

На правах рукописи



**Шувалова Юлия Олеговна**

**ОСОБЕННОСТИ ОБЛАЧНО-АЭРОЗОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЕГО  
ВЛИЯНИЕ НА СОЛНЕЧНУЮ РАДИАЦИЮ В МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ  
COSMO И ICON**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»), лаборатории детализированных численных прогнозов погоды отдела численных краткосрочных прогнозов Регионального специализированного метеорологического центра Москва.

**Научный руководитель:** **Чубарова Наталья Евгеньевна**, доктор географических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, профессор.

**Официальные оппоненты:** **Калинин Николай Александрович**, доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», географический факультет, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы.

**Гавриков Александр Владимирович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук», лаборатория взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Российской академии наук».

Защита диссертации состоится «22» мая 2024 г. в 14 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru/disserboard>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета, кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Облачность играет значительную роль в планетарном гидрологическом цикле и формировании теплового баланса атмосферы у земной поверхности [Будыко М.И., 1956; Кислов А.В., 2011; Wild et al., 2015]. Микрофизические процессы в облачности и облачно-радиационное взаимодействие являются важной сферой исследований [Ивлев и Довгалюк, 2010; Калинин Н.А., 2015; Михайлов и др., 2017; Gryspeerd et al., 2022].

Задача детализированного анализа прогнозируемых облачных характеристик долгие годы была неосуществимой ввиду отсутствия регулярных наблюдений за характеристиками облаков. В последние годы стали доступны спутниковые и наземные данные регулярных измерений облачных характеристик высокого качества [Филей А.А., 2019; Illingworth et al., 2007; Platnick et al., 2016], развивающихся на базе систем комплексного мониторинга атмосферы. Это позволяет исследовать схемы и параметризацию облачных характеристик в моделях численного прогноза погоды (ЧПП) и климата на предмет их соответствия наблюдениям [Miller et al., 2014; Fovell and Su, 2007]. В моделях ЧПП учитывается комплекс характеристик облачности: водность и ледность облаков, размер и форма гидрометеоров, покрытие облачностью небосвода и так далее. Такая комплексность усложняет исследование облаков в моделях [Васильев и др., 2017; Толстых и др., 2017; Чернокульский и Елисеев, 2017].

С ростом вычислительных мощностей, используемых в численном прогнозе погоды, и при наблюдающемся росте пространственного разрешения моделей [Ривин и др., 2019; Palmer T.N., 2018] появилась возможность детализации микрофизических процессов [Гордов и др., 2013; Bauer et al., 2015]. Уменьшение шагов вычислительной сетки моделей ЧПП остро ставит задачу оценки погрешностей и применимости существующих схем и параметризаций на разных масштабах моделирования [Khain et al., 2022; Villefranque and Hogan, 2021].

Одно из направлений развития моделирования облачной структуры состоит в изучении процессов облачно-аэрозольного и облачно-радиационного взаимодействия [Володин Е.М., 2021; Rothenberg et al., 2018]. В последние годы наблюдается обширное внедрение схем, учитывающих эффекты облачно-аэрозольного взаимодействия, не только в климатические модели [Володин и Кострыкин, 2016; Zhang et al., 2016], но и в модели ЧПП [Seifert et al., 2012; Singh et al., 2018]. Это связано как с накоплением знаний об облачно-аэрозольных связях [Терпугова и др., 2009; Matvienko et al., 2015; Pinsky and Khian, 2002], так и с возможностью учёта влияния непрямых эффектов аэрозоля на метеорологические характеристики атмосферы [Stevens and Feingold, 2009]. Тестирование непрямых эффектов аэрозоля в моделях с использованием данных наблюдений трудно осуществимо, так как сложно найти подходящие метеорологические

и техногенные условия. Локдаун 2020 года, связанный с COVID-19, стал глобальным вынужденным натурным экспериментом, в том числе по оценке антропогенного вклада в изменчивость характеристик облачности и солнечной радиации у земной поверхности [Гинзбург и др., 2020; Губанова и др., 2021; Sokhi et al., 2021].

Модели численного прогноза погоды ICON и COSMO, рассмотренные в данной диссертации, не только способны работать на временном и пространственном разрешении, которое соответствует высококачественным измерительным системам облачности, но и учитывать основные облачно-аэрозольные эффекты без применения химико-транспортных моделей [Seifert and Beheng, 2006; Muskatel et al., 2021]. Однако ранее не проводилась единая комплексная оценка микрофизических и радиационных схем моделей ICON и COSMO.

Результаты оценок физических механизмов облачности, представленные в диссертации, могут быть применены к другим моделям ЧПП и климата. В исследованиях по мультимодельному анализу [Jing et al., 2017; Marinescu et al., 2021] зачастую прослеживаются схожие ошибки прогноза, связанные с физическими параметризациями моделей. Многие схемы и параметризации, рассмотренные в данной диссертации, входят в число часто применяемых в оперативном ЧПП [Bush et al., 2020; IFS documentation, 2023; Khain and Lynn, 2009].

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является оценка особенностей воспроизведения облачных характеристик и солнечной радиации у земной поверхности в моделях численного прогноза погоды ICON и COSMO с учётом облачно-аэрозольного взаимодействия.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. разработка методик тестирования облачных характеристик и схем радиационного переноса в облачных условиях в моделях численного прогноза погоды на основе данных наземных и спутниковых измерений;
2. анализ схем и параметризаций характеристик облачности и солнечной радиации у земной поверхности в модели ICON, модификация схемы нуклеации облачных капель микрофизической схемы модели;
3. исследование характеристик облачности в модели COSMO, выявление оптимальных настроек схемы радиационного переноса модели с целью улучшения прогноза солнечной радиации у земной поверхности и приземной температуры воздуха;
4. оценка влияния облачно-аэрозольного взаимодействия на облачные характеристики, солнечную радиацию и температуру воздуха у земной поверхности по данным наблюдений и численных экспериментов модели COSMO, в том числе на примере снижения счётной концентрации ядер конденсации в период локдауна в Москве весной 2020 года.

## **Научная новизна**

1. Впервые проведено совместное исследование микрофизической и радиационной схем моделей численного прогноза погоды COSMO и ICON, учитывающее взаимосвязи облачно-радиационных и облачно-аэрозольных процессов.
2. Модифицирована схема нуклеации облачных капель микрофизической схемы модели ICON с целью повышения интенсивности каплеобразования в модели.
3. Впервые получены оценки первого непрямого эффекта аэрозоля в оперативной модели численного прогноза погоды над территорией России, в том числе для условий ограничительных мер вследствие COVID-19.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработан комплекс методик для оценки эффективности схем и параметризаций облачных характеристик и солнечной радиации по данным наземных и спутниковых измерений. Оценки погрешностей в параметризациях облачных характеристик, полученные в диссертации, способствуют совершенствованию расчёта солнечной радиации у земной поверхности в моделях численного прогноза погоды. В работе показано, что счётная концентрация ядер конденсации может быть одним из важных факторов успешного прогноза солнечной радиации у земной поверхности и приземной температуры воздуха. Впервые получена количественная оценка влияния антропогенной деятельности в мегаполисе на состояние атмосферы вследствие непрямого аэрозольного эффекта.

Исследования, отражённые в диссертации, были проведены в рамках темы плана научно-исследовательских и технологических работ (НИТР) Росгидромета по направлению «Методы, модели и технологии гидрометеорологических расчётов и прогнозов» (НИОКТР № АААА-А20-120021490079-3); гранта Минобрнауки Российской Федерации № 075-15-2021-574 и гранта РНФ № 18-17-00149 (НИОКТР № АААА-А18-118113090043-5), посвящённых исследованию облачно-аэрозольных и облачно-радиационных эффектов в атмосфере.

## **Методология и методы исследования**

Основным инструментом исследования является метод математического моделирования, реализованный в моделях численного прогноза погоды ICON и COSMO. Результаты численного моделирования сравниваются с данными современных метеорологических наземных и спутниковых измерений.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Низкая интенсивность нуклеации облачных капель является одним из факторов занижения водосодержания облаков в модели ICON. Внедрение параметризации вертикальной скорости в схему нуклеации облачных капель приводит к заметному росту водосодержания облаков.

2. Применение облачно-аэрозольной схемы в модели COSMO позволяет улучшить воспроизведение суммарной радиации, что приводит к значимому снижению средней абсолютной ошибки прогноза температуры воздуха на уровне 2 м в дневные часы на 0,2-0,4°C.

