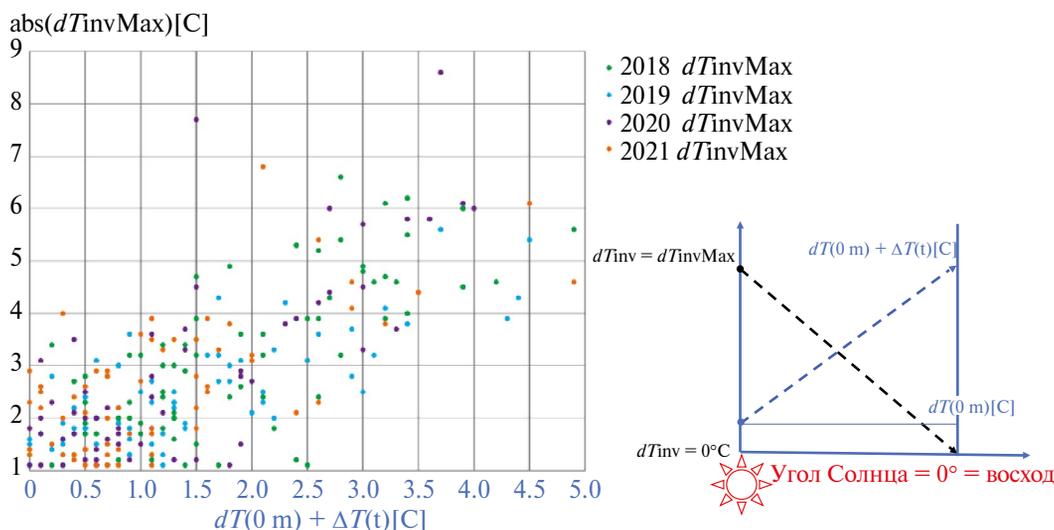


Рис. 10. Характеристики инверсий в период с 01/04 по 15/10 по данным МТР-5 SN050 в Долгопрудном с 2018 по 2021 гг.

**Таблица 3.** Полный список выбранных параметризаций для участия в эксперименте

Тип параметризации (название блока в модели WRF)	Название схемы параметризации	Номер в модели WRF
Микрофизика (mp_physics)	Схема Пердью Лин [Chen, Sun, 2001]	2
	Схема с использованием 1-го момента и 5 классов, разработанная внутри WRF [Hong et al., 2004]	4
	Новая схема Томпсона [Thompson et al., 2008]	8
Кучевая облачность (cu_physics)	Схема Кайна-Фритша [Kain, 2004]	1
	Схема Грелла-Фрейтаса (GF) [Grell, Freitas, 2014]	3
	Трехмерная схема Грелла [Grell, Devenyi, 2002]	5
	Схема Тидтке [Zhang et al., 2011]	6
Длинноволновая радиация (ra_lw_physics)	Схема RRTMG [Iacono, 2008]	4
	Схема Годдарда [Matsui et al., 2018]	5
Коротковолновая радиация (ra_sw_physics)	Схема CAM [Collins et al., 2004]	3
	Схема RRTMG [Iacono, 2008]	4
Приземный пограничный слой (PBL) (bl_pbl_physics):	Схема университета Йонсей [Hong et al., 2006]	1
	Схема Меллора-Ямады-Янджича [Janjic, 1994]	2
	Quasi-Normal Scale Elimination PBL [Sukoriansky et al., 2005]	4
	Схема Меллора-Ямады Наканиши и Ниино Уровень 2.5 PBL [Nakanishi, Niino, 2006]	5
	Схема Бужо-Лакаррер [Bougeault, Lacarrère, 1989]	8
Городская поверхность (sf_urban_physics)	Модель городского полога	1
	Модель параметризации зданий, которая позволяет зданиям быть выше, чем приземный модельный слой	2

**Таблица 4.** Отобранные наборы комбинаций различных физических параметризаций для модели WRF-ARW.

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
mp_physics	8	8	8	2	4	2	4	4
cu_physics	6	6	6	5	1	5	3	3
ra_lw_physics	4	4	4	5	4	4	5	5
ra_sw_physics	4	4	4	4	3	3	4	4
bl_pbl_physics	2	8	8	4	5	1	2	2
sf_urban_physics	2	2	2	1	1	1	2	1
cutd	0	0	0	0	5	0	0	0

Kusaka, Kimura, 2004]. Она представляет город как комбинацию бесконечно длинных уличных каньонов и трехмерных городских поверхностей, таких как стены, крыши и дороги. В уличном каньоне учитываются затенение, отражение и задержка излучения, а также задается экспоненциальный профиль ветра. Также производится расчет таких переменных, как температура поверхности крыш, стен и дорог, которые определяются по балансу энергии на поверхности, и температурные профили в слоях над крышами, стенами и дорогами, которые определяются из уравнения теплопроводности.

Второй тип, используемый в данной работе, это многослойная модель городского полога (ВЕР), раз-

работанная Martilli [Martilli et al., 2002]. Эта модель представляет собой более сложное моделирование городской среды и позволяет напрямую взаимодействовать с PBL внутри модели WRF. ВЕР учитывает трехмерную природу городских поверхностей и тот факт, что здания вертикально распределяют источники и стоки тепла, влаги и импульса через весь слой городского полога, что существенно влияет на термодинамическую структуру “шероховатости” городского подслоя и, следовательно, нижней части городского пограничного слоя. При этом учитывается влияние вертикальных и горизонтальных (стены, улицы и крыши) поверхностей на импульс (за счет силы трения), турбулентную кинетическую

энергию (ТКЭ) и потенциальную температуру. Излучение на стенах и дорогах учитывает затенение, отражение и улавливание коротковолнового и длинноволнового излучения в уличных каньонах.

