

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Полюхов Алексей Андреевич

**Региональные аспекты пространственно-временной изменчивости
атмосферного аэрозоля и его влияние на радиационные и
метеорологические характеристики по данным измерений и
моделирования**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – *Чубарова Наталья Евгеньевна, доктор географических наук, профессор*
- Официальные оппоненты** – *Журавлева Татьяна Борисовна, доктор физико-математических наук, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, в.н.с.*
- Елисеев Алексей Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, МГУ имени М.В.Ломоносова, в.н.с.*
- Гинзбург Вероника Александровна, кандидат географических наук, Институт глобального климата и экологии имени Ю.А.Израэля, зам. директора по научной работе, зав. отделом, в.н.с.*

Защита диссертации состоится «2» декабря 2021 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9391420, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/390378374/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АОР – альbedo однократного рассеяния
АОТ – аэрозольная оптическая толщина
ВГА – верхняя граница атмосферы
МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата
ФАИ – фактор асимметрии индикатрисы рассеяния
AEROCOM – AEROSol Comparisons between Observations and Models
AEROCLO – AEROnet-CLOud
AERONET – AErosol RObotic NETwork
CAMS – Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CIRC – Continual Intercomparison of Radiation Codes
CMIP – Coupled Model Intercomparison Project
COSMO – COnsortium for Small-scale MOdeling
EXTPAR – EXTernal PARAmeters for Numerical Weather Prediction and Climate Application
HYSPLIT – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model
INMCM – Institute of Numerical Mathematics Climate Model
MACv2 – Max Planck Aerosol Climatology
MERRA – Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия остро встает вопрос о возможных причинах наблюдаемых изменений климата и их будущих последствиях. Этим вопросам посвящено множество работ, которые обобщаются в докладах МГЭИК (IPCC) (Stocker et al., 2013, Masson-Delmotte et al., 2021). В них, наряду с изучением вклада парниковых газов, особое внимание уделено оценкам пространственно-временных вариаций характеристик аэрозоля и их влиянию на климат Земли. Эффективность этого влияния зависит от распределения частиц по размерам, их формы и химического состава, что определяет оптические и радиационные свойства аэрозоля (Hansen, 1974, Scott 2018). Свойства аэрозолей могут определять не только величину, но и знак воздействия на климатическую систему (Allen et al., 2019). Из-за многообразия естественных и антропогенных источников аэрозолей и особенностей их взаимодействия с облачностью влияние аэрозолей на климат в настоящее время имеет большие погрешности (Myhre et al., 2013, Seinfeld et al., 2016).

Основными способами изучения аэрозолей в столбе атмосферы являются методы дистанционного зондирования как с поверхности Земли (Holben et al.,

1998, Takamura and Nakajima, 2004, Vaughan M. et al., 2009), так и со спутников (Kahn et al. 2005, Remer et al. 2005, Levy et al. 2007, Wang et al. 2021). Самолетные наблюдения также играют важную роль в исследованиях аэрозолей (Brennguier et al., 2000, May et al., 2014, Froyd et al., 2019).

В настоящее время одной из наиболее распространенных наземных сетей аэрозольного мониторинга является глобальная международная сеть AERONET (Holben et al., 2001), состоящая примерно из 500 станций. Данные измерений этой сети используются во множестве региональных и глобальных исследований аэрозольных характеристик атмосферы, а также при оценке качества спутниковых и модельных аэрозольных данных (Remer L.A. et al., 2008, Putaud et al., 2014; Li et al., 2014, Kinne 2019).

Спутниковый и наземный мониторинг аэрозолей позволяет подробно изучать их пространственное-временное распределение, источники, эволюцию в атмосфере и сток (Morcrette et al., 2009, Fiedler S. et al., 2019). На основании данных измерений и моделирования были созданы различные архивы климатических аэрозольных данных, или аэрозольные климатологии, которые представляют собой осредненное пространственно-временное распределение свойств аэрозоля, обоснованное его источниками и стоками, а также факторами, влияющими на его эволюцию. Они повсеместно используются в настоящее время в моделях прогноза погоды и климата (Tanre et al., 1984, Tegen et al., 1997, Kinne, 2019). Недавние исследования продемонстрировали, что использование аэрозольных климатологий, некорректно описывающих свойства аэрозолей, приводит к значительным ошибкам в метеорологических прогнозах (Toll et al., 2016) как на глобальном, так и на региональном масштабе. Наряду с этим, низкая степень достоверности характерна для оценки взаимодействия аэрозолей и облачности в климатической системе (Stocker et al., 2013), что говорит об актуальности исследований в данном направлении.

Помимо этого, накопленные однородные ряды наземных измерений с высокой надежностью позволяют анализировать тренды характеристик аэрозоля в различных регионах Земли. А в регионах, где измерения аэрозоля сопряжены с большими сложностями, например, в горной местности, в последние годы активно начинают использоваться новые методы, в частности изучение содержания минерального аэрозоля в ледниковых ядрах (Thompson et al., 2000, Grigholm et al., 2015, Bohleber et al., 2018). Знания о межгодовых вариациях оптических и микрофизических свойств аэрозолей позволяют уменьшать неопределенности в оценках влияния аэрозоля на солнечную радиацию и облачность.

Изучение аэрозольных свойств атмосферы и комплексный анализ воздействия аэрозолей на солнечную радиацию и облачность, в том числе за

счет взаимодействия аэрозолей и облаков, представляют собой актуальную научную задачу.

Объектом исследования является атмосферный аэрозоль.

Предмет исследования – влияние аэрозольных свойств атмосферы на солнечную радиацию и облачность.

Целью работы является исследование региональных особенностей временной изменчивости аэрозоля и его эффектов на радиационные и метеорологические характеристики атмосферы.

В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

1. Оценить качество данных различных аэрозольных климатологий, их влияние на солнечную радиацию и температуру воздуха и точность расчета этих параметров на основании мезомасштабной модели атмосферы COSMO-Ru. Адаптировать модель COSMO для использования современных аэрозольных климатологий.
2. Определить региональные изменения содержания аэрозоля и их причины за последние десятилетия по данным измерений AERONET в Москве и по данным восстановлений из керна льда на Эльбрусе.
3. Исследовать влияние косвенного воздействия аэрозоля на свойства облаков и оценить влияние тренда аэрозольной оптической толщины сульфатного аэрозоля в Европе на облачные характеристики и солнечную радиацию по данным климатической модели Института вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН.

Положения, выносимые на защиту

1. Современная аэрозольная климатология MACv2, включенная соискателем в оперативную модель COSMO-Ru, лучше воспроизводит реальное распределение аэрозольных свойств, чем существующие аэрозольные климатологии Tange и Tegen, что позволяет уменьшить погрешности расчета суммарной радиации и приземной температуры на 0,2-0,3°C в южных регионах Европы и России, а также на Ближнем Востоке.
2. Для Московского региона в период с 2002 по 2014 г. наблюдается уменьшение аэрозольной оптической толщины, которое, главным образом связано с преобладающим влиянием уменьшения антропогенных выбросов газов-предшественников аэрозоля на ЕТР и в Москве. Для Кавказа положительный тренд минеральной фракции аэрозоля по данным кернов на

Эльбрусе связан с адвекцией с Ближнего Востока, где увеличивается засушливость климата.

3. Учет облачно-аэрозольного взаимодействия в условиях уменьшения АОТ сульфатного аэрозоля в 2005 г относительно 1980 г согласно расчетам по климатической модели Института вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН выражается в увеличении суммарной радиации у поверхности Земли в облачных условиях и в лучшем воспроизведении положительных изменений облачного пропускания солнечной радиации на территории Европы.

Научная новизна

Впервые исследовано влияние использования современной климатологии аэрозолей MACv2 на радиационные и метеорологические характеристики в оперативной модели Гидрометцентра России COSMO-Ru. Впервые оценено изменение приземной температуры воздуха за счет радиационного эффекта аэрозоля в модели COSMO-Ru, которое в среднем составляет $0,9 \pm 0,2^\circ\text{C}$ на 100 Вт/м^2 в теплый период года.