3. В модели COSMO воспроизведён первый непрямой эффект аэрозоля на примере снижения счётной концентрации ядер конденсации в период ограничительных мер из-за COVID-19 в Москве в 2020 году. Смоделированная суммарная радиация у земной поверхности в условиях сплошной облачности показывает квазилинейный рост порядка 10% на каждые 50 см<sup>-3</sup> уменьшения счётной концентрации ядер конденсации в модели.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждается тестированием моделей, проведённым с использованием высококачественных данных наблюдений, в том числе регулярных измерений облачных характеристик сети CLOUDNET и радиационных потоков сети BSRN; публикациями в рецензируемых научных изданиях; докладами по результатам диссертационной работы, представленными на международных и всероссийских конференциях, семинарах и симпозиумах.

### **Апробация результатов**

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях, симпозиумах и семинарах: на международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» в 2018 году (Томск, Россия), 2019 году (Новосибирск, Россия), 2020 году (онлайн конференция) и 2021 году (Москва, Россия); на конференциях «Аэрозоли Сибири» в 2019 и 2023 годах (Томск, Россия); на международных конференциях AeroCom/AeroSAT в 2021 и 2023 годах (онлайн конференции); на международных конференциях ICCARUS в 2020-2022 гг. (онлайн конференции); на ежегодных рабочих группах международного консорциума COSMO в 2018-2021 гг.; на международных конференциях и школах для молодых учёных по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS в 2022 году (Томск, Россия) и CITES в 2023 году (Москва, Россия); международном симпозиуме «International Radiation Symposium» в 2022 году (Салоники, Греция); на международном симпозиуме по атмосферной радиации и динамике (МСАРД) в 2023 году (Санкт-Петербург, Россия).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 32 работы, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК), 1 глава в монографии, 18 публикаций в материалах международных конференций. Получено 1 свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

Представленные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве с доктором географических наук, профессором Натальей Евгеньевной Чубаровой и кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Шатуновой Мариной Владимировной. Изменения программного кода и настройка модели ICON с радиационной схемой esRad выполнены автором лично. Автором разработана программа по расчёту концентрации облачных капель на основе данных спектрорадиометра MODIS с шагом сетки 1 км (Свидетельство Роспатента № 2021618039). Все численные эксперименты выполнены автором. Автор принимал непосредственное участие в написании статей и в представлении научных докладов, в том числе в качестве докладчика.

### **Структура и объём диссертации**

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, словаря терминов, списка литературы из 293 наименований и приложения. Общий объём диссертации содержит 156 страниц, включая 27 таблиц и 38 рисунков.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.г.н. проф. Наталье Евгеньевне Чубаровой за постановку задачи, всестороннюю поддержку на пути исследования и в работе над диссертацией. Автор выражает благодарность сотрудникам Гидрометцентра России: к.ф.-м.н. Марине Владимировне Шатуновой, н.с. Денису Викторовичу Блинову, к.г.н. Александру Андреевичу Кирсанову, д.ф.-м.н. Гдалию Симоновичу Ривину, к.ф.-м.н. Инне Адольфовне Розинкиной, д.ф.-м.н. Анне Рудольфовне Ивановой за конструктивные замечания по теме диссертационной работы. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова за ценные замечания и обсуждение результатов работы. Автор благодарит своего супруга Сергея, родителей Олега Михайловича и Елену Юрьевну, сестру Лидию за всестороннюю поддержку.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** представлена актуальность исследования, определены цели и задачи диссертационной работы, её научная новизна, научная и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В **Главе 1** приведены основные характеристики облачности в моделях ЧПП, представлены разновидности схем и параметризаций, использующихся в ЧПП для описания облаков. В **разделе 1.1** кратко приведена структура интегральных микрофизических схем моделей ЧПП [Довгалюк и др., 2013; Khain et al., 2015], в том числе представлены схемы нуклеации облачных капель и кристаллов различной степени сложности (с учётом содержания

атмосферного аэрозоля разных типов и без его учёта), определены основополагающие микрофизические процессы в капельной облачности [Kessler E., 1969]. В разделе описан принцип работы схем корректировки насыщения [Soong and Ogura, 1973], которые являются основным регулирующим механизмом для процессов в интегральных микрофизических схемах. **Раздел 1.2** посвящён описанию схем радиационного переноса и характеристик облачности, необходимых для численного прогноза радиационных потоков в атмосфере – эффективному радиусу облачных капель, оптической толщине облаков и баллу облаков. В разделе приведены наиболее распространённые параметризации облачного покрова, радиационных характеристик кристаллической и капельной облачности. В **разделе 1.3** дано определение не прямых эффектов аэрозоля. Первый не прямой эффект аэрозоля заключается в том, что при неизменном водосодержании облаков увеличение счётной концентрации ядер конденсации приводит к росту счётной концентрации облачных капель, снижению размера капель и росту оптической толщины облаков [Twomey S., 1977]. Таким образом, в Главе 1 описано современное состояние численного моделирования облачности, облачно-радиационных и облачно-аэрозольных процессов.

В **Главе 2** кратко описаны модели численного прогноза погоды COSMO и ICON, на базе которых в Гидрометцентре России реализована оперативная система ЧПП COSMO-Ru [Ривин и др., 2019]. Данные модели во многом имеют один физический базис. ICON является технологическим продолжением развития модели COSMO [Doms et al., 2021; Prill et al., 2023], именно поэтому в данной работе модели рассматриваются вместе. В COSMO и ICON используется одна микрофизическая схема, а значит, схему можно исследовать в обеих моделях совместно. В то же время схемы радиационного переноса в COSMO и ICON различны, поэтому влияние смоделированных облачных характеристик на прогноз солнечной радиации разное.

**Раздел 2.1** посвящён описанию основных параметров негидростатической модели атмосферы COSMO – система координат, параметры сетки, физические параметризации подсеточных процессов. В разделе представлена схема нуклеации облачных капель, основанная на численных экспериментах со спектральной микрофизической моделью [Segal and Khain, 2006]. Процессы облачно-радиационного взаимодействия в модели COSMO могут быть описаны оперативной схемой [Slingo and Schrecher, 1982] или схемой CLOUDRAD [Muskatel et al., 2021], которая способна учитывать облачно-аэрозольные связи. В **разделе 2.2** описаны характеристики негидростатической модели атмосферы ICON и схема радиационного переноса esRad [Hogan and Bozzo, 2016]. В **разделе 2.3** приведены основные модификации кода ICON, которые были сделаны автором в ходе исследования микрофизической и радиационной схем модели. В рамках исследования было необходимо дополнить структуру обмена данными модели ICON с радиационной схемой esRad, которая встроена в виде библиотеки; настроить выдачу внутренних переменных esRad; модифицировать схему нуклеации облачных капель.

В схему нуклеации облачных капель модели ICON автором внедрена параметризация вертикальной скорости ( $W_{\text{хар}}$ ) на основе характеристического метода [Lohmann et al., 2007], учитывающего прогностические (сеточные) и подсеточные процессы:

$$W_{\text{хар}} = W_{\text{п}} + 1,33\sqrt{TKE}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{п}}$  – прогностическая вертикальная скорость, TKE – турбулентная кинетическая энергия.

Подсеточная составляющая позволяет в процессе нуклеации облачных капель учесть динамические процессы, не разрешимые на километровых шагах сетки моделей ЧПП. Данная схема была выбрана среди схем характеристического [Meskhidze et al., 2007; Bangert et al., 2011], вероятностного [Wang and Penner, 2009] и статистического [Malavelle et al., 2014] методов по нескольким причинам. Во-первых, характеристический метод является наиболее вычислительно эффективным [Malavelle et al., 2014]. Во-вторых, при описании подсеточных турбулентных процессов модели ICON замыкание уравнений базируется на турбулентной кинетической энергии [Raschendorfer M., 2001; Baldauf et al., 2011].

В разделе 2.4 представлена структура численных экспериментов (ЧЭ) и описаны данные измерений с учётом инструментальных ограничений наземных и спутниковых приборов. В Таблице 1 приведены задачи и основные параметры ЧЭ.