Для работы данных схем нужны карты классификации типов подстилающей поверхности, а также различные параметры, например, высота зданий, ширина дорог, площадь крыш и т.п. В стандартном наборе входных данных для модели WRF есть эти данные в первом приближении, но можно предположить, что уточнение этих параметров для конкретной локации позволит повысить качество воспроизведения процессов в городской среде. При этом модель позволяет ручную корректировку карт и подобных параметров для расчетов.

Также в соответствии с рассмотренной литературой были выбраны наиболее частые комбинации выбранных параметризаций между собой. В табл. 4 представлены наборы, которые участвовали в эксперименте (всего 8 штук). В результате для каждого месяца необходимо было провести от 480 до 496 расчетов (в зависимости от количества дней в месяце).

Настройка физических параметризаций модели проводилась на промежутке времени 2018–2020 гг. по данным прибора MTP-5 SN050-в г. Долгопрудный, а валидация проводилась по данным MTP-5 SN068-в р-не Косино-Ухтомский за 2021 г. Таким образом, мы разделили обучающую и валидационную выборки по времени и пространству.

#### 4. МЕТРИКИ ЗАДАЧИ

Прежде всего рассматривалась способность модели правильно классифицировать один из

трех типов наблюдаемой инверсии (см. секцию 2.1). В таком случае необходимо пользоваться метриками для задачи классификации, такими как точность (*precision*), полнота (*recall*) и, которая представляет собой комбинацию предыдущих двух метрик:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (2)$$

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \frac{precision \cdot recall}{\beta^2 \cdot precision + recall}, \quad (3)$$

где  $TP$  – количество событий, которые были определены как инверсия с правильным типом;  $FP$  – количество событий, которые были неправильно определены как инверсия;  $FN$  – количество событий, которые были неверно определены как отсутствие инверсии;  $\beta$  – коэффициент, вводящий соотношение между точностью и полнотой (равен единице, если нас интересует равномерное соотношение).

Вторая задача заключалась в оценке способности настроенной модели корректно воспроизводить конкретные количественные характеристики инверсии, такие как высота инверсии и глубина инверсии (см. секция 2.1). Для оценки использовались среднеквадратическое отклонение (*RMSE*), систематическая ошибка (*bias*) и соотношение вариаций наблюдаемых параметров инверсий и модельных параметров ( $\sigma$ ). Последняя метрика дает понимание, насколько хорошо модель воспроизводит общую вариацию целевых параметров.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^t - y_i)^2}, \quad (4)$$

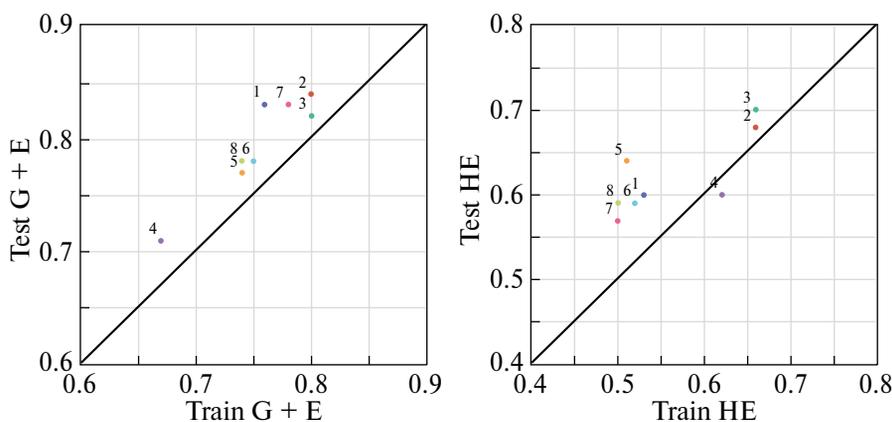


Рис. 11. Результаты метрики F1 для инверсий типа G + E (слева) и HE (справа).

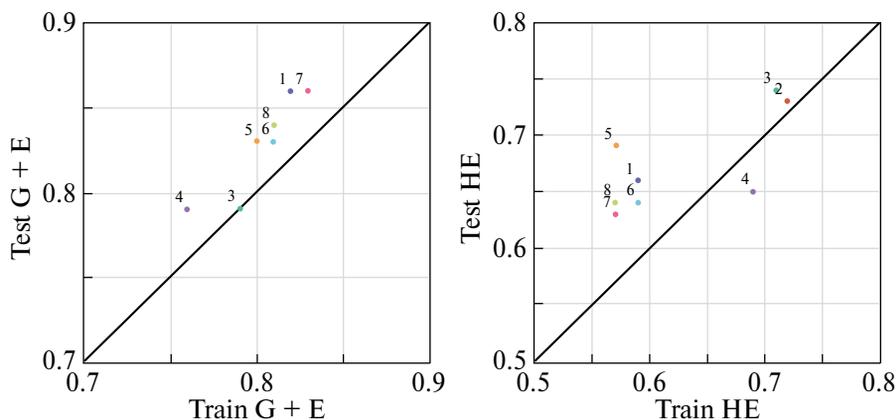


Рис. 12. Результаты метрики Fb ( $b = 0.75$ ) для инверсий типа G + E (слева) и HE (справа).