Впервые оценены и сопоставлены тенденции многолетней изменчивости аэрозольного содержания на Европейской территории России в Москве по данным AERONET и на Кавказе по данным кернов Эльбруса. В Московском регионе выявлено статистически значимое уменьшение АОТ за период 2010–2014 г. относительно 2002–2009 г. за счет влияния уменьшения эмиссий антропогенных выбросов газов-предшественников аэрозоля в Москве и на ЕТР. На Кавказе выявлена связь положительного линейного тренда концентрации Ca^{2+} в керне Эльбруса с ростом засушливости климата на Ближнем Востоке.

Впервые при учете современной параметризации связи концентрации облачных капель с массой сульфатного аэрозоля в модели ИВМ РАН для территории Европы в области, где наблюдаются отрицательные аэрозольные тренды, получено увеличение облачного пропускания (до 10%) в теплый период года, лучше согласующееся с данными реанализа ERA-Interim.

Практическая значимость работы

Применение аэрозольной климатологии MACv2 в модели COSMO-Ru позволяет значимо уменьшить ошибки расчета приземной температуры воздуха в южных районах России и Европы, а также на Ближнем Востоке.

Разработанная программа AEROCLO используется в оперативной работе Метеорологической обсерватории МГУ при обработке данных AERONET.

Учет современной параметризации облачного-аэрозольного взаимодействия в климатической модели ИВМ РАН дает возможность более точно воспроизводить изменение облачного пропускания солнечной радиации за счет отрицательного тренда сульфатного аэрозоля на территории Европы.

Личный вклад автора

Все анализируемые результаты работы получены автором лично или в соавторстве с доктором географических наук, профессором Натальей Евгеньевной Чубаровой. Анализ и интерпретация данных по ледниковому керну Эльбруса проведен в соавторстве с кандидатом географических наук Станиславом Сергеевичем Кутузовым. Автор участвовал в работе по включению аэрозольной климатологии MACv2 в модельный комплекс COSMO-Ru. Все изменения, введенные в программу EXTPAR, необходимые для использования этой аэрозольной климатологии в COSMO-Ru, осуществлены автором. Кроме того, автором была разработана программа AEROCLO для эффективной работы с базами данных по аэрозолю и радиации МО МГУ. Все численные эксперименты с моделью COSMO-Ru на суперкомпьютере ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» и с климатической моделью INMCM48 на суперкомпьютере «Ломоносов» в МГУ и на кластере ИВМ РАН проведены автором. Автор принимал непосредственное участие в написании статей и в представлении научных докладов, в том числе в качестве докладчика.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования были представлены на ряде отечественных и зарубежных конференций и семинарах: на международных симпозиумах по атмосферной радиации и динамике (МСАРД) в 2015, 2017, 2019 гг.; международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана» в 2018, 2019 годах; на международном симпозиуме International Radiation Symposium 2016, Auckland, Новая Зеландия; на конференциях European Geosciences Union в 2017, 2018, 2021 годах; на международных конференциях РЕЕХ в 2015, 2017; на ежегодных рабочих группах консорциума COSMO в 2016-2021 гг. и на рабочих группах проекта AeroCom в 2019 и 2020 гг.

По результатам диссертационной работы опубликовано 44 работы, в том числе 10 статей в журналах, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 33 публикации в сборниках российских и международных конференций, 1 глава в коллективной монографии. Было получено 1 свидетельство о регистрации прав на ПО.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и литературы из 240 наименований, в том числе 200 на иностранном языке. Общий объем работы содержит 167 страниц, включая 54 рисунка и 14 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.г.н. проф. Наталье Евгеньевне Чубаровой за неоценимую помощь при работе над диссертацией, всем сотрудникам кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова за помощь и поддержку. Автор благодарен к.ф.-м.н. Марине Владимировне Шатуновой и д.ф.-м.н. Гдалию Симоновичу Ривину за ценные консультации и обсуждение результатов. Автор признателен Денису Викторовичу Блинову за всестороннюю помощь при работе с моделью COSMO-Ru и д.ф.-м.н. Евгению Михайловичу Володину за помощь при работе с моделью INMCM48, а также коллективу отдела гляциологии ИГ РАН, и, в частности, к.г.н. Станиславу Сергеевичу Кутузову за плодотворное научное сотрудничество. В завершении автор хотел бы выразить свою благодарность своей супруге Марии за постоянную поддержку и вдохновение в течение всего периода обучения в МГУ имени М.В. Ломоносова.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее практическая значимость и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, указан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

Глава 1. Общие сведения об атмосферном аэрозоле и его воздействии на радиацию и облачность

В **разделе 1.1** введено определение аэрозолей и его основных характеристик. Описание развития систем наблюдений за аэрозолями от первых систематических измерений (Roosen et al. 1973) до современных международных сетей (Holben et al., 1998) представлено в **разделе 1.2**.

В **разделе 1.3** рассматриваются основные эффекты взаимодействия аэрозолей с радиацией и облачностью. Для оценок влияния аэрозолей на климат Земли принято рассчитывать радиационное воздействие того или иного вещества. Радиационное воздействие (Radiative Forcing) – разность балансов радиации на

уровне тропопаузы с наблюдаемой концентрацией вещества и с концентрацией в доиндустриальный период. Представлен анализ современного состояния науки по изучению прямого воздействия аэрозолей на радиацию. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Stocker T, et al., 2013) оценивает величину радиационного воздействия аэрозольно-радиационного взаимодействия в среднем $-0,27 \text{ Вт/м}^2$ с «высокой степенью достоверности». Согласно 6 докладу МГЭИК (Masson-Delmotte et al., 2021) эта величина составляет $-0,22 \text{ Вт/м}^2$. Однако по некоторым оценкам эта величина может иметь положительный знак, так как доверительный интервал находится в диапазоне от $-0,77 \text{ Вт/м}^2$ до $0,23 \text{ Вт/м}^2$. (Bellouin et al., 2013). Оценка радиационного воздействия облачно-аэрозольного взаимодействия при средней оценке $-0,55 \text{ Вт/м}^2$ имеет низкую степень достоверности (от $-1,33 \text{ Вт/м}^2$ до $-0,06 \text{ Вт/м}^2$) (Stocker T, et al., 2013). Согласно 6 докладу МГЭИК (Masson-Delmotte et al., 2021) эта величина составляет $-0,84 \text{ Вт/м}^2$ и до сих пор имеют большую неопределенность (Bellouin et al, 2020). **Раздел 1.4** посвящен анализу эффектов аэрозоля и их неопределенностям в моделях численного прогноза погоды. Показана важность учета реалистичных аэрозольных климатологий для улучшения прогнозирования как на региональном, так и на глобальном масштабах

Таким образом, в главе 1 на основе анализа литературы показано, что в настоящее время остаются большие неопределенности в оценках взаимодействия аэрозолей с радиацией и облачностью на различных пространственно-временных масштабах. Данная работа направлена на всестороннее изучение и уточнение данных оценок с использованием современных данных наблюдений, новых аэрозольных климатологий и результатов моделирования.

Глава 2. Методы исследования аэрозольных свойств атмосферы, описание аэрозольных климатологий, используемых радиационных алгоритмов и параметризаций облачно-аэрозольного взаимодействия

В разделе 2.1 приводится описание измерений и методов восстановления свойств аэрозолей, разработанных в рамках сети AERONET для солнечно-небесного фотометра CIMEL (Holben et al., 1998, Dubovik, King et al., 2000). Стандартные алгоритмы фильтрации данных AERONET версии 2 для исключения облачных случаев используют методы, которые не позволяют фильтровать случаи, когда на солнечном диске наблюдаются тонкие, однородные облака верхнего и среднего ярусов (Smirnov A. et al., 2000). Для исключения случаев с влиянием облаков было предложено использовать дополнительно ежечасные визуальные данные об облачности. Показано, что в

теплый период года использование простого фильтра - балла общей облачности N более 9 баллов - позволяет эффективно исключать данные измерений в облачных условиях и не сокращать существенно выборку. В зимние месяцы предложено применять более строгий фильтр с $N > 6$. Для эффективной работы с данными AERONET и данными ежечасных наблюдений за баллом общей облачности, а также для совмещения с данными радиационных измерений, был разработан программный продукт AEROCLO, который в настоящее время используется в оперативной работе Метеорологической обсерватории МГУ.