**Таблица 1** – Задачи численных экспериментов (ЧЭ) моделей COSMO и ICON

Регион	Основные характеристики*	Задача
Центральная Европа	№1 (COSMO, 2,2 км, март-октябрь 2016 г., 234 дня, 24 ч) №2 (COSMO, 2,2 км, март-октябрь 2018 г., 27 дней, 3 ч) №6 (ICON, 1,1 км, март-октябрь 2021 г., 32 дня, 36 ч) №7 (ICON, 1,1 км, 19 сентября 2021 года, 36 ч)	Исследование микрофизической и радиационной схем моделей с использованием наземных и спутниковых измерений
	№ 8 (ICON, 1,1 км, март-октябрь 2021 г., 10 дней, 72 ч)	Тестирование отклика облачных характеристик к внедрённой параметризации вертикальной скорости
Центральный федеральный округ РФ	№3 (COSMO, 2,2 км, апрель-октябрь 2018 г., 18 дней, 3 ч) №4 (COSMO, 2,2 км, апрель-октябрь 2018 г., 214 дней, 18 ч)	Тестирование отклика солнечной радиации и температуры воздуха на 2 м к схеме, учитывающей облачно-аэрозольное взаимодействие
	№5 (COSMO, 1,1 км, апрель-май 2018-2020 г., 4 дня, 24 ч)	Воспроизведение в модели COSMO первого непрямого эффекта аэрозоля относительно данных измерений над Москвой
*Примечание: указаны как №ЧЭ (модель, шаг сетки, рассматриваемый период, число дней, заблаговременность в часах)		

Численные эксперименты ограничены тёплым периодом, чтобы избежать погрешностей измерений, связанных с неопределённостью пространственного альбедо поверхности при наличии снега. Проводились как эксперименты для всего тёплого периода, так и для отобранных

дней с оптически плотной облачностью (по данным измерений прямой радиации) при сплошном облачном покрове в часы с высотой Солнца более  $15^\circ$ , без осадков более 0,5 мм за сутки (за исключением ЧЭ №8). Условия сплошной облачности способствуют снижению вклада прямой радиации в суммарную радиацию, что позволяет оценить влияние облачных характеристик и облачно-аэрозольных эффектов на суммарную радиацию у земной поверхности, снизив влияние шума из-за пространственной неоднородности облаков. Проведены ЧЭ в рамках краткосрочного прогноза (заблаговременности от 18 ч до 72 ч), а также ЧЭ с заблаговременностью до 3 часов, чтобы оценить влияние схем расчёта оптической толщины облаков на суммарную радиацию, снизив влияние адвективных процессов на результаты. В анализе численных экспериментов с данными стационарных измерений применён метод ближайших соседей [Fix and Hodges, 1951]. Доверительные интервалы получены в предположении нормального распределения ошибок прогноза при уровне значимости 0,05.

В исследовании были использованы наблюдения за облачными характеристиками наземной сети CLOUDNET [Illingworth et al., 2007] в Линденберге, Мюнхене и Юлихе; спутниковые измерения спектрорадиометра MODIS и системы CERES [Platnick et al., 2016; Kratz et al., 2020]; наблюдения за солнечной радиацией у земной поверхности в Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова (МО МГУ) [<https://momsu.ru>] в Москве и наземной сети BSRN [McArthur L.J.B, 2005] в Линденберге. Численные эксперименты проводились для двух регионов: Центральной Европы и Центрального федерального округа РФ (ЦФО). Выбор Центральной Европы обуславливается возможностью использования радиолокационных измерений облачных характеристик сети CLOUDNET (длина волны 8,5 мм), радиационных измерений BSRN и спутниковых данных для исследования схем и параметризаций облачности. ЦФО является регионом оперативного численного прогноза погоды Гидрометцентра РФ, поэтому для ЦФО стояла задача оптимальной настройки схемы радиационного переноса модели COSMO с учётом процессов облачно-аэрозольного взаимодействия.

В разделе 2.5 описана методика исследования первого непрямого эффекта аэрозоля весной 2020 года в Москве по данным наблюдений. Весна 2020 года в Москве отличалась значительным снижением антропогенной активности из-за введения локдауна при SARS-CoV-2 [Кульбачевский и др., 2021]. Исследование основано на сопоставлении облачно-аэрозольных эффектов по данным измерений и численных экспериментов весной 2020 года по сравнению с тем же периодом в 2018-2019 годах. На основе измерений MODIS с пространственным разрешением 1 км восстановлены счётные концентрации облачных капель ( $N_{OK}$ ,  $см^{-3}$ ) над регионом согласно двум методам – уравнение 2 [Quaas et al., 2006] и уравнение 3 [McComiskey et al., 2009]:

$$N_{OK} = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{OTO}_k^{0,5} R_{\text{эфф}}^{-2,5}, \quad (2)$$

$$N_{OK} = 157,216 \cdot 10^{-6} \text{OTO}_k^3 \text{LWP}^{-2,5}, \quad (3)$$

где  $\text{OTO}_k$  – оптическая толщина капельных облаков,  $R_{\text{эфф}}$  – эффективный радиус облачных капель [м],  $\text{LWP}$  – водосодержание облаков [кг/м<sup>2</sup>]. В разделе приведены ограничения методов и спутниковых данных при расчёте  $N_{OK}$ . В частности, методы применимы в приближении адиабатической модели облака, в которой восстанавливаемая счётная концентрация облачных капель соответствует нижней границе облака [Brenguier et al., 2000]. Предполагается, что  $N_{OK}$  можно считать равной счётной концентрации ядер конденсации ( $N_{ЯК}$ ) на нижней границе облака. В разделе описана методика нахождения первого непрямого эффекта по данным наблюдений в Москве. Основываясь на метеорологическом анализе из работы [Chubarova et al., 2021], рассмотрены случаи адвекции воздуха на Москву с севера, чтобы снизить влияние природной изменчивости аэрозоля на результаты. На основе случаев адвекции с севера дополнительно были отобраны 4 дня для численных экспериментов с моделью COSMO. При отборе дней для численных экспериментов проанализированы базы данных выбросов ЕМЕР [<https://www.ceip.at/>], TNO-МАСС II [<https://eccad.aeris-data.fr/>] и обратные траектории переноса примесей модели HYSPLIT [<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>] на предмет отсутствия крупных промышленных пунктов по пути адвекции воздуха, а также стационарные гидрометеорологические наблюдения на предмет отсутствия осадков в Москве. Медианы восстановленных счётных концентраций облачных капель над Москвой и близлежащими регионами составили 100-350 см<sup>-3</sup> в апреле и мае 2018-2020 гг. При этом для случаев адвекции с севера в 2020 году отмечается снижение  $N_{OK}$  в среднем на 40-50 см<sup>-3</sup> (14-16%) по сравнению с 2018-2019 гг., а для случаев численных экспериментов – на 80-110 см<sup>-3</sup>.

**Глава 3** посвящена результатам исследования облачных характеристик в микрофизических схемах моделей ICON и COSMO. В **разделе 3.1** рассмотрено водосодержание облаков. Показано, что в обеих моделях низкие значения водосодержания (~ до 100 г/м<sup>2</sup>) в среднем выше измеренных, в то время как высокие значения (~ от 100 г/м<sup>2</sup>) – ниже измеренных [Chubarova et al., 2018a]. В целом, для COSMO и ICON прослеживается общая тенденция занижения водосодержания по сравнению с наземными измерениями CLOUDNET (Таблица 2).

Тенденция выражена как при использовании одномоментной микрофизической схемы, так и двухмоментной схемы, результаты по которой определяются, в том числе, заданной счётной концентрацией ядер конденсации. В **разделе 3.2** представлены результаты исследования водности и лёдности облаков с целью выявить причину наблюдающегося занижения водосодержания. В модели ICON лёдность облаков ниже измеренной на станциях сети CLOUDNET в Линденберге, Мюнхене и Юлихе. При этом повторяемость появления смоделированной лёдности в верхней тропосфере выше по сравнению с наблюдаемой

CLOUDNET. Данная тенденция обнаружена и в модели COSMO по сравнению с измерениями CLOUDNET в Линденберге [Chubarova et al., 2018a; Шатунова и др., 2019]. Повторяемость появления кристаллической облачности напрямую зависит от применяемых параметризаций процессов гомогенной и гетерогенной нуклеации кристаллов [Khain and Pinsky, 2018], природные механизмы которых ещё недостаточно изучены [Hoose and Moehler, 2012]. Подробный анализ оснований для низкой лёдности облаков в моделях по ряду причин не может быть проведён в полной мере. Во-первых, отсутствуют данные измерений счётной концентрации облачных кристаллов. Во-вторых, отсутствуют данные по химическому составу аэрозоля, необходимые для анализа механизма нуклеации облачных кристаллов [Vali et al., 2015].