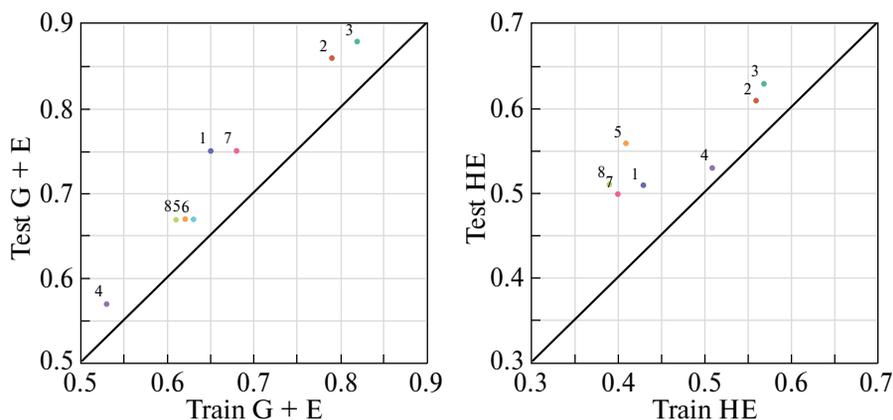


Рис. 13. Результаты точности (Precision) для инверсий типа G + E (слева) и HE (справа).

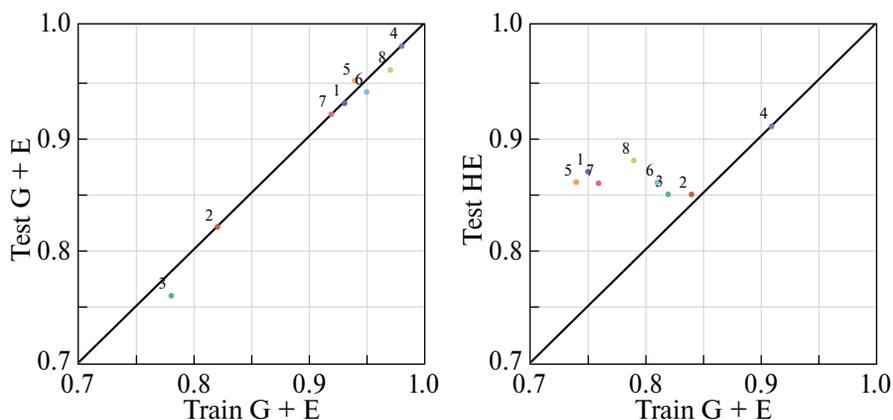


Рис. 14. Результаты полноты (Recall) для инверсий типа G + E (слева) и HE (справа).

$$bias = \sum_{i=1}^N (y_i' - y_i), \quad (5)$$

$$var_{ratio} = \frac{var_{model}}{var_{obs}}, \quad (6)$$

тинное значение и модельное значение соответственно; — модельная вариация параметра за период времени; — наблюдаемая вариация параметра за период времени.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

где  $N$  — количество точек с наблюдениями (в нашем случае измерений профилей); и —  $i$ -е ис-

На рис. 11–14 показаны результаты решения задачи классификации инверсий, разбитые на

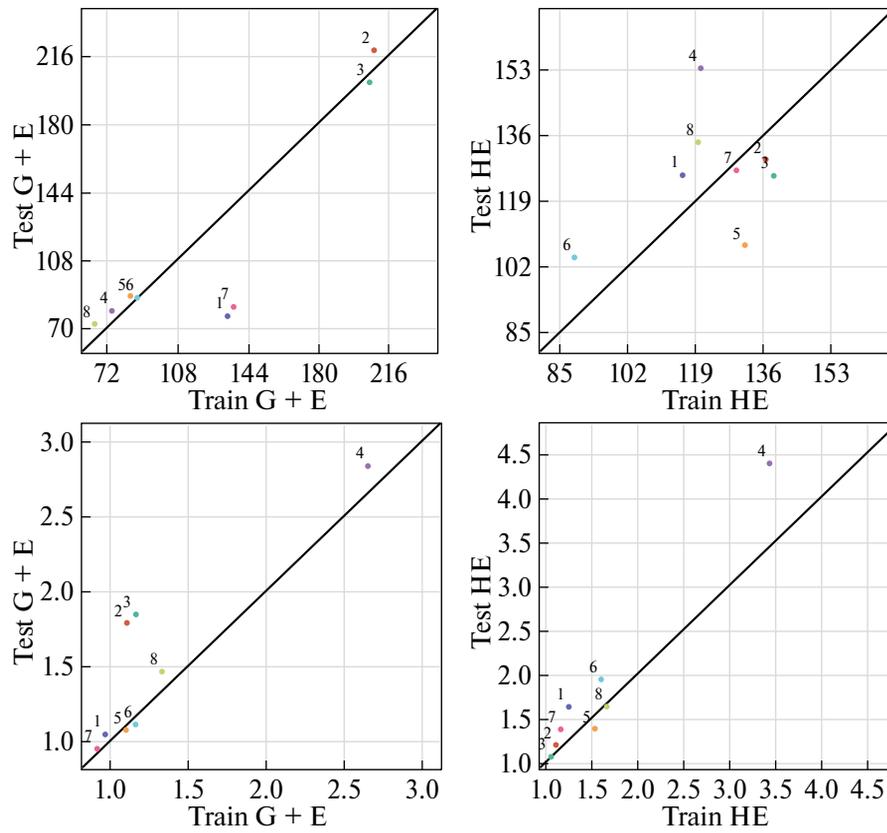


Рис. 15. Результаты RMSE для инверсий типа G + E (левый столбец) и HE (правый столбец).