В разделе 2.2 представлено описание трех наиболее распространенных аэрозольных климатологий: климатологии Tanre (Tanre et al., 1984), Tegen (Tegen et al., 1997) и MACv2 (Kinne et al., 2019). Климатология Tanre представляет собой среднегодовое распределение аэрозольной оптической толщины (АОТ), полученное на основе эмпирических данных. Климатология Tegen основана на использовании эмпирических параметризаций и результатов расчетов по трехмерным химико-транспортным моделям GISS (Chin et al., 1996) и CCM1 (Walton et al., 1988). Новая аэрозольная климатология MACv2 получена по результатам ансамблевого расчета 14 химико-транспортных моделей с учетом современных эмиссий различных веществ, скорректированных по данным наземных измерений. (Kinne, 2019).

Приводится описание радиационного алгоритма модели COSMO-Ru и описание внесенных изменений в организацию модельного комплекса COSMO для включения аэрозольной климатологии MACv2. Для расчета плотности потоков радиации при использовании климатологии MACv2 все оптические и радиационные свойства аэрозоля задаются в файлах с внешними данными и подготавливаются в программах EXTPAR и INT2LM.

Кроме того, для оценки влияния аэрозольных характеристик на суммарную радиацию был выбран радиационный алгоритм CLIRAD(FC05)-SW (Chou, Suarez, 1999; Tarasova, Fomin, 2007). Раздел 2.3 посвящен обзору этого алгоритма, приведена общая характеристика, рассмотрен метод решения уравнения переноса радиации в плоскопараллельной атмосфере. Проведена оценка погрешности алгоритма CLIRAD(FC05)-SW относительно более точных расчетов солнечной радиации методом Монте-Карло (Trembach et al., 2000). Было получено, что погрешность алгоритма не превышает 2 % в типичных условиях, наблюдавшиеся при сравнениях с данными измерениями (рисунок 1). Исходя из полученных результатов, в работе не рассматриваются случаи с крайне высокими значениями АОТ или малыми высотами Солнца, при которых погрешность метода возрастает.

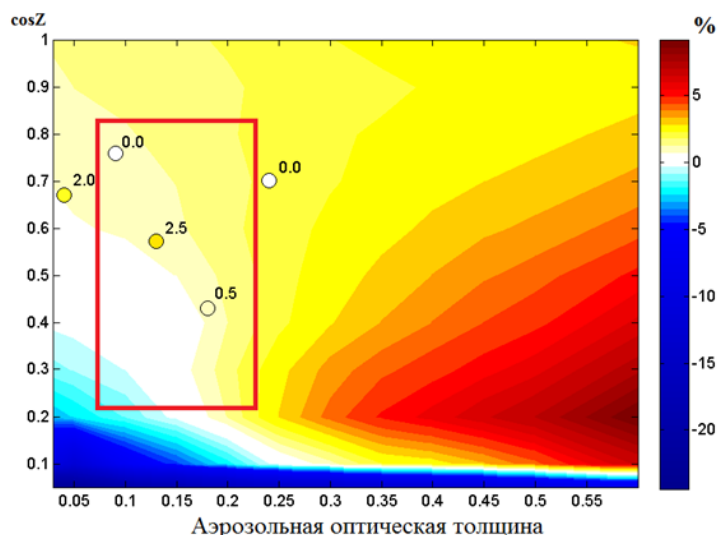


Рисунок 1. Относительная погрешность расчета нисходящей коротковолновой радиации, полученная в данной работе (цветное поле) и ошибки по данным проекта CIRC (Oreopoulos L. et al., 2012) (точки с подписью). Красной рамкой обозначены типичные условия, наблюдающиеся при сравнениях с данными измерений.

В разделе 2.4 рассматриваются используемые параметризации эмиссий аэрозоля в климатической модели INMCM48 для оценки его не прямых эффектов на облака. Существует множество подходов к параметризации аэрозоля и описанию его эффектов взаимодействия с облачностью в моделях. Для климатических моделей ключевым фактором отбора той или иной параметризации является вычислительная эффективность. В основном рассматриваются линейные или степенные функции от нескольких параметров. Сравняются современные параметризации эмиссии морского и минерального аэрозоля с используемыми в аэрозольном блоке модели INMCM48 (Володин и Кострыкин, 2016). Кроме этого, проведен анализ современных параметризаций облачно-аэрозольного взаимодействия. Большинство параметризаций основано на экспоненциальной зависимости количества облачных капель от смеси сульфатного аэрозоля и морской соли (Jones et al., 1994). В результате для оценок влияния облачно-аэрозольного взаимодействия на суммарную радиацию была взята параметризация (McCoу et al., 2017).

Для работы с данной параметризацией были внесены необходимые изменения в модель INMCM48.

Глава 3. Анализ качества воспроизведения солнечной радиации в модели COSMO-Ru и оценка радиационных и метеорологических эффектов аэрозоля

Раздел 3.1 посвящён сравнениям расчетов солнечной радиации в модели COSMO-Ru с вычислениями по радиационному алгоритму CLIRAD(FC05)-SW и данными измерений. Сравнения алгоритма расчета радиации в модели COSMO-Ru проведены с двух позиций:

1. выполнены оценки погрешностей алгоритма расчета радиации при одинаковых заданных начальных условиях (влажность, альbedo, свойства аэрозоля) в сравнении с результатами расчетов по CLIRAD(FC05)-SW;

2. оценены погрешности плотности потока нисходящей коротковолновой радиации при использовании в модели COSMO данных различных аэрозольных климатологий относительно данных измерений и расчетов алгоритма CLIRAD(FC05)-SW с использованием реальных параметров аэрозоля.

Для этого было отобрано четыре станции в разных климатических условиях, для них были выбраны дни в теплый период года, в которые облачность по данным визуальных наблюдений и по модельным данным с часовой дискретностью отсутствовала не менее 5 часов. На этих станциях (Метеорологическая обсерватория МГУ Москва (Россия), Гидрометеорологическая обсерватория (ГМО) Тикси (Россия), Обсерватория Линденберг (Германия) и Обсерватория Эйлат (Израиль)), проводятся измерения свойств аэрозолей в рамках сети AERONET и радиационные измерения. Всего в сумме для всех станций отобрано 18 дней. Было проведено по 5 экспериментов для каждого выбранного дня. При расчетах по мезомасштабной модели COSMO-Ru с шагом сетки 1 км использовались данные двух аэрозольных климатологий Tegen и MACv2. Проводились также расчеты с использованием радиационного алгоритма CLIRAD(FC05)-SW с применением измеренных значений атмосферных характеристик (CLIRAD_real) (**таблица 1**). Результаты расчетов сравнивались с данными наземных измерений коротковолновой радиации, которые проводились с помощью высокоточных радиационных приборов.

Таблица 1. Используемые входные параметры для модели COSMO-Ru и алгоритма CLIRAD(FC05)-SW для всех выбранных дней

Конфигурация	AOT	Влажность	Альbedo поверхности
CLIRAD_real	AERONET	AERONET	измерения
CLIRAD_Tegen	Tegen, 1997	COSMO-Ru	COSMO-Ru
CLIRAD_MACv2	MACv2, 2019	COSMO-Ru	COSMO-Ru
COSMO_Tegen	Tegen, 1997	COSMO-Ru	COSMO-Ru
COSMO_MACv2	MACv2, 2019	COSMO-Ru	COSMO-Ru

Далее в работе приведено детальное описание результатов экспериментов для МО МГУ. Результаты вычислений средних значений погрешности суммарной радиации у поверхности Земли относительно данных измерений для всех выбранных дней по разным станциям представлены в **таблице 2**. Для Тикси было обнаружено сильное влияние дымового аэрозоля, поэтому результаты расчетов по этой станции не учтены в суммарных оценках.