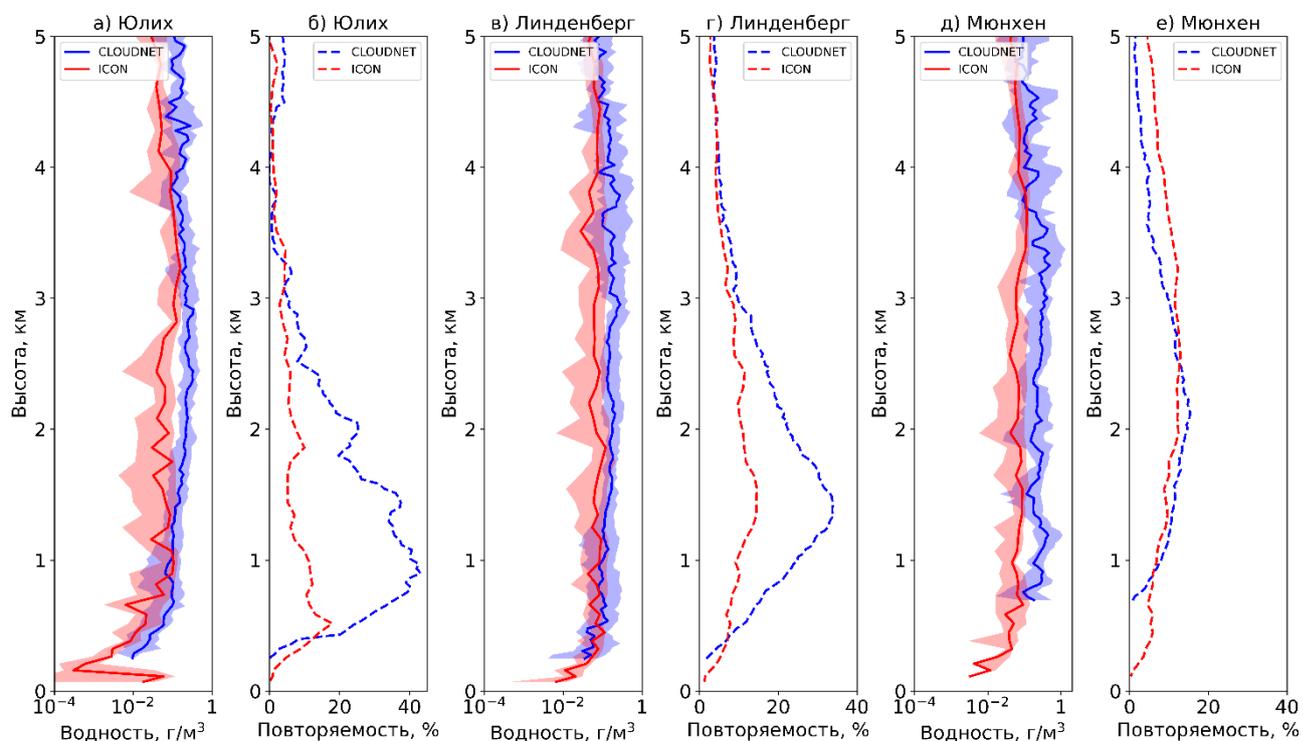
**Таблица 2** – Медиана, межквартильный диапазон и среднее арифметическое (показаны через косую черту) водосодержания облаков [г/м<sup>2</sup>] по данным COSMO (ЧЭ №1), ICON (ЧЭ №6) и измерений CLOUDNET; выборка из среднечасовых значений

Источник	Линденберг	Мюнхен	Юлих	Все
CLOUDNET	96/100/128	-	-	-
COSMO, 1M	54/84/98	-	-	-
Число случаев	1538	-	-	-
CLOUDNET	89/112/127	118/202/215	106/152/151	102/139/147
ICON, 2M	53/67/69	93/81/112	53/157/108	61/85/88
Число случаев	201	53	121	375
<i>Примечание: 1M – одномоментная микрофизическая схема, 2M – двухмоментная схема</i>				

Водность облаков по данным ICON ниже измеренной на всех рассматриваемых станциях, а повторяемость появления смоделированной водности ниже измеренной в Линденберге и Юлихе (Рисунок 1). Лучшее соответствие повторяемости водности в ICON над Мюнхеном может быть связано с более успешным прогнозом подынверсионных облаков моделью.

Низкая водность и лёдность облаков в моделях может быть связана с ошибками прогноза влагосодержания атмосферы (**Раздел 3.3**). Однако анализ показал хорошее качество прогноза влагосодержания атмосферы в модели COSMO согласно результатам ЧЭ №1 и №2. Средняя арифметическая ошибка прогноза влагосодержания атмосферы в модели составляет всего  $+3 \pm 1\%$  [Chubarova et al., 2018a; Khlestova et al., 2020] по сравнению с наблюдениями сети CLOUDNET в Линденберге и Юлихе. Как показано в работах [Steinke et al., 2015; Kinzler et al., 2023], в модели ICON влагосодержание атмосферы также прогнозируется с хорошей точностью. В разделе получено, что в прогнозе абсолютной влажности воздуха отмечается хорошее согласие данных CLOUDNET и COSMO в нижней тропосфере, в то время как в средней и верхней тропосфере прослеживается более высокая абсолютная влажность в COSMO по сравнению с наблюдениями.

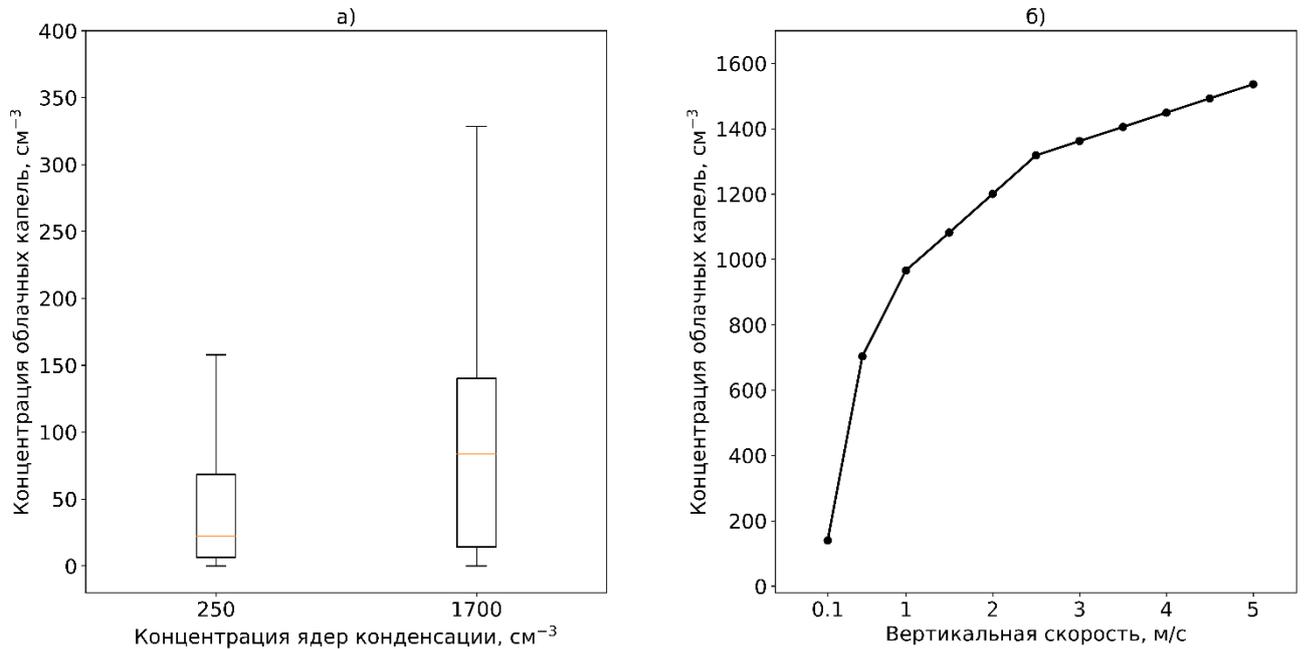
Это связано, в первую очередь, с ростом инструментальной неопределённости измерений абсолютной влажности с увеличением высоты. В **Разделе 3.4** на основе данных CLOUDNET и гидрометеорологических наблюдений за осадками показано, что процессы автоконверсии и аккреции, регулирующие образование и рост дождевых капель, не являются основными причинами ошибки прогноза водосодержания облаков. В **разделе 3.5** приведены результаты исследования двухмоментной микрофизической схемы. Получено, что занижение водосодержания облаков может быть связано со сниженной интенсивностью нуклеации облачных капель и работой схемы корректировки насыщения. Детальная оценка роли подхода с корректировкой насыщения в микрофизической схеме возможна лишь в случае использования спектральной микрофизической схемы, так как в ней величина насыщения атмосферы водяным паром является прогностической величиной [Khain and Pinsky, 2018].



**Рисунок 1** – Медианы (линией) и межквартильный диапазон (заливкой) влажности облаков (а, в, д) и повторяемость появления влажности (б, г, е) по данным ICON (ЧЭ №6) и наблюдений CLOUDNET в Линденберге, Мюнхене и Юлихе; выборка из среднечасовых значений

Схема нуклеации облачных капель была исследована в работе. На основе измерений MODIS с пространственным разрешением 1 км восстановлены счётные концентрации облачных капель над регионом исследования согласно двум методам (Уравнения 2-3).  $N_{OK}$  в среднем составили  $229 \pm 17 \text{ см}^{-3}$ , что соответствует другим исследованиям для рассматриваемого региона [Li et al., 2018; Fanourgakis et al., 2019]. Это значение также близко к  $N_{JK}$ , заданной в ICON по

умолчанию –  $250 \text{ см}^{-3}$ . На рисунке 2а показано, что с увеличением  $N_{\text{ЯК}}$  в модели ICON от  $250 \text{ см}^{-3}$  до  $1700 \text{ см}^{-3}$  счётная концентрация облачных капель увеличилась в среднем на  $94 \pm 20 \text{ см}^{-3}$  (65%).