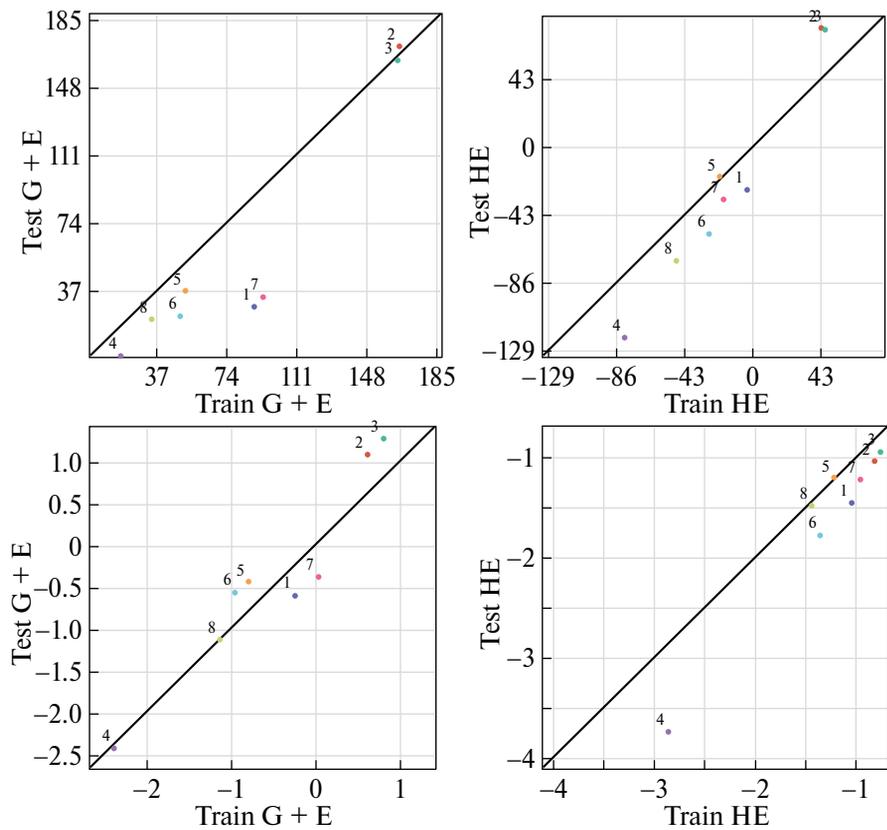


Рис. 16. Результаты bias для инверсий типа G + E (левый столбец) и HE (правый столбец).

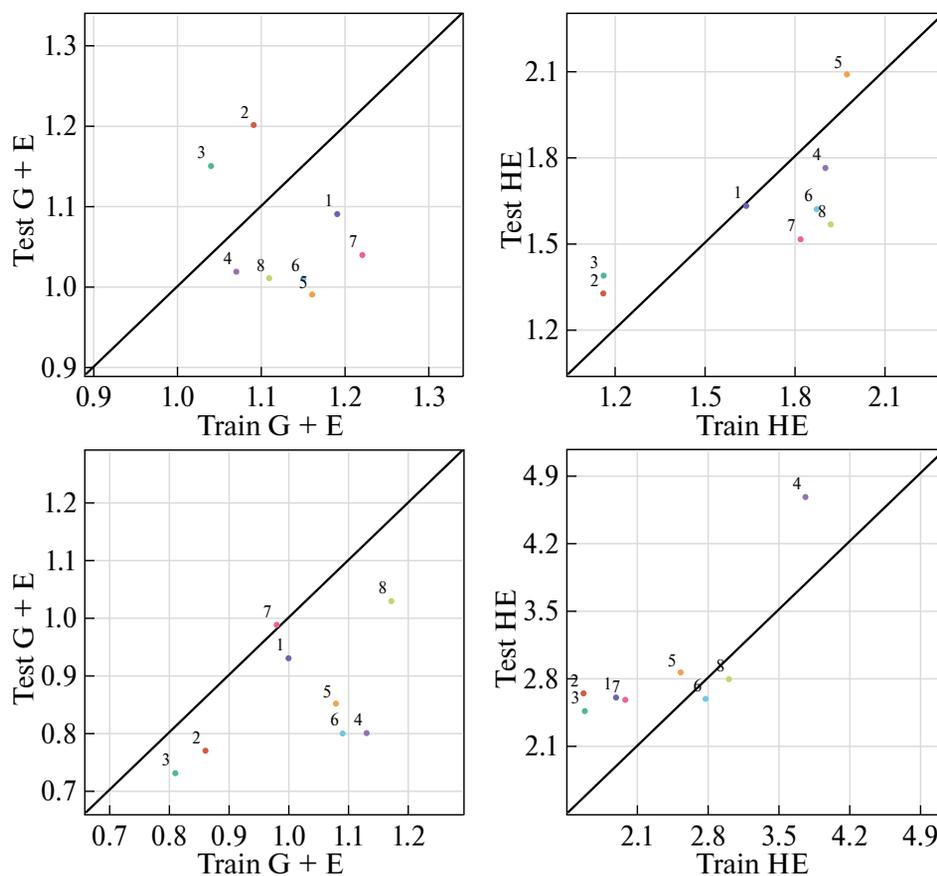


Рис. 17. Результаты  $var_{ratio}$  для инверсий типа G + E (левый столбец) и HE (правый столбец).