Таблица 2. Средняя по всем выбранным дням абсолютная и относительная погрешность расчетов суммарной коротковолновой радиации CLIRAD(FC05)-SW и COSMO-Ru по сравнению с данными измерений

Конфигурация	МО МГУ		Линденберг		Эйлат	
	Вт/м ²	%	Вт/м ²	%	Вт/м ²	%
CLIRAD_real	-16,7	-2,7	-6,4	-1,4	12,7	0,9
CLIRAD_Tegen	-37,8	-6,7	-38,4	-8,3	-2,8	-1,4
CLIRAD_MACv2	-36,2	-6,4	-37,1	-8,1	-1,3	-1,3
COSMO_Tegen	-13,6	-2,5	-9,4	-2,0	12,0	0,8
COSMO_MACv2	-10,2	-1,9	-11,6	-2,4	8,2	0,2

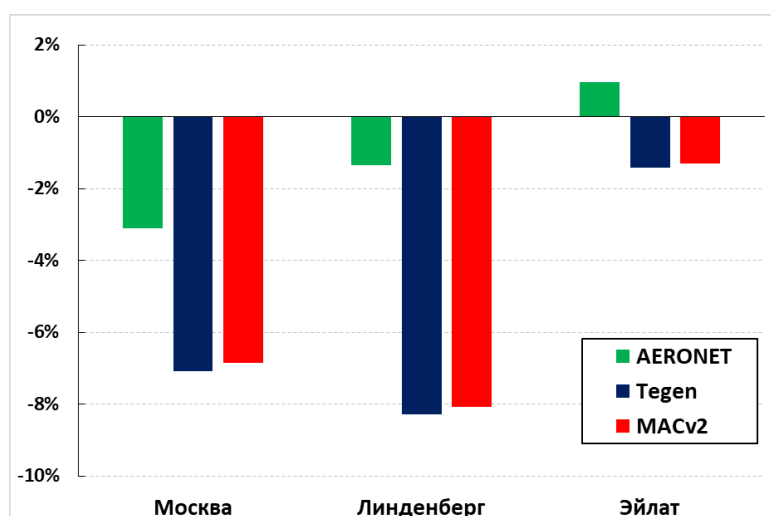


Рисунок 2. Относительные ошибки расчетов суммарной коротковолновой радиации CLIRAD(FC05)-SW с использованием аэрозольной оптической толщины и альbedo однократного рассеяния по данным измерений AERONET и по климатологиям Tegen и MACv2.

При использовании аэрозольных параметров в алгоритме CLIRAD(FC05)-SW по данным аэрозольных климатологий погрешности расчетов суммарной радиации возрастают на 5,3% для МО МГУ и обсерватории Линденберг и на 0,5% для Эйлата (**рисунок 2**). При этом расчеты с климатологией MACv2

показывают меньшие погрешности по сравнению с расчетами с климатологией Tegen для МО МГУ, Линденберга и Эйлата. Наименьшие погрешности наблюдаются для обсерватории Эйлат и не превышают 1,5%. С другой стороны, получено завышение расчетов в используемом алгоритме COSMO-Ru в среднем на 4,8 % по сравнению с алгоритмом CLIRAD(FC05)-SW. В результате наложения ошибок с разными знаками общая погрешность расчетов при использовании аэрозольных климатологий в алгоритме COSMO-Ru меньше, чем у расчетов по алгоритму CLIRAD(FC05)-SW с данными AERONET.

В разделе 3.2 представлен анализ радиационных эффектов аэрозоля с использованием аэрозольных климатологий. Приведены сравнения аэрозольных климатологий MACv2 и Tegen для территории всей Северной Евразии в области (20° – 90° с.ш., 10° з.д.– 180° в.д.). Поскольку в климатологии MACv2 были учтены современные эмиссии антропогенного аэрозоля, для территории восточного Китая наблюдается существенный рост АОТ (до 0,8). Для Европы и Европейской территории России АОТ в аэрозольной климатологии MACv2 на 0,1 меньше, что также лучше соответствует современным данным измерений. В среднем для территории Евразии в климатологии MACv2 АОТ больше на 0,1, а АОР больше на 0,05. Согласно расчетам по алгоритму CLIRAD(FC05)-SW различия в свойствах аэрозолей в аэрозольных климатологиях приводят к изменению оценок суммарной коротковолновой радиации на большей части Евразии на -5 – -10 Вт/м², что для северных территорий в январе соответствует -10% от суммарной радиации в полдень. В то же время, вследствие меньших значений аэрозольной оптической толщины в январе над территорией Европы увеличивается суммарная радиация на 10 – 20 Вт/м² (на 2 – 3 %). Самые большие различия в величине суммарной радиации наблюдаются на территории Китая, до -80 Вт/м², что составляет более 15% в январе и более 5% в июле.

Проведено сравнение аэрозольных климатологий с данными многолетних измерений AERONET на выбранных четырех станциях. Получено, что для МО МГУ, Линденберга и обсерватории Эйлат новую аэрозольную климатологию MACv2 можно с большой достоверностью использовать для теплого сезона. Для МО МГУ, однако, требуется уточнение величин АОР для зимних месяцев для обеих климатологий. При этом климатология MACv2 лучше отражает годовой ход и имеет в целом меньшие ошибки по сравнению с данными измерений, чем климатология Tegen. Для Тикси по данным наблюдений проявляется влияние дымового аэрозоля, в результате чего величины АОТ по данным климатологий Tegen и MACv2 ниже на 0,05, а АОР выше более чем на 0,2 в некоторые месяцы.

Оценки погрешностей расчета суммарной радиации, полученные по алгоритму CLIRAD(FC05)-SW с аэрозольными параметрами по данным климатологий Tegen и MACv2 относительно расчетов со среднемесячными данными АОТ, АОР, ФАИ по данным AERONET, показали, что использование новой климатологии MACv2 приводит к улучшению воспроизводимости суммарной радиации. Для МО МГУ для большинства месяцев погрешность уменьшается на 10–15 Вт/м², для Эйлата с апреля по сентябрь уменьшение погрешности составляет 9,5 Вт/м².

В разделе 3.3 рассматриваются погрешности расчета температуры воздуха при использовании различных аэрозольных климатологий. Расчет проводился для Европы и Европейской территории России (ЕТР) с прилегающими регионами (область 30-80° с.ш., 0-60° в.д.) с горизонтальным шагом сетки примерно 13 км и 40 уровнями по вертикали на 24 часа с интервалом интегрирования 120 секунд (Ривин Г. С. и др., 2019) для 2017 года. Модельные эксперименты были проведены для центральных месяцев сезонов (январь, апрель, июль, октябрь). В качестве граничных и начальных условий были использованы данные глобальной модели ICON (Zängl et al., 2015). Было проведено 3 эксперимента с различными аэрозольными климатологиями: с климатологией Tanre, которая на момент проведения экспериментов использовалась в оперативном прогнозе погоды Гидрометцентра России, климатологиями Tegen и MACv2. Для оценки качества расчетов температуры воздуха применялись методы станционной верификации (Wilks, 2011). Оценка точности расчета температуры воздуха была проведена по данным метеорологических (на уровне 2 метра из сводок SYNOP) и аэрологических станций (на уровнях 500 гПа и 850 гПа из сводок TEMP). Отсеивались станции с пропуском более 10% наблюдений. Сопоставление моделируемых и наблюдаемых значений проводилось интерполяцией координат по методу «ближайшего соседа». Критерием оценки являлось среднеквадратическая ошибка (RMSE):

$$\Delta RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{Tegen(MACv2),i} - T_{набл,i})^2} - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{Tanre,i} - T_{набл,i})^2} \quad (1)$$

где $T_{Tegen(MACv2)}$, T_{Tanre} – расчет приземной температуры воздуха по модели COSMO, $T_{набл}$ – приземная температура воздуха по наблюдениям, N – количество наблюдений в течение месяца. Если $\Delta RMSE < 0$, значит ошибка расчета приземная температура воздуха уменьшилась.