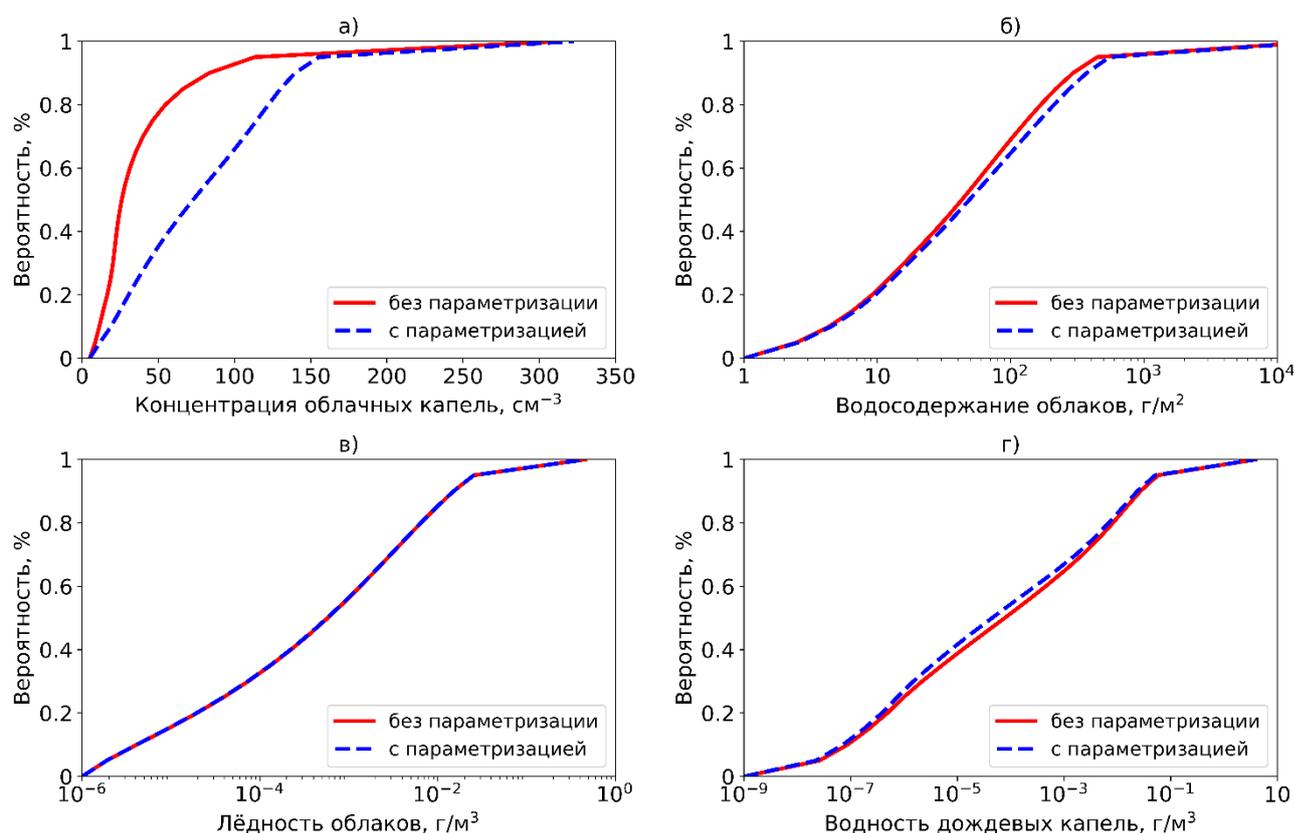


**Рисунок 2** – а) Диаграмма размаха смоделированных ICON (ЧЭ №7) счётных концентраций облачных капель с заданными счётными концентрациями ядер конденсации  $250 \text{ см}^{-3}$  и  $1700 \text{ см}^{-3}$ , результаты для точек CLOUDNET; б) зависимость счётной концентрации облачных капель от вертикальной скорости в схеме нуклеации облачных капель модели ICON при счётной концентрации ядер конденсации  $1700 \text{ см}^{-3}$  [Segal and Khain, 2006]

Это способствовало росту водосодержания облаков в среднем на  $118 \pm 2 \text{ г/м}^2$  (40%). Однако  $N_{\text{ОК}}$  в модели ICON ниже относительно восстановленных по MODIS значений  $N_{\text{ОК}}$  даже в том случае, когда в ICON задана высокая счётная концентрация ядер конденсации  $1700 \text{ см}^{-3}$ , соответствующая континентальной загрязнённой аэрозолем облачности [Segal and Khain, 2006]. Одной из причин низкой  $N_{\text{ОК}}$  даже при высокой заданной  $N_{\text{ЯК}}$  может быть недостаточная вертикальная скорость в схеме нуклеации облачных капель. На рисунке 2б показана зависимость счётной концентрации облачных капель от вертикальной скорости в схеме нуклеации облачных капель при  $N_{\text{ЯК}} 1700 \text{ см}^{-3}$ . Для значений вертикальной скорости в интервале (0;0,1) м/с она устанавливается равной 0,1 м/с. При низкой вертикальной скорости для нуклеации может быть доступно менее половины ядер конденсации. Так в численных экспериментах максимальное значение смоделированной ICON прогностической вертикальной скорости в облачных условиях в точках сети CLOUDNET составило 0,9 м/с. Значит,  $N_{\text{ЯК}}$  в модели фактически не превышала  $900 \text{ см}^{-3}$  при заданных  $1700 \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, в разделе показано, что учёт только прогностической вертикальной скорости при реализации схемы нуклеации облачных капель в двухмоментной микрофизической схеме модели ICON снижает влияние задаваемой счётной концентрации ядер

конденсации на водосодержание облаков. Схемы нуклеации облачных капель относятся к микрофизическим блокам моделей, формирующих прогностическую (сеточную) облачность. Однако учёт подсеточной компоненты вертикальной скорости в них необходим из-за уровня детализации схем нуклеации капель.

В разделе 3.6 описаны возможности и ограничения использования измерений вертикальной скорости в исследовании. В разделе 3.7 приведены результаты внедрения параметризации вертикальной скорости в схему нуклеации облачных капель модели ICON (Уравнение 1). Применение параметризации привело к росту счётной концентрации облачных капель (Рисунок 3а) в модели в среднем на  $39 \text{ см}^{-3}$  (49%). Это отражается на кумулятивном распределении вероятности водосодержания облаков (Рисунок 3б) – водосодержание увеличивается в среднем на  $23 \text{ г/м}^2$  (20%). При этом значимого эффекта на лёдность облаков не наблюдается (Рисунок 3в). Прослеживается тенденция на снижение водности дождевых капель (Рисунок 3г).



**Рисунок 3** – Кумулятивное распределение вероятности счётной концентрации облачных капель (а), водосодержания облаков (б), лёдности облаков (в) и водности дождевых капель (г) по результатам модели ICON для всей области моделирования (ЧЭ №8)

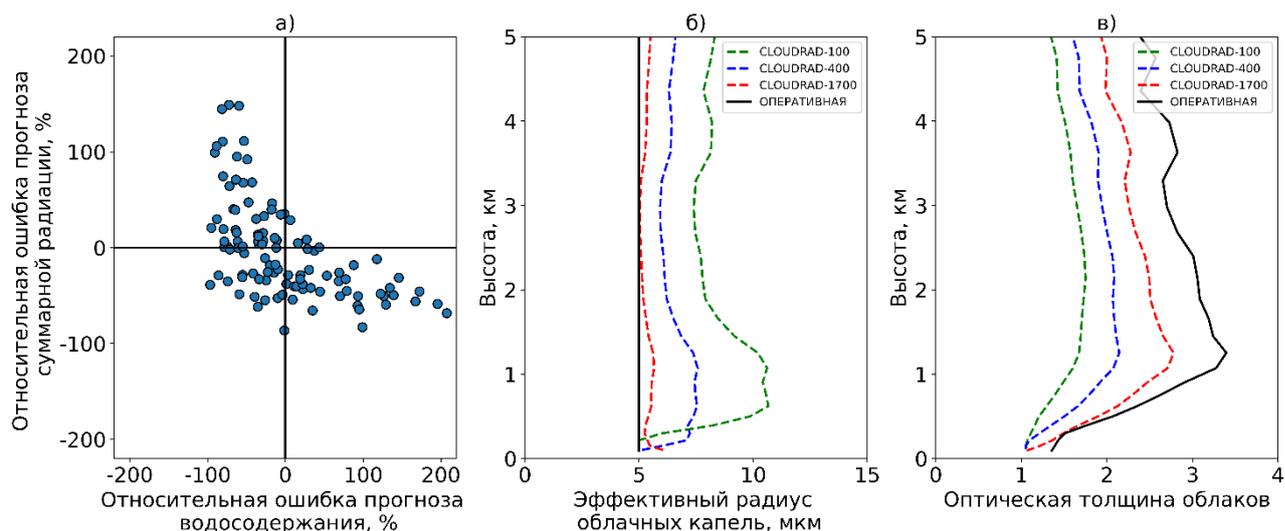
Внедрение параметризации вертикальной скорости способствует снижению ошибки прогноза водосодержания облаков. Эффект выражен в снижении ошибки прогноза медианы

водосодержания на 10% по сравнению с измерениями CLOUDNET в Юлихе и на 17% – в Линденберге. Верификация 6-часовых сумм осадков согласно [Киктев и др., 2021] показала небольшое ухудшение качества прогноза осадков при использовании параметризации. Индекс оценки угроз (TS) снижается в среднем на 0,01, а индекс смещения частоты (FBI) – на 0,2.