две группы (G + E) и (HE). В качестве метрик использовались (рис. 12) и (рис. 13). Второй вариант дает большее смещение в сторону полноты предсказаний, таким образом, мы меньше “наказываем” за FP и больше – за FN. Все используемые метрики для задачи классификации в идеальной ситуации должны быть равны единице, поэтому нас интересуют параметризации, которые находятся ближе к правому верхнему углу. На всех рисунках далее по оси x отложены результаты, полученные при настройке параметров на станции в г. Долгопрудном, по оси y – результаты на валидационном периоде по станции в р-не Косино-Ухтомский.

Из приведенных выше результатов можно сделать вывод, что в случае двух типов инверсии (G + E) могут быть использованы наборы № 1, № 7. В случае (HE) – наборы № 2 и № 3.

На рис. 15–17 представлены результаты количественных метрик параметров инверсий, таких как высота и глубина инверсии, также разбитые на две группы (G + E) и (HE). В случае RMSE и bias оптимальными наборами являются те, которые находятся ближе к нулю. Для метрики нас

интересуют значения, которые ближе всего к единице, что означает, что модель описывает наблюдаемую вариацию параметра один к одному. По оси x отложены результаты, полученные при настройке параметров на станции в г. Долгопрудном, по оси y – результаты на валидационном периоде по станции в р-не Косино-Ухтомский. Результаты представлены по двум параметрам инверсий: высота (верхние рисунки), единицы измерения – м, и глубина (нижние рисунки), единицы измерения – градусы Цельсия.

Таким образом, для оценки высоты в случае двух типов инверсии (G + E) могут быть использованы наборы № 4, № 6, № 8. В случае (HE) можно увидеть, что присутствует либо сильная переоценка вариации параметра, либо присутствуют существенные завышения по RMSE и bias. В данном случае для инверсии типа (HE) нельзя сделать однозначный вывод, но можно ожидать, что набор № 1 даст более стабильный результат.

Для оценки глубины инверсии в случае двух типов (G + E) могут быть использованы наборы № 1 и № 7. В случае (HE) можно увидеть переоценку вариации параметра больше чем в два раза

для любого набора. Однако, если выбирать из представленных результатов, то можно использовать наборы № 5 и № 7.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность сочетания модели численного прогноза погоды с данными результатов измерений температурной стратификации в планетарном пограничном слое через настройку по избранному критерию (температурные инверсии) параметров и выбор оптимальных наборов параметризаций модели.

Кроме того, продемонстрирована технология, позволяющая вести контроль точности прогноза по результатам измерений для оценки текущего термического режима планетарного пограничного слоя атмосферы. Такой подход позволяет перейти от веры в достоверность прогноза к знанию того, что он достоверен по результатам сравнения с измеренными профилями температуры.

## 7. ДАЛЬНЕЙШИЕ ДЕЙСТВИЯ

Как видно из полученных результатов, не получается выбрать одну единственную комбинацию физических параметризаций модели WRF для решения всех поставленных задач. Результаты отличаются в зависимости от критериев (метрик) настройки и выбранных типов инверсий. В таком случае логичным продолжением было бы исследование по составлению линейной комбинации из результатов моделирования небольшого числа параметризаций (например, 2–4 набора), которая позволила бы существенно улучшить конечный результат. При этом комбинации параметров могут быть зафиксированы, а вот линейные комбинации (коэффициенты при результатах моделирования) могут отличаться в зависимости от целевого критерия. Также интересным продолжением работы является проверка оперативной корректировки заданной линейной комбинации решений по данным МТР5, в том числе с учетом доступности регулярных измерений в центре города с лета 2022 г.

В дополнение к этому планируется выполнить ряд работ, а именно: проверить условия разрушения температурных инверсий с учетом регистрируемых на станции ГПБУ «МОСЭКОМОНИТОРИНГ» (МЭМ) потоков солнечной радиации; посчитать зависимость сроков разрушения приподнятых инверсий смешанного и адвективного типа в зависимости от прогрева поверхности,

угла Солнца и измеренных потоков солнечной радиации; оценить региональную изменчивость полученных характеристик и методов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранов Н.А.* Прогнозирование временных рядов метеопараметров на основе подхода нейронных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения, математическое моделирование и вычислительные алгоритмы: сборник материалов международной конференции. Белгород. 25–29 октября 2021. Под ред. В.Б. Васильева, И.С. Ломова. Белгород: ИД «БелГУ» НИУ «БелГУ» 2021. С. 127–130.
- Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Миллер Е.А., Юшков В.П.* Прогноз вертикальных распределений температуры и ветра в атмосферном пограничном слое с использованием модели wrf-arw и усвоением данных содара и температурного профилера // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. 2018. С. 191–201.
- Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю.* Загрязнение воздуха на Европейской части России и в Украине в условиях жаркого лета 2010 года // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 757–766.
- Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н.* Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 678–688.
- Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А.* Методические рекомендации по использованию данных профиломеров МТП-5. РОСГИДРОМЕТ. 2010. <http://method.meteorf.ru/norma/rec/profile.pdf>
- Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И.* Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 10. С. 877–883.
- Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М.* Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 154–172.
- Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А.* Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 641–650.
- Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 359 с.
- РБ-046–21. Руководство по безопасности при исполь-