Сравнение расчетов приземной температуры относительно аэрозольной климатологии Tanre показало, что на суше приземная температура увеличивается до 1,5 градуса на севере Африки вследствие увеличения суммарной радиации из-за меньшего АОТ в климатологиях Tegen и MACv2. Над акваторией Мирового океана температура воздуха на 2 метрах зависит прежде всего от температуры поверхности океана, которая задается из глобальной модели и принимается постоянной в пределах периода интегрирования. Незначительное уменьшение диагностической температуры на 2 метрах является следствием уменьшения поглощения суммарной радиации на нижнем модельном уровне. По мере увеличения высоты понижение температуры воздуха усиливается: в нижней (850 гПа) тропосфере оно достигает 0,2°C, а в средней тропосфере (500 гПа) превышает 0,4°C для MACv2.

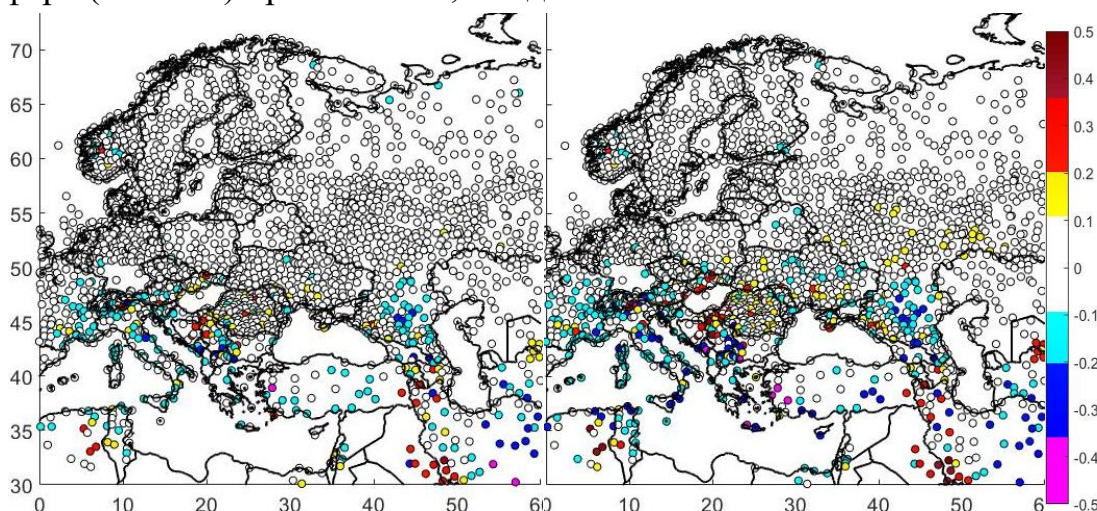


Рисунок 3. Изменение RMSE расчета температуры воздуха на 2 метрах для июля 2017 года при использовании климатических данных Tegen (слева) и MACv2 (справа) относительно расчетов с применением данных Tanre. Голубой и синий цвет показывает уменьшение RMSE.

Наибольшее улучшение расчета приземной температуры наблюдается для Южной Европы (35-47° с.ш., 0-28° в.д.) в январе, июле и октябре (до 0,3°C на отдельных станциях) (**рисунок 3**). Также значительное улучшение расчета температуры воздуха прослеживается для территории Ближнего Востока (30-42° с.ш., 28-60° в.д.) (Турции и Ирана). Все приведенные выше оценки получены для облачных и для безоблачных условий, в том числе, и в ночные сроки. В дневные часы при безоблачных условиях уменьшение RMSE расчета приземной температуры воздуха может достигать одного градуса за счет лучшего описания свойств аэрозоля в климатологии MACv2.

На уровнях 850 гПа и 500 гПа изменения RMSE расчета температуры воздуха статистически незначимы и не превышают 0,1 градуса.

В разделе 3.4. проведена оценка температурной чувствительности к изменению коротковолнового радиационного баланса за счет аэрозоля (радиационного аэрозольного эффекта). Получена разность баланса коротковолновой радиации между расчетами в безаэрозольной атмосфере и при задании аэрозольных характеристик из аэрозольных климатологий, а также соответствующая разность в температуре воздуха для выбранных станций по результатам расчетов модели COSMO-Ru (рисунок 4).

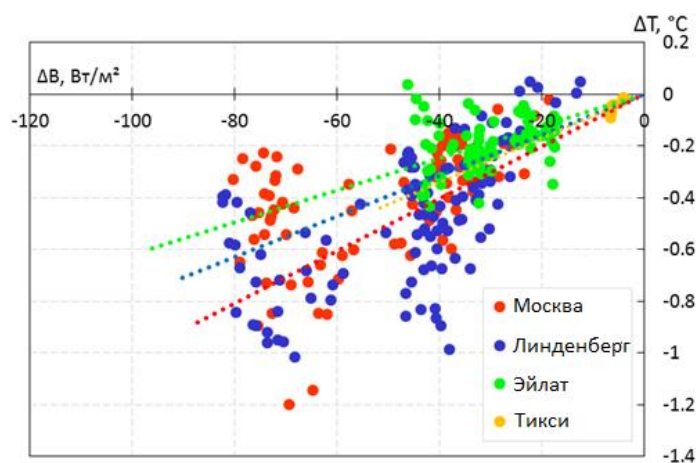


Рисунок 4. Чувствительность приземной температуры воздуха к изменению коротковолнового радиационного баланса у поверхности Земли ΔB за счет аэрозоля по данным модели COSMO-Ru. По оси X показана величина ΔB между расчетами при отсутствии аэрозоля и с аэрозолем, по оси Y показана разность температуры воздуха при тех же условиях.

При изменении баланса коротковолновой радиации на 100 Вт/м^2 за счет аэрозоля в безоблачных условиях при низком альбедо поверхности в выбранных пунктах температура воздуха на высоте 2 метра изменяется от 0,7 до 1,1 °C. В среднем величина этого радиационного эффекта аэрозоля составляет $0,9 \pm 0,2 \text{ C}$ на 100 Вт/м^2 . Аналогично были получены оценки чувствительности температурного отклика по данным наблюдений. В этом случае наблюдается гораздо больший разброс значений из-за влияния неопределенности других параметров атмосферы. В то же время получена та же тенденция увеличения положительного температурного сдвига с положительной разностью коротковолнового баланса, которая главным образом определяется аэрозолем.

Глава 4. Региональные особенности многолетней изменчивости аэрозольных характеристик

Аэрозольные климатологии представляют собой пространственно-временное распределение свойств аэрозоля и не учитывают межгодовую изменчивость свойств аэрозоля и их возможные тренды. При этом известно, что в различных регионах Евразии наблюдаются разнонаправленные тренды содержания аэрозолей и неодинаковый характер многолетних изменений его свойств (Сакерин и др., 2012, Li et al., 2014, Лужецкая, дисс, 2018, Zheng et al., 2018). В Москве в Метеорологической обсерватории МГУ измерения аэрозольных свойств атмосферы в рамках программы AERONET с помощью многоканальных солнечно-небесных фотометров CIMEL были начаты в 2001 г. Однако исследований многолетней изменчивости аэрозольных параметров атмосферы по этим данным проведено не было. Ранее оценки многолетних вариаций аэрозольной оптической толщины на длине волны 550 нм были получены на основании полуэмпирического метода с использованием данных измерений прямой коротковолновой радиации и данных о влагосодержании атмосферы (Тарасова, Ярхо, 1991, Горбаренко 2019). Особенности межгодовой вариации аэрозольных характеристик атмосферы также было интересно оценить с использованием данных ледниковых кернов для территории Кавказа, где все спутниковые методы дают большие погрешности из-за высокого альbedo поверхности в горах, и отсутствуют регулярные наземные измерения аэрозольных характеристик.