Исследование схемы нуклеации облачных капель выявило важные особенности схемы:

1. счётная концентрация ядер конденсации  $250 \text{ см}^{-3}$ , заданная в модели ICON по умолчанию, не является основным ограничивающим фактором роста водосодержания облаков и счётной концентрации облачных капель в модели;
2. прогностическая вертикальная скорость в схеме нуклеации облачных капель является фактором, ограничивающим нуклеацию, что приводит к низкой счётной концентрации облачных капель в модели.

Облачные характеристики, рассчитываемые в микрофизических схемах моделей ICON и COSMO, используются при расчёте радиационных потоков в схемах радиационного переноса моделей. В **Главе 4** приведены основные результаты исследования схем радиационного переноса с учётом влияния процессов облачно-аэрозольного взаимодействия. Исследование проведено для модели COSMO с оперативной схемой облачно-радиационного взаимодействия и схемой CLOUDRAD [Muskatel et al., 2021], а в модели ICON – со схемой ecRad. В **разделе 4.1** показано, что в COSMO наблюдается гиперкомпенсация низкого водосодержания облаков (см. Главу 3) за счёт неточностей радиационной схемы. В результате суммарная радиация в COSMO в среднем на  $14 \pm 3 \text{ Вт/м}^2$  (7%) ниже измеренной суммарной радиации на станции сети BSRN в Линденберге. На Рисунке 4а показана нелинейная зависимость относительной ошибки прогноза суммарной радиации у земной поверхности от относительной ошибки прогноза водосодержания облаков в условиях сплошной облачности по данным COSMO и наблюдений в Линденберге при высоте Солнца более  $35^\circ$ . В работе [Chubarova et al., 2018b] для безоблачных условий получено завышение моделью суммарной радиации на 5%. В разделе показано, что в условиях сплошной облачности, когда ошибка прогноза водосодержания не превышает 15% по модулю, суммарная радиация в COSMO ниже наблюдаемой в среднем на 30% [Chubarova et al., 2018a]. Это может быть связано с несколькими факторами, в том числе – с предположением сферичности облачных кристаллов в оперативной схеме облачно-радиационного взаимодействия [Slingo and Schrecher, 1982], предположением постоянного эффективного радиуса облачных капель и кристаллов (5 и 10 мкм соответственно).

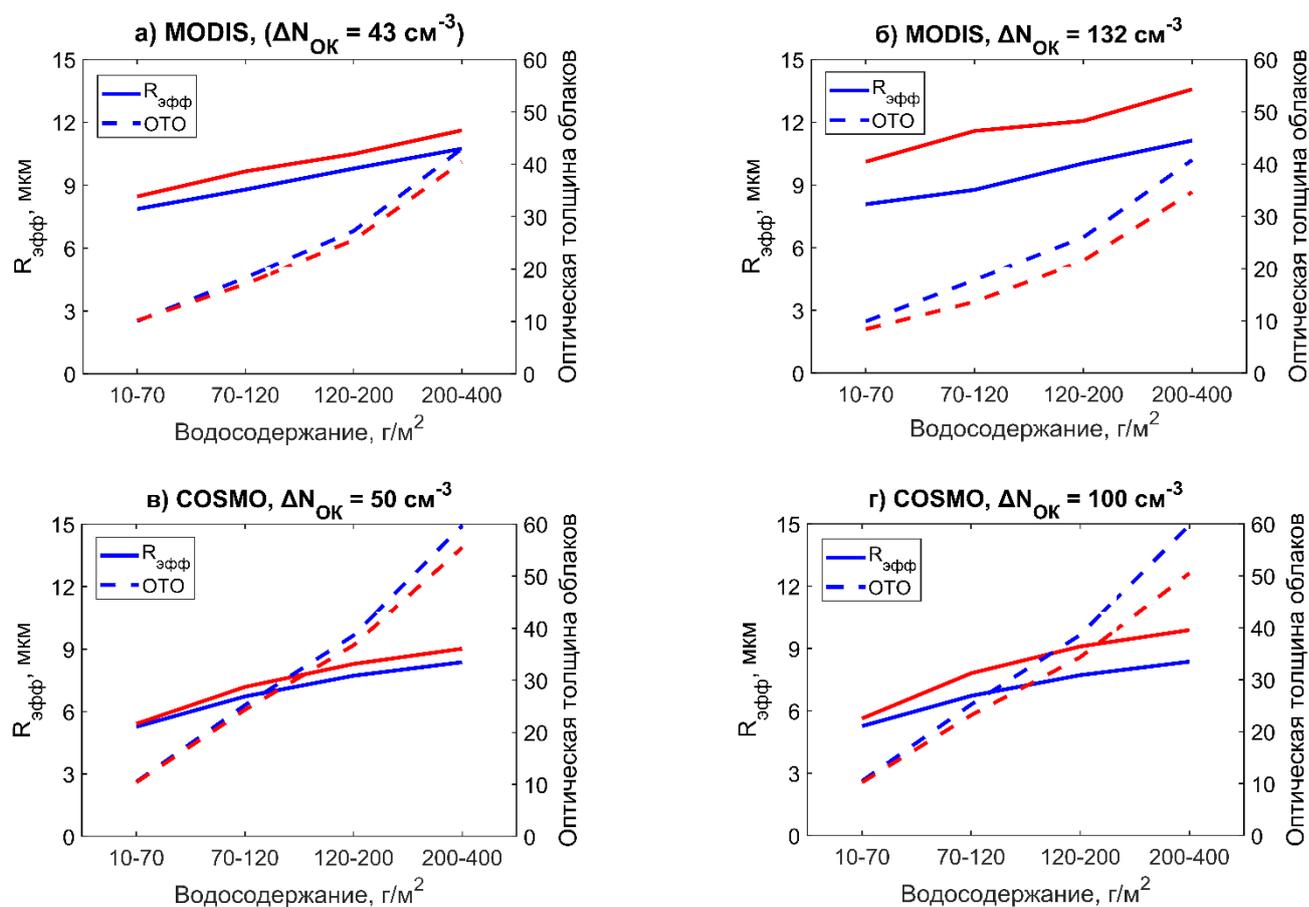


**Рисунок 4** – а) Относительные ошибки прогноза водосодержания облаков (по горизонтали) и суммарной радиации у земной поверхности (по вертикали) в условиях сплошной облачности при высоте Солнца от  $35^\circ$  по данным модели COSMO (ЧЭ №1) с оперативной облачно-радиационной схемой, данным измерений CLOUDNET и BSRN в Линденберге; б-в) среднее арифметическое: (б) эффективного радиуса облачных капель и (в) оптической толщины капельных облаков по результатам COSMO с оперативной облачно-радиационной схемой и CLOUDRAD со счётными концентрациями ядер конденсации  $100$ ,  $400$  и  $1700 \text{ см}^{-3}$  (ЧЭ №3)

Схема облачно-радиационного взаимодействия CLOUDRAD является удобным инструментом для учёта в модели первого непрямого эффекта аэрозоля [Muskatel et al., 2021]. CLOUDRAD позволяет учитывать изменчивость эффективного радиуса облачных капель с помощью счётной концентрации облачных капель, а  $N_{OK}$  рассчитывается по схеме Сигала-Хаина [Segal and Khain, 2006]. На примере локдауна в Москве весной 2020 года (см. Раздел 2.5) показано, как с помощью схемы CLOUDRAD в модели COSMO воспроизводится первый не прямой эффект аэрозоля [Shuvalova et al., 2022]. В схеме CLOUDRAD  $N_{OK}$  приравнивается заданной  $N_{ЯК}$ .  $N_{ЯК}$  была задана в модели COSMO на основе пространственно осреднённых рассчитанных значений в интервале от  $100 \text{ см}^{-3}$  до  $300 \text{ см}^{-3}$  с шагом  $50 \text{ см}^{-3}$  (см. Раздел 2.5). На рисунке 5 показан наблюдаемый по данным MODIS и смоделированный COSMO первый не прямой эффект аэрозоля для всех случаев адвекции воздуха на территорию ЦФО с севера (а) и отдельно для 4 дней, отобранных для численных экспериментов (б-г).