- зовании атомной энергии // Мониторинг гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2021.
- Шальгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Коновалов И.Б., Захарова П.В.* Прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха с применением данных численной модели атмосферы и химической транспортной модели // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 365. С. 81–93.
- Эзау И.Н., Вольф Т., Миллер Е.А., Репина И.А., Троицкая Ю.И., Злицинкевич С.С.* Анализ результатов дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы долины г. Берген (Норвегия) // Издательство Планета. Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 93–103.
- Юшков В.П.* Термическая стратификация воздушного бассейна мегаполиса: сопоставление модельных представлений и данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 424–437.
- Ячмёнова Н.В., Гольвей А.Ю.* Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске // Вестн. Челябинского ГУ. 2011. № 5. С. 220.
- Akhmetshina A.S., Kizhner L.I., Kuzhevskaya I.V. et al.* Using WRF mesoscale model to restore temperature profile in atmosphere boundary layer in Tomsk // Proceedings of SPIE. 2015. V. 9680: 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. June 22–26. 2015. Tomsk. Russian Federation. P. 968069–1–968069–5. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000552252>
- Al-Hemoud A., Al-Sudairawi M., Al-Rashidi M. et al.* Temperature inversion and mixing height: critical indicators for air pollution in hot arid climate // Nat Hazards 97. 2019. P. 139–155. <https://doi.org/10.1007/s11069–019–03631–2>
- Baranov N.A., Lemishchenko E.V.* Forecasting temperature profile based on blending of measurement data and numerical prediction models // Int. J. of circuits, systems and signal processing. V. 12. 2018. P. 235–239.
- Borge R., Alexandrov V., del Vas J.J., Lumberras J., Rodriguez E.* A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula // Atmos. Environ. 2008. V. 42. P. 8560–8574.
- Bougeault P., Lacarrère P.* Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta-Scale Model // Mon. Weather Rev. 1989. V.117. P. 1872–1890. [http://dx.doi.org/10.1175/1520–0493\(1989\)](http://dx.doi.org/10.1175/1520–0493(1989))
- Caumont O., Cimini D., Löhnert U., Alados-Arboledas L., Bleisch R., Buffa F., Ferrario M.E., Haefele A., Huet T., Madonna F., Pace G.* Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based microwave radiometers into a convective-scale NWP model // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2016. V.142. P. 2692–2704. <https://doi.org/10.1002/qj.2860>
- Chang Che-Ming, Long-Nan Chang, Hui-Chuan Hsiao, Fang-Chuan Lu, Ping-Fei Shieh, Chi-Nan Chen, Shish-Chong Lu.* A Further Study of High Air Pollution Episodes in Taiwan Using the Microwave Temperature Profiler (MTP-5HE) // JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. 2006. V.49. Issue 1. P. 60–64. ISSN1347–5371. Print ISSN 1340–8054. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.49.60>
- Chen S.-H., Sun W.Y.* A One-dimensional Time Dependent Cloud Model // J. Meteorol. Soc. Jpn. 2002. V. 80. № 1. P. 99–118.
- Cimini D., Haeffelin M., Kotthaus S. et al.* Towards the profiling of the atmospheric boundary layer at European scale – introducing the COST Action PROBE // Bull. of Atmos. Sci. & Technol. 2020. V. 1. P. 23–42. <https://doi.org/10.1007/s42865–020–00003–8>
- Collins W., Rasch P.J., Boville B.A., McCaa J., Williamson D. L., Kiehl J.T., Dai Y.* Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0) (No. NCAR/TN-464+STR) // University Corporation for Atmospheric Research. 2004. <https://doi.org/10.5065/D63N21CH>
- EPA: United States Office of Air Quality EPA-454/R-99–005, Environmental Protection Planning and Standards, Agency Research Triangle Park, NC27711 February 2000.
- EPA: Quality Assurance Guidance for the Collection of Meteorological Data Using Passive Radiometers, U. S. Environmental Protection Agency Region 10 Office of Environmental Assessment and U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 2011, FINAL 0611.
- Ferrario M.E. et al.* 2008 IOP Conf. Ser.: // Earth Environ. Sci. 1012067.
- Gochakov A.V., Tokarev V.M., Kolker A.B.* Verification of vertical temperature profiles in the COSMO and ICON models with available observational data // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1023012004. 2022.
- Golitsyn G.S., Kadyrov E.N., Kuznetsova I.N.* Microwave remote sensing investigation of the atmospheric boundary layer thermal regime above an urban area // Proc. of 12 ARM Science Team Meeting. St. Petersburg. Florida. 2002. P. 1–7.
- Govardhan G., Nanjundiah R.S., Satheesh S.K., Krishnamoorthy K., Kotamarthi V.R.* Performance of WRF-Chem over Indian region: Comparison with measurements // J. Earth Syst. Sci. 2015. V. 124. P. 875–896.
- Grell G.A., Devenyi D.* A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29 P. 1693. <http://dx.doi.org/10.1029/2002gl015311>
- Grell G.A., Freitas S. R.* A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 5233–5250.