В разделе 4.1 рассматриваются межгодовые изменения АОТ по данным наблюдений солнечно-небесного фотометра CIMEL CE-318 в рамках AERONET в МО МГУ с 2001 по 2014 года с дополнительной фильтрацией данных по алгоритму, описанному в главе 2. Рассматривались данные версии 2.0 уровня 2. Показано, что статистически значимые отрицательные тренды наблюдаются для среднегодовых значений АОТ во всех спектральных диапазонах и соответственно -3,4 %, -3 % и -2,4 % в год в УФ, видимой и инфракрасной областях спектра соответственно (**рисунок 5**). Статистически значимые отрицательные тренды в диапазоне от -2,9 до -2,0%/год получены также для годовых медианных значений АОТ на 340, 380, 440 и 500 нм. Отмечается выраженное уменьшение АОТ на 15–20%, наблюдаемое в 2011–2014 гг. относительно измерений за период 2002–2010 гг. В течение большинства месяцев наблюдается уменьшение среднемесячных значений АОТ500 на 1–5% в год за исключением июня и ноября. Однако статистически значимые тренды

средних и медианных значений АОТ500 отмечены только в апреле, мае и сентябре.

Проведен анализ возможных причин полученных отрицательных трендов АОТ, которые могут быть связаны как с изменениями метеорологических условий, так и с вариациями антропогенных эмиссий. Для изучения влияния изменения антропогенных выбросов были использованы данные WebDab–EMEP (https://www.ceip.at/status_reporting/) об эмиссиях загрязняющих веществ, а также данные по эмиссиям в Москве. Получено, что за наблюдаемый период отмечается существенное снижение антропогенных выбросов SO_x, NO_x и неметановых летучих органических соединений (НМЛОС) над Европейской частью России, которые играют значительную роль в генерации вторичного аэрозоля, особенно в теплый период. Существенное снижение выбросов NO₂ наблюдается также и в Москве, начиная с 2010 года. Это согласуется со снижением аэрозольного содержания в Москве по данным измерений AERONET в МО МГУ.

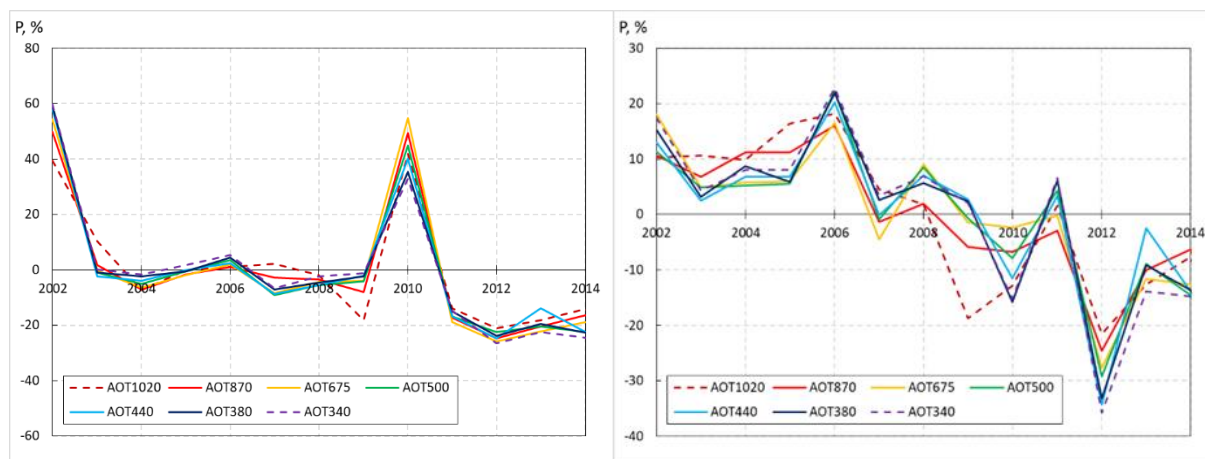


Рисунок 5. Межгодовая изменчивость относительных среднегодовых (слева) и медианных (справа) значений АОТ на различных длинах волн (340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 нм) по данным AERONET уровня 2 версии 2.0 в 2002-2014 г. с учетом всех коррекций данных измерений. Москва, МО МГУ.

Поскольку многолетние вариации АОТ могут быть также связаны с изменением повторяемости адвекции воздуха из разных регионов, то были рассмотрены возможные связи АОТ с влиянием этого фактора. Для этого был проведен анализ обратных траекторий по модели HYSPLIT4 (Draxler and Hess, 1998) на 24 часа для высоты 500м. Показано, что для месяцев со значимыми трендами (апрель, май и сентябрь) в течение исследуемого периода с 2002 по 2014 г. существенных изменений в направлении адвекции воздуха не произошло,

и отрицательное изменение АОТ наблюдалось практически для всех направлений адвекции воздуха (**рисунок 6**).

Кроме того, был проведен анализ межгодовой изменчивости АОТ500 и ее согласованности с температурой воздуха, атмосферными осадками, конвективной доступной потенциальной энергией (CAPE), с эмиссиями основных предшественников аэрозолей, наблюдавшихся в течение последнего периода 2010-2014 гг., с их значениями для всего набора данных за 2002-2014 гг. Средние относительные изменения рассмотренных метеорологических параметров не выходят за пределы соответствующих доверительных интервалов за исключением температуры воздуха в мае и CAPE в сентябре. Однако, для разных месяцев при отрицательном тренде АОТ500 изменения метеорологических параметров часто разнонаправлены, что может говорить об их случайном характере. Таким образом, влияние снижения антропогенных выбросов в последние годы, вероятно, является основным фактором отрицательного тренда АОТ500, который наблюдается над Москвой. Приведенный анализ данных измерений за период с 2002 по 2014 г. опубликован в соавторстве с Чубаровой Н.Е. и Горловой И.В. (Chubarova et al., 2016). В последующей работе (Жданова и др., 2019) выводы, полученные в нашем исследовании, в целом подтвердились.

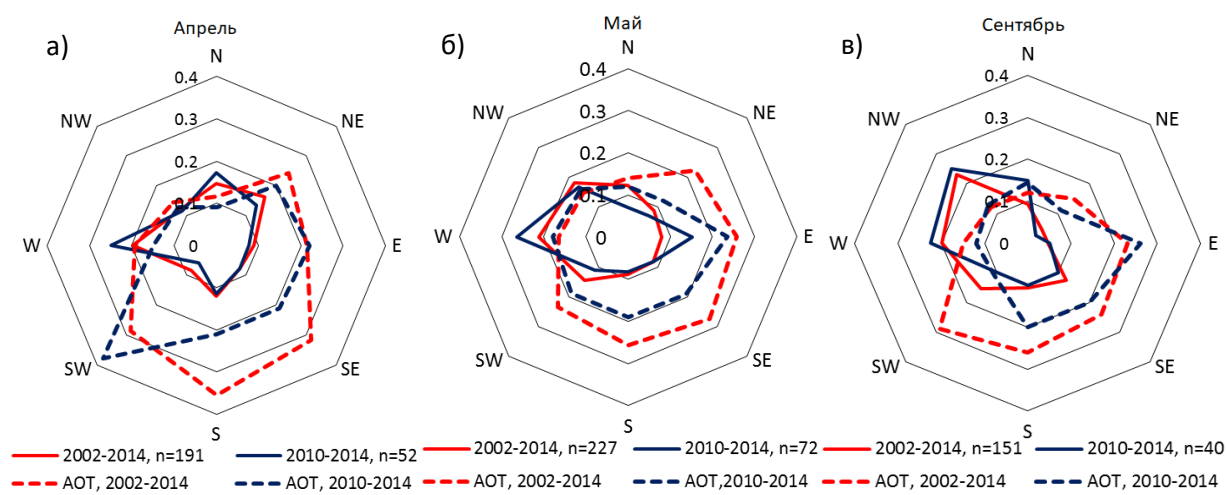


Рисунок 6. Роза ветров, оцененная по данным HYSPLIT, и распределение АОТ500 для различных направлений ветра в апреле (а), мае (б) и сентябре (в) по модели HYSPLIT в Москве. Сплошная линия – повторяемость ветра, пунктирная линия – АОТ. Красным цветом показаны средние значения за период 2002–2014 гг., синим – за период 2010–2014 гг.