Согласно данным MODIS (Таблица 3) в ситуациях адвекции воздуха на Москву с севера в 2020 году  $N_{OK}$  снизилась в среднем на  $12 \pm 7\%$  относительно величин, наблюдающихся в аналогичный период 2018-2019 гг. Это привело к росту эффективного радиуса облачных капель на  $8 \pm 1\%$  и снижению оптической толщины облаков на  $5 \pm 2\%$ . Для случаев, отобранных для численных экспериментов, первый не прямой эффект по данным MODIS выражен сильнее:

оптическая толщина облаков уменьшается на  $18 \pm 4\%$ , а эффективный радиус облачных капель увеличивается на  $25 \pm 5\%$  за счёт снижения  $N_{OK}$  на  $45 \pm 9\%$ . В COSMO первый не прямой эффект был воспроизведён благодаря схеме CLOUDRAD (Таблица 2), однако он слабее выражен по сравнению с наблюдениями. Это связано как с постановкой численных экспериментов, где счётная концентрация ядер конденсации задавалась постоянной по пространству и времени, так и с занижением водосодержания облаков в COSMO. Суммарная радиация в COSMO в условиях сплошной облачности показывает квазилинейную зависимость от счётной концентрации ядер конденсации, в среднем снижаясь на  $8 \text{ Вт/м}^2$  (10%) на каждые  $50 \text{ см}^{-3}$  роста  $N_{ЯК}$ .



**Рисунок 5** – Первый не прямой эффект аэрозоля на эффективный радиус облачных капель ( $R_{эфф}$ ) и оптическую толщину облаков (ОТО) по данным измерений MODIS (а, б) и численных экспериментов COSMO (в, г) для случаев адвекции воздуха с севера (а) и случаев численных экспериментов (б-г) в 2018-2019 гг. (синие линии) и 2020 году (красные линии), приведены осреднённые значения в различных интервалах водосодержания (ЧЭ №5)

Обнаруженный первый не прямой эффект аэрозоля соответствует другим исследованиям [Christensen et al., 2020; Liu et al., 2018]. Однако эффект меньше полученного в работах [Chubarova et al., 2021; Gubanova et al., 2020] 30-40% снижения содержания приземных взвешенных частиц в атмосфере размером менее 10 мкм для периода локдауна в Москве. Это

может быть связано с тем фактом, что в период локдауна изменению подлежали антропогенные источники выбросов, находящиеся в приземном слое. В таком случае, снижение  $N_{\text{ЯК}}$  на уровне нижней границы облака могло быть меньше, так как оно во многом зависит от характеристик планетарного пограничного слоя [Su et al., 2020]. Однако в отсутствие регулярных детальных наблюдений за пограничным слоем и вертикальным профилем аэрозоля в Москве это предположение не может быть подтверждено.

**Таблица 3** – Измеренный MODIS и смоделированный COSMO (ЧЭ №5) первый не прямой эффект аэрозоля над Москвой в апреле-мае 2020 года относительно апреля-мая 2018-2019 гг.

Данные	Выборка	$\Delta N_{\text{ОК}}$ , $\text{см}^{-3}$	$\Delta R_{\text{эфф}}$ , мкм	$\Delta \text{ОТО}$	Число точек
MODIS	ССА	$-43 \pm 28$ ( $-12 \pm 7\%$ )	$0,8 \pm 0,1$ ( $8 \pm 1\%$ )	$-1,3 \pm 1,0$ ( $-5 \pm 2\%$ )	84866
	СЧЭ	$-132 \pm 42$ ( $-45 \pm 9\%$ )	$2,3 \pm 0,4$ ( $25 \pm 5\%$ )	$-4,0 \pm 1,9$ ( $18 \pm 4\%$ )	15068
COSMO	СЧЭ	-50	$0,5 \pm 0,2$ ( $6 \pm 2\%$ )	$-1,8 \pm 1,7$ ( $-4 \pm 2\%$ )	2668076
	СЧЭ	-100	$1,1 \pm 0,5$ ( $15 \pm 5\%$ )	$-4,0 \pm 3,7$ ( $-9 \pm 5\%$ )	2684304

*Примечание: ССА – случаи адвекции с севера, СЧЭ – случаи для численных экспериментов,  $N_{\text{ОК}}$  – счётная концентрация облачных капель,  $R_{\text{эфф}}$  – эффективный радиус облачных капель, ОТО – оптическая толщина облаков*

Учитывая значимость полученных облачно-аэрозольных эффектов схемы CLOUDRAD на суммарную радиацию у земной поверхности на примере Москвы, была проведена настройка схемы радиационного переноса модели COSMO над ЦФО с учётом процессов облачно-аэрозольного взаимодействия. Следуя работе [Segal and Khain, 2006], численные эксперименты со схемой CLOUDRAD были проведены при  $N_{\text{ЯК}}$  100, 400 и  $1700 \text{ см}^{-3}$ . При использовании CLOUDRAD оптическая толщина капельных облаков в среднем уменьшается на 15% при  $N_{\text{ЯК}}$   $1700 \text{ см}^{-3}$  и на 41% при  $N_{\text{ЯК}}$   $100 \text{ см}^{-3}$  (Рисунок 4б) по сравнению с результатами оперативной схемы. Это обусловлено увеличением эффективного радиуса облачных капель в среднем на 63% при  $N_{\text{ЯК}}$   $100 \text{ см}^{-3}$  и на 7% при  $N_{\text{ЯК}}$   $1700 \text{ см}^{-3}$  (Рисунок 4в). Погрешность расчётов COSMO при моделировании суммарной радиации у земной поверхности с оперативной схемой составляет в среднем  $-36 \pm 14\%$  по сравнению с измерениями в Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. При использовании схемы CLOUDRAD погрешность снижается и составляет  $-19 \pm 12\%$  с  $N_{\text{ЯК}}$   $100 \text{ см}^{-3}$ ,  $-5 \pm 12\%$  с  $N_{\text{ЯК}}$   $400 \text{ см}^{-3}$  и  $-14 \pm 13\%$  с  $N_{\text{ЯК}}$   $1700 \text{ см}^{-3}$ .

На основе численных экспериментов с моделью COSMO за тёплый период 2018 года показано, что имеются значимые изменения в температуре воздуха на уровне 2 м в дневные часы, когда солнечная радиация вносит существенный вклад в тепловой баланс атмосферы. Смоделированные суммарная радиация и температура воздуха на уровне 2 м были проанализированы за период с июня по октябрь 2018 года. Суммарная радиация увеличивается в

среднем на  $14\pm 1\%$  при использовании схемы CLOUDRAD с  $N_{\text{ЯК}} 400 \text{ см}^{-3}$  по сравнению с результатами оперативной схемы. Это приводит к уменьшению средней абсолютной ошибки прогноза температуры воздуха на уровне 2 м в период с 9 до 18 ч местного времени (Таблица 4). В рассматриваемый период наблюдается снижение средней абсолютной ошибки прогноза на  $0,2-0,4^\circ\text{C}$  в часы значимого вклада солнечной радиации в тепловой баланс атмосферы. В расчётах модели COSMO по ЦФО оптимальным представляется использование схемы CLOUDRAD со счётной концентрацией ядер конденсации  $400 \text{ см}^{-3}$ .

**Таблица 4** – Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на уровне 2 м в модели COSMO (ЧЭ №4) с оперативной схемой облачно-радиационного взаимодействия и схемой CLOUDRAD с  $N_{\text{ЯК}} 400 \text{ см}^{-3}$ , период 9-18 ч местного времени

Схема / месяц	6	7	8	9	10
Оперативная схема	1,8	1,7	1,5	1,4	1,7
CLOUDRAD	1,4	1,5	1,2	1,1	1,3
Число случаев	18616	19176	19146	18491	18048

В разделе 4.2 приведены результаты исследования схемы радиационного переноса esRad модели ICON в облачных условиях и показано влияние облачно-аэрозольных эффектов на прогноз солнечной радиации. На основе измерений спектрорадиометра MODIS и с помощью системы верификации MET [Model Evaluation Tool, Newmann et al., 2022] получено, что оптическая толщина капельных облаков в ICON при использовании схемы SOCRATES [Edwards and Slingo, 1996] в среднем на  $4\pm 0,01$  (24%) ниже, чем измеренная MODIS оптическая толщина облаков. Это связано с занижением водосодержания облаков (см. Главу 3). В случае успешного прогноза водосодержания, когда относительная разность “прогноз минус измерение” не превышает 15% по модулю, оптическая толщина облаков прогнозируется с существенно меньшей погрешностью. Средняя арифметическая ошибка составляет  $+0,04\pm 0,03$  (+0,2%). Это говорит о хорошем качестве схемы расчёта оптической толщины облаков SOCRATES.