- <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>  
*Hong S.-Y., Dudhia J., Chen S.-H.* A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation // *Mon. Weather Rev.* 2004. V. 132. P. 103–120.  
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong S. Y., Noh Y., Dudhia J.* A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // *Mon. Weather Rev.* 2006. V. 134. P. 2318–2341.  
<http://dx.doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *Geophys. Res.* 2008. P. 113. D13103.  
<https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Illingworth A.J., Cimini D., Haeferle A., Haeffelin M., Hervo M., Kotthaus S., Löhnert U., Martinet P., Mattis I., O'Connor E.J., Pothast R.* How Can Existing Ground-Based Profiling Instruments Improve European Weather Forecasts? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2019. V. 100 (4). P. 605–619.
- Ilyin G.N., Troitsky A.V.* Determining the Tropospheric Delay of a Radio Signal by the Radiometric Method // *Radiophys. Quantum. Electron.* 2017. V.60. № 4. P. 291–299.
- Janjic Z.I.* The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. // *Mon. Weather Rev.* 1994. V. 122. P. 927–945.  
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122)
- Kadygrov E.N., Miller E.A., Troitsky A.V.* Study of atmospheric boundary layer thermodynamics during total solar eclipse on the basis of microwave radiometers data // *Proc. of 12-th Spec.Meeting Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (Microrad-2012).* Rome. Italy. 2012. P. 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/Microrad.6185246>
- Kain, J.S.* (The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update // *J. Appl. Meteorol.* 2004. V. 43. P. 170–181.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)43](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)43)
- Khaikine M., Kuznetsova I., Kadygrov E. et al.* Investigation of temporal-spatial parameters of an urban heat island on the basis of passive microwave remote sensing // *Theor. Appl. Climatol.* 2006. V. 84. P. 161–169.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-005-0154-z>
- Kikev D.B., Astakhova E.D., Zaripov R.B. et al.* FROST-2014 project and meteorological support of the Sochi-2014 Olympics. *Russ. // Meteorol. Hydrol.* 2015. V. 40. P. 504–512.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373915080026>
- Kim Y., Sartelet K., Raut J.C., Chazette P.* Evaluation of the Weather Research and Forecast/Urban Model over Greater Paris // *Bound.-Layer Meteorol.* 2013. V. 149. P. 105–132.
- Koldaev A., Miller E., Troitsky A., Sarichev S.* Experimental Study of Rain-induced Accuracy Limits for Microwave Remote Temperature Profiling // *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation.* Helsinki. Finland. 2010.
- Kotthaus S., Bravo-Aranda J.A., Collaud Coen M., Guerrero-Rascado J.L., Costa M.J., Cimini D., O'Connor E.J., Hervo M., Alados-Arboledas L., Jiménez-Portaz M., Mona L., Ruffieux D., Illingworth A., Haeffelin M.* Atmospheric boundary layer height from ground-based remote sensing: a review of capabilities and limitations // *Atmos. Meas. Tech.* 2023. V. 16. P. 433–479.  
<https://doi.org/10.5194/amt-16-433-2023>
- Klügel T., Böer A., Schüller T., Schwarz W.* Atmospheric data set from the Geodetic Observatory Wettzell during the CONT-17 VLBI campaign // *Earth Syst. Sci. Data.* 2019. V. 11. P. 341–353.  
<https://doi.org/10.5194/essd-11-341-2019>
- Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., Kimura F.* A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models // *Boundary-Layer Meteorology.* 2001. V. 101. P. 329–358.
- Kusaka H., Kimura F.* Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case // *Journal of the Meteorological Society of Japan.* 2004. V.82. P. 67–80.
- Martilli A., Clappier A., Rotach M.W.* An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // *Bound.-Layer Meteorol.* 2002. V. 104. P. 261–304.
- Martinot P., Unger V., Burnet F., Georgis J., Hervo M., Huet T., Löhnert U., Miller E., Orlandi E., Price J., Schröder M., Thomas G.* A dataset of temperature, humidity, and liquid water path retrievals from a network of ground-based microwave radiometers dedicated to fog investigation // *Bulletin of Atmospheric Science and Technology.* 2022. V. 3. № 1–4.  
<https://doi.org/10.1007/s42865-022-00049-w>
- Matsui H., Hamilton D.S., Mahowald N.M.* Black carbon radiative effects highly sensitive to emitted particle size when resolving mixing-state diversity // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. P. 3446.
- Matsui I., Sugimoto N., Maksyutov S., Inoue G., Kadygrov E., Vyazankin S.* Comparison of Atmospheric Boundary Layer Structure Measured with a Microwave Temperature Profiler and a Mie Scattering Lidar // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1996. V. 35. Part I. № 4A. P. 2168–2169.
- Mendoza Uribe I., Lugo Morín D.R.* Performance of the WRF model with different physical parameterizations in the precipitation simulation of the state of Puebla // *Atmósfera.* 2020. V. 33. № 4. P. 357–383.  
<https://doi.org/10.20937/ATM.52640>
- Misenis C., Zhang Y.* An examination of sensitivity of WRF/Chem predictions to physical parameterizations, horizontal grid spacing, and nesting options // *Atmos. Res.* 2010. V. 97. P. 315–334.
- Mooney P.A., Mulligan F.J., Fealy R.* Evaluation of the Sensitivity of the Weather Research and Forecasting Model to Parameterization Schemes for Regional Climates of Europe over the Period 1990–95 // *J. Clim.*