В разделе 4.2 рассматриваются результаты восстановления концентрации содержания ионов Ca^{2+} в керне Эльбруса, полученном Институтом географии РАН в 2013 году. Ранее, с использованием 10-ти дневных обратных траекторий, которые начинаются из приземного пограничного слоя и пересекают Эльбрус на высоте 5100м по модели переноса HYSPLIT-4 и реанализа NCEP/NCAR за 1948–2013 года, было установлено, что территория Ближнего Востока является источником минеральной пыли для ледников Кавказа (Kutuzov et al., 2019). Анализ состава керна показал, что существует сильное увеличение содержания ионов Ca^{2+} , которое является одним из маркеров минерального аэрозоля (Schwikowski, 1995; Sodemann et al., 2006). Годовой ход с максимумом в теплое полугодие и минимумом в холодное полугодие позволяет датировать керн вплоть до конца 18 века.

Автором в рамках данной диссертации рассматривались основные метеорологические причины наблюдаемых изменений. Ранее было показано (Mikhaleiko V. et al., 2015), что основной перенос пыли на ледники Кавказа происходит весенне-летний период с территории Ближнего Востока. Поэтому был проведен корреляционный анализ содержания Ca^{2+} в керне с осадками и влажностью почвы по данным реанализа ERA-Interim с 1979 по 2013 год в весенне-летний период (рисунок 7).

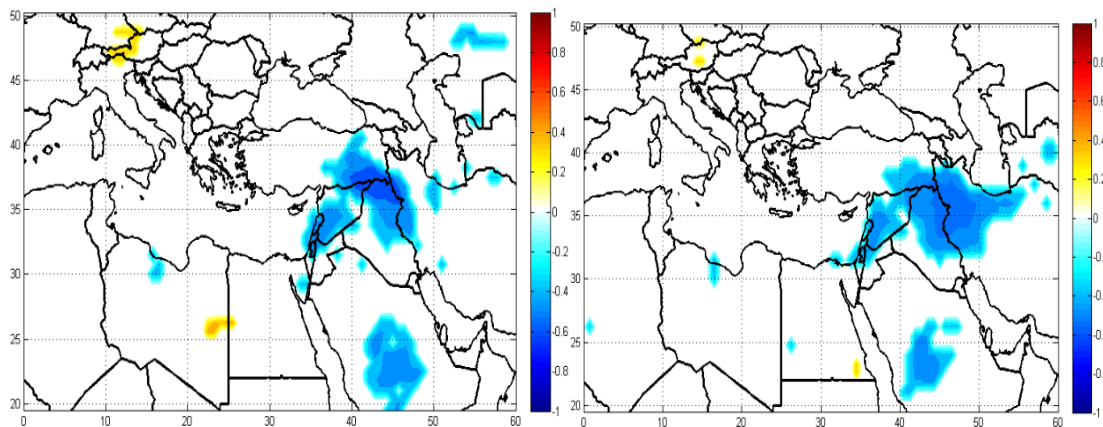


Рисунок 7. Пространственная корреляция содержания Ca^{2+} в керне с влажностью почвы (слева) и атмосферными осадками (справа) по данным ERA-Interim с 1979 по 2013 год в весенне-летний период. Белый цвет – незначимая корреляция на уровне 0,05.

Была получена статистически значимая корреляция между концентрацией Ca^{2+} на Кавказе и количеством осадков и влажностью почвы для территории Ближнего Востока в весенне-летний период. Эта связь также подтверждается увеличением засушливости на Ближнем Востоке (Ganor et al., 2010; Barlow et al., 2016; Nicholson et al., 2018). Также был проведен корреляционный анализ с

индексом засушливости SPEI3 (Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index) (Vicente-Serrano et al., 2010), осредненным для территории (32–37 с.ш., 38–45 в.д.) (рисунок 8).

Корреляционный анализ показал статистически значимую на уровне значимости 0,05 связь ($R=-0,71$) между содержанием Ca^{2+} в керне Эльбруса и индексом SPEI3. Коэффициент корреляции остается значимым даже после удаления из ряда линейного тренда ($R=-0,48$ для 1904–2012 гг и $R=-0,63$ для 1970–2012 гг.).

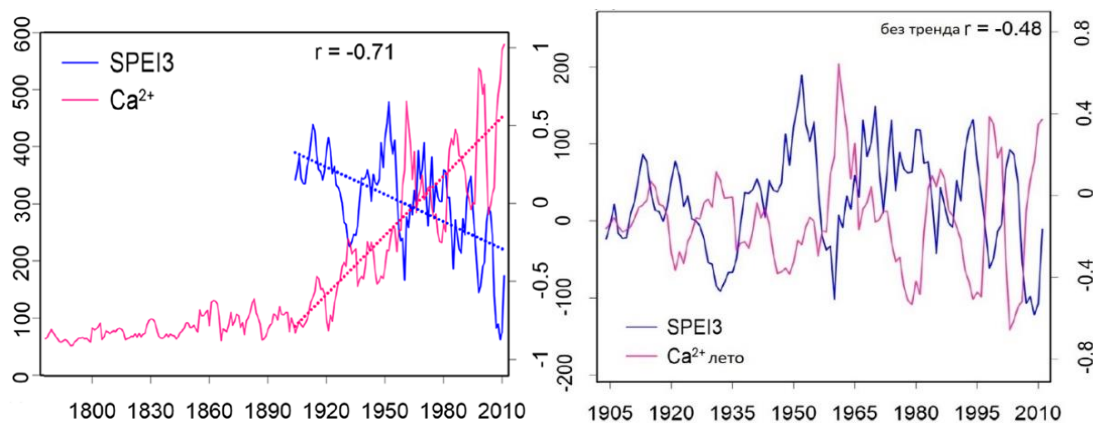


Рисунок 8. Межгодовая изменчивость содержания Ca^{2+} в керне Эльбруса и индекса SPEI3 (слева). То же – но с вычитанием тренда (справа).

Таким образом, рост концентрации Ca^{2+} , составляющий $4,0 \pm 0,5\%$ в год, связан с адвекцией воздуха с Ближнего Востока, где увеличивается засушливость климата.

Глава 5. Эффекты облачно-аэрозольного взаимодействия по данным климатической модели INMCM48 для Северной Евразии

В главе 4 были показаны значимые отрицательные тренды АОТ на территории России, связанные с уменьшением антропогенного загрязнения. Сульфатный аэрозоль вследствие его гидрофильности и большого содержания в атмосфере является одним из главных объектов при рассмотрении облачно-аэрозольного взаимодействия. Наблюдающийся значимый отрицательный тренд сульфатного аэрозоля (Manktelow et al., 2007, Aas et al., 2019) на территории Европы может существенно влиять на облачность и ее изменения. Для исследования этого механизма использована модель INMCM48 с аэрозольным блоком (Володин и др., 2017), в котором рассчитываются концентрации следующих типов аэрозолей: мелкой и крупной морской соли, континентальной пыли, сернистого газа, сульфатного аэрозоля, гидрофобного и гидрофильного черного и органического углерода (Володин и Кострыкин, 2016). Учитывается также

перенос, диффузия, предписанные или рассчитываемые источники, гравитационное оседание и вымывание осадками. Была проведена оценка облачно-аэрозольного взаимодействия с использованием уточненной параметризации (McCooy et al., 2017) с учетом и без учета сульфатного аэрозоля:

$$N_d = \exp(4,86 + 0,41 * \ln m_{aer}), \quad (2)$$

$$N_d = \exp(4,86 + 0 * \ln m_{aer}), \quad (3)$$

где N_d – количество облачных капель (см^{-3}), m_{aer} – массовая концентрация сульфатного аэрозоля ($\text{кг}/\text{м}^3$).