Анализ суммарной радиации в модели ICON проводился с учётом доли прямой радиации в суммарной (R) – как аналога балла облаков и пространственной характеристики облачной неоднородности [Мулламма и др., 1972]. Среднечасовая суммарная радиация в модели ICON в среднем на  $46\pm 15 \text{ Вт/м}^2$  (18%) выше суммарной радиации, измеренной в обсерватории Линденберга сети BSRN. Это связано как с занижением оптической толщины облаков, так и с завышением R в среднем на  $0,13\pm 0,02$  по сравнению с измерениями.

Внедрение параметризации вертикальной скорости в схему нуклеации облачных капель привело к росту водосодержания облаков в модели ICON на 20%. С увеличением водосодержания наблюдается рост оптической толщины облаков в среднем на 1 (6%). Под

влиянием параметризации суммарная радиация в ICON снижается в среднем на  $5 \text{ Вт/м}^2$  (4%) при высоте Солнца от  $25^\circ$  и в условиях сплошной облачности.

Таким образом, суммарная радиация в модели ICON в среднем завышена относительно измерений сети BSRN в Линденберге. С одной стороны, это связано с занижением водосодержания облаков в модели, которое обнаружено с использованием наземных и спутниковых измерений. С другой стороны, это связано с моделированием пространственной неоднородности облаков, из-за чего прогнозируемая доля прямой радиации в суммарной радиации выше измеренной. Внедрение параметризации вертикальной скорости в схему нуклеации облачных капель модели ICON способствует снижению суммарной радиации в модели.

**В Заключении** представлены наиболее важные результаты диссертационной работы.

**В ходе работы были получены следующие основные результаты:**

1. Водосодержание облаков в моделях COSMO и ICON ниже по сравнению с наземными и спутниковыми наблюдениями при использовании в моделях как одномоментной, так и двухмоментной микрофизических схем. В двухмоментной схеме низкое водосодержание связано, в том числе, с низкой интенсивностью нуклеации облачных капель из-за применения прогностической вертикальной скорости в схеме нуклеации. Внедрение в схему нуклеации облачных капель модели ICON параметризации вертикальной скорости привело к росту водосодержания облаков в среднем на 20% и росту оптической толщины облаков в среднем на 6%. Ошибка прогноза медианы водосодержания снижается на 10% и 17% по сравнению с измерениями CLOUDNET в Юлихе и в Линденберге соответственно.

2. Параметризация оптической толщины облаков SOCRATES модели ICON показывает хорошее качество прогноза по сравнению со спутниковыми измерениями MODIS. Средняя ошибка смоделированной оптической толщины капельных облаков составляет менее 1%.

3. Суммарная радиация в модели ICON в среднем выше данных наземных измерений сети BSRN в Линденберге, что связано как с ошибкой прогноза водосодержания облаков, так и с высокой долей прогнозируемой прямой радиации в суммарной радиации. При внедрении параметризации вертикальной скорости в схему нуклеации облачных капель модели ICON в условиях сплошной облачности суммарная радиация снижается в среднем на  $5 \text{ Вт/м}^2$  (4%).

4. В схеме радиационного переноса модели COSMO с оперативной схемой облачно-радиационного взаимодействия наблюдается занижение суммарной радиации на фоне низкого водосодержания облаков в модели. Применение в модели COSMO схемы, которая учитывает процессы облачно-аэрозольного взаимодействия, с заданной  $N_{\text{ЯК}} 400 \text{ см}^{-3}$  способствует росту прогнозируемой суммарной радиации у земной поверхности на  $14 \pm 1\%$  относительно расчётов

оперативной схемы. В результате в тёплый период года средняя абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на уровне 2 м снижается в среднем на 0,2-0,4 °С в дневные часы.

5. На примере весенних периодов 2018-2020 гг. показано, что счётная концентрация облачных капель над Москвой составляет 200-300 см<sup>-3</sup>. В период локдауна весной 2020 года в квазиоднородных метеорологических условиях адвекции воздуха на Москву с севера по данным измерений обнаружено снижение счётной концентрации облачных капель на 14-16% (40-50 см<sup>-3</sup>) относительно тех же условий в 2018-2019 гг. Это привело к росту эффективного радиуса облачных капель в среднем на 8% и уменьшению оптической толщины облаков в среднем на 5%. В модели COSMO воспроизведён первый непрямой эффект аэрозоля. Смоделированная суммарная радиация у земной поверхности квазилинейно снижается на 8 Вт/м<sup>2</sup> (10%) на каждые 50 см<sup>-3</sup> роста счётной концентрации ядер конденсации в условиях сплошной облачности при высоте Солнца 40° и водосодержании облаков от 200 до 400 г/м<sup>2</sup>.

#### **Статьи по теме диссертации в научных журналах из перечня ВАК:**

1. **Shuvalova J.**, Chubarova N., Shatunova M. Cloud characteristics and their effects on solar irradiance according to the ICON model, CLOUDNET and BSRN observations // Atmosphere. – 2023. – Vol.14. – N.12. – P.1769. (<https://doi.org/10.3390/atmos14121769>)

2. **Shuvalova J.**, Chubarova N., Shatunova M. Impact of cloud condensation nuclei reduction on cloud characteristics and solar irradiance during COVID-19 lockdown 2020 in Moscow // Atmosphere. – 2022. – Vol.13. – N.10. – P.1710. (<https://doi.org/10.3390/atmos13101710>)

3. Шатунова М.В., Хлестова Ю.О., Чубарова Н.Е. Прогноз микрофизических и оптических характеристик крупномасштабной облачности и ее радиационного воздействия с помощью мезомасштабной модели численного прогноза погоды COSMO // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т.32. – №.10. – С.824-831. (<https://doi.org/10.15372/AOO201910>)

Shatunova M.V., **Khlestova Yu.O.**, Chubarova N.E. Forecast of Microphysical and Optical Characteristics of Large-Scale Cloud Cover and Its Radiative Effect Using the COSMO Mesoscale Weather Prediction Model // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2020. – Vol.33. – P.154-160. (<https://doi.org/10.1134/S1024856020020098>)

#### **Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

4. **Хлестова Ю.О.** Программа расчета концентрации ядер конденсации на нижней границе облака по данным спектрорадиометра MODIS на базе спутников Terra и Aqua // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №20211617188. Дата государственной регистрации 21 мая 2021 года.

**Другие публикации по теме диссертации:**

5. **Shuvalova J.**, Chubarova N., Shatunova M. Solar irradiance and cloud-radiation interaction according to the ICON-Ru and COSMO-Ru simulations, ground-based and satellite observations // AIP Conference Proceedings, «Radiation processes in the atmosphere and ocean». – 2024. – Vol.2988. – N.1. – P.080002. (<https://doi.org/10.1063/5.0182766>)
6. **Хлестова Ю.О.**, Чубарова Н.Е., Шатунова М.В. Влияние концентрации ядер конденсации на прогноз радиационных потоков в моделях COSMO-Ru и ICON-Ru // Сборник международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2022. – 2022. – С.95-98.
7. Шатунова М.В., **Хлестова Ю.О.**, Чубарова Н.Е., Ривин Г.С. Оценка влияния облачно-аэрозольного взаимодействия на прогноз метеорологических характеристик // Аэрозольное загрязнение городов и его эффекты на прогноз погоды, региональный климат и геохимические процессы / под ред. Н.Е. Чубаровой. Москва, 2020. Гл. 3. С. 251-286. (<https://doi.org/10.29003/m1475.978-5-317-06464-8>)
8. **Khlestova J.**, Chubarova N., Shatunova M., Rivin G., Becker R., Goersdorf U., Mayer B., Pospichal B., Seifert P., Zinner T. Radiative and temperature effects of experimental cloud-radiation interaction scheme of COSMO model // Proceedings of SPIE, 26th International Symposium on Atmospheric and Oceanic Optics: Atmospheric Physics. – 2020. – Vol.11560. – P.115600C. (<https://doi.org/10.1117/12.2575575>)
9. Chubarova N., **Khlestova J.**, Shatunova M., Platonov V., Rivin G., Goersdorf U., Becker R. Cloud characteristics and cloud radiative effects according to COSMO mesoscale model and measurements // Proceedings of SPIE, 24th International Symposium on Atmospheric and Oceanic Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – Vol.10833. – P.108331N. (<https://doi.org/10.1117/12.2504340>)

Содержание диссертации отражено в 32 статьях и сборниках тезисов докладов на российских и международных научных конференциях. Полный перечень доступен на странице соискателя в Информационной Системе «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/workers/19670921/>.