2013. V. 26. P. 1002–1017.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00676.1>
- Nakanishi M., Niino H.* An Improved Mellor-Yamada Level 3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog // *Bound.-Layer Meteorol.* 2006. V. 119. P. 397–407.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>
- Odintsov S., Miller E., Kamardin A., Nevzorova I., Troitsky A., Schröder M.* Investigation of the Mixing Height in the Planetary Boundary Layer by Using Sodar and Microwave Radiometer Data // *Environments.* 2021. V. 8 (11). P. 115.  
<https://doi.org/10.3390/environments8110115>
- Pasquill F.* The estimation of the dispersion of windborne material // *Meteorol. Mag.* 1961. V. 90. P. 33–49.
- Pervin L., Gan T.Y.* Sensitivity of physical parameterization schemes in WRF model for dynamic downscaling of climatic variables over the MRB // *Journal of Water and Climate Change.* 2020.  
<https://doi.org/10.2166/wcc.2020.036>
- Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M. et al.* Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2020. V. 45. P. 455–465.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373920070018>
- Rotach M.W., Kadygrov E.N., Kadygrov V.N., Miller E.A., et al.* Turbulence structure and exchange processes in an alpine valley: The Riviera Project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2004. V. 85. № 9. P. 1367–1385.
- Starchenko A.V., Tolstykh M.A., Mzyak V.G., Svarovsky A.I., Prokhanov S.A.* A local observation data assimilation in mesoscale numerical weather prediction models // *Proc. SPIE12341 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.* 2022. 123416N.  
<https://doi.org/10.1117/12.2644943>
- Stergiou I., Tagaris E., Sotiropoulou R.-E.P.* Sensitivity Assessment of WRF Parameterizations over Europe // *Proceedings.* 2017. V. 1. P. 119.  
<https://doi.org/10.3390/ecas2017-04138>
- Sukoriansky S., Galperin B., Perov V.* Application of a New Spectral Theory of Stably Stratified Turbulence to the Atmospheric Boundary Layer over Sea Ice // *Bound.-Layer Meteorol.* 2005. V. 117. P. 231–257.  
<https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
- Thompson G., Field P.R., Rasmussen R.M., Hall W.D.* Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization // *Mon. Weather Rev.* 2008. V. 136. № 12. P. 5095–5115.  
<http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>
- Triantafyllou A.G., Kalogiros J., Krestou A. et al.* Evaluation of an atmospheric model with surface and ABL meteorological data for energy applications in structured areas // *Theor. Appl. Climatol.* 2019. V. 135. P. 1227–1242.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2429-1>
- Troitsky A.V., Gaikovich K.P., Gromov V.D., Kadygrov E.N., Kosov A.S.* Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen band center at 60 GHz // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* 1993. V. 31. № 1. P. 116–120.
- Vaisala.* Accuracy Matters in Radiosonde Measurements // *White Paper.* 2016. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Accuracy-Matters-in-Radiosonde-Measurements-White-Paper-B211548EN.pdf>
- Vorobyeva E., Miller E., Kadygrov E.* Study of seasonal and interannual features of urban heat island vertical structure above Moscow city // *The 7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7).* 2009. Yokohama. Japan. P. 1–5.
- Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Lenskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S.* Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 1999. V. 16. P. 805–818.
- WMO: Global NWP Statement of Guidance for the EUCOS region.* [https://www.eumetnet.eu/wp-content/uploads/2020/08/EMN\\_StatementofGuidance\\_EUCOSregion\\_GlobalNWP.pdf](https://www.eumetnet.eu/wp-content/uploads/2020/08/EMN_StatementofGuidance_EUCOSregion_GlobalNWP.pdf)
- Zhang C., Wang Y., Hamilton K.* Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF Using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme // *Mon. Weather Rev.* 2011. V. 139 (11). P. 3489–3513.
- Zhang Y., Sartelet K., Wu S.Y., Seigneur C.* Application of WRF/Chem-MADRID and WRF/Polyphemus in Europe – Part 1: Model description, evaluation of meteorological predictions, and aerosol-meteorology interactions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 6807–6843.

## Parameterization of a WRF Model Based on Microwave Measurements of Temperature Inversion Characteristics in PBL over Moscow City

R. V. Zhuravlev<sup>1</sup>, E. A. Miller<sup>1, \*</sup>, A. K. Knyazev<sup>1</sup>, N. A. Baranov<sup>2</sup>, E. A. Lezina<sup>3</sup>, A. V. Troitsky<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Central Aerological Observatory of Roshydromet, st. Pervomayskaya, 3, Dolgoprudny, 141700 Russia

<sup>2</sup>Computing Centre named A. A. Dorodnicyn FRCIC of the Russian Academy of Sciences, st. Vavilova, 40, Moscow, 119333 Russia

<sup>3</sup>BEPI Mosecomonitoring, st. Novy Arbat, 11, build. 1, Moscow, 119992 Russia

<sup>4</sup>Nizhny Novgorod State University N. I. Lobachevsky, st. Ashgabat'skaya, 4, Nizhny Novgorod, 603105 Russia

\*e-mail: tissary@gmail.com

In this work the WRF-ARW model was tested with several different combinations of physical parameterizations to assess the quality of temperature inversion parameter predictions over the Moscow city. The dynamic and statistical characteristics of temperature inversions have been calculated and analysed in selecting criteria for comparisons. The calculated of estimating of the dissipation conditions in dependence on the type of temperature inversions are presented. The data source was the results of temperature profiles measurements in a layer up to 1 km, obtained by the MTP-5 passive microwave profiler from 2018 to 2021. One MTP5 on the North of Moscow was used to tune the model parameters and another one on the East of Moscow for validation. The comparison results show that several parameterization options can be chosen to reproduce the main inversion parameters.

**Keywords:** temperature inversions, atmospheric planetary boundary layer, parameterization of the WRF-ARW, MTP-5 microwave radiometer, remote sensing