В контрольном эксперименте (формула 3) коэффициент перед массовой концентрацией аэрозоля m_{aer} равен 0, что означает полное отсутствие зависимости числа облачных капель от сульфатного аэрозоля и, соответственно, его влияния на количество облачных частиц. Расчет производился на 10 лет с эмиссиями сульфатного аэрозоля, задаваемыми для 1980, 1990 и 2005 гг. Начальные данные для атмосферы и океана задавались в каждом эксперименте одинаковыми, соответствующими 2005 году. Такой подход позволяет оценить вклад только изменения эмиссий аэрозолей.

В разделе 5.1 проведено сравнение расчетов сульфатного аэрозоля в модели INMCM48 с современными данными аэрозольного реанализа MERRA2 для 1980, 1990 и 2005 годов (Gelaro et al., 2017) и реанализа CAMS для 2005 года (Inness et al., 2019). Оба реанализа на данный момент являются наиболее полными и точными источниками данных о пространственно-временном распределении свойств аэрозоля (Gueymard, Yang, 2020). В отличие от аэрозольных климатологий, данные реанализов позволяют изучать временные изменения свойств аэрозоля. Было получено удовлетворительное согласие между данными реанализа MERRA2 и CAMS.

Сравнения результатов моделирования с данными реанализов CAMS и MERRA2 для 2005 года показывают, что модель INMCM48 завышает АОТ сульфатного аэрозоля над Северной Евразией на 0,2–0,3, а в тропической зоне занижает до -0.1. При этом наименьшие ошибки для территории Европы наблюдаются в летний сезон, и они не превышают -0.05.

В то же время, в целом модель воспроизводит основные тенденции изменений сульфатного АОТ, которые наблюдаются в реанализе MERRA2 с 1980 по 2005 год: уменьшение АОТ в Европе и ЕТР более чем на -0,25 и увеличение в Китае до 0,3 за 10 лет.

Отметим, что для большей части России и Арктики эти тренды несколько завышены. Однако для территории Европы в целом модель INMCM48 воспроизводит реальные отрицательные тренды АОТ, и, следовательно, этот

район можно использовать для анализа непрямого воздействия аэрозоля на облачность и радиацию.

Раздел 5.2 посвящен анализу эффектов облачно-аэрозольного взаимодействия, полученных по результатам численных экспериментов модели INMCM48 для 1980 и 2005 годов. Показано, что высокие концентрации сульфатного аэрозоля на территории Европы, наблюдающиеся в 1980 году, приводят к увеличению количества облачных частиц до 15 см^{-2} при сопоставлении с контрольным расчетом без влияния аэрозолей. В 2005 году этот эффект не превышает 10 см^{-2} . Полученные значения соотносятся с данными измерений и моделирования (McCoу et al., 2017; Vai et al., 2020; Haywood et al., 2020).

Количество облачных капель напрямую влияет на балл общей облачности N . При включении сульфатного аэрозоля в параметризацию облачно-аэрозольного взаимодействия для территории Европы и ЕТР наблюдается увеличение балла общей облачности относительно контрольного эксперимента. В 1980 году рост N достигает 0,2 (или 2-х баллов), в 2005 году он не превышает 0,1 (1-го балла). При этом количество облаков с 1980 по 2005 году уменьшается на 0,07 (0,7 балла).

Эффект повышенного содержания сульфатного аэрозоля в 1980 году при учете облачно-аэрозольного взаимодействия относительно контрольного эксперимента наблюдается и для облаков нижнего яруса, поскольку его наибольшая концентрация находится именно в нижней тропосфере, и аэрозоль влияет непосредственно на формирование ядер конденсации. Получено, что балл нижней облачности увеличивается в течение всего года более чем на 0,5 балла, однако самый сильный эффект наблюдается в летний период и достигает 2-х баллов, когда количество капельной облачности и суммарной радиации для территории Европы максимально. При учете сульфатного аэрозоля относительно контрольного эксперимента наблюдается также уменьшение суммарной радиации для Европы и ЕТР до -20 Вт/м^2 .

Для выявления суммарного эффекта за счет изменения балла облаков и их оптических свойств использовалась характеристика облачного пропускания CQ :

$$CQ = Q_{cloud}/Q_{clear}, \quad (4)$$

где Q_{cloud} – суммарная радиация в облачных условиях, Q_{clear} – суммарная радиация при ясном небе.

В работе (Chubarova et al., 2020) по данным реанализа ERA-Interim показано, что в теплый период года во многих регионах Северной Евразии наблюдается заметное увеличение облачного пропускания. Для выявления того, насколько

эффекты облачно-аэрозольного взаимодействия могли повлиять на эти тренды, было рассмотрено облачное пропускание за 1980 г. и за 2005 г., для контрольного эксперимента и для эксперимента с включением сульфатного аэрозоля. Результаты были сравнены с данными реанализа ERA-Interim, данные которого по облачному пропусканию были осреднены за 3 года (1979–1981, 2004–2006).

Согласно расчетам по модели INMCM48 показано, что в летний период при учете сульфатного аэрозоля в схеме расчета на территории Европы, где отрицательные тренды АОТ сульфатного аэрозоля проявляются наиболее ярко (**рисунок 9**), наблюдается увеличение облачного пропускания. Таким образом, включение в схему сульфатного аэрозоля усиливает отклик облачности на тренды аэрозоля и позволяет получить значимые положительные тренды облачного пропускания для Южной Европы и ЕТР.

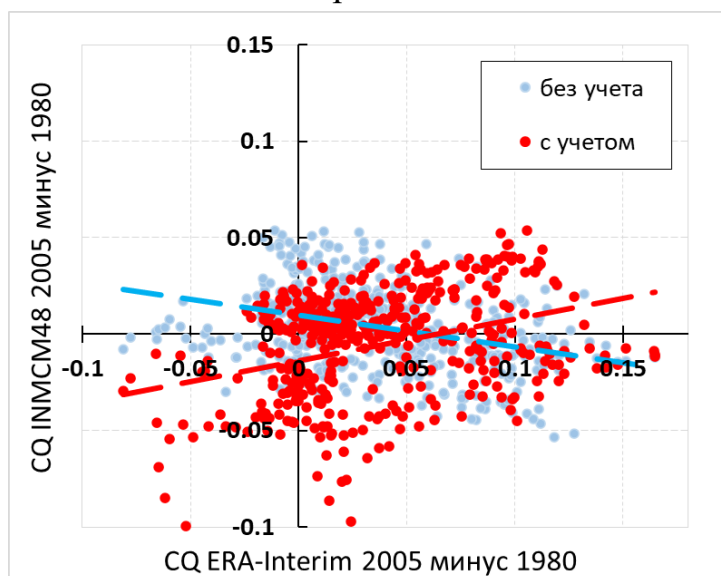


Рисунок 9. Изменение облачного пропускания CQ по данным контрольного эксперимента и в эксперименте с учетом сульфатного аэрозоля в модели INMCM48 (2005 минус 1980 года) и по данным реанализа ERA-Interim (2004–2006 г. минус 1979–1981 г.) в летний период для территории 40-65 с.ш. и 10-40 в.д.

Видно, что включение сульфатного аэрозоля в блок облачно-аэрозольного взаимодействия ведет в целом к росту облачного пропускания за счет отрицательных трендов сульфатного аэрозоля, что улучшает сходимость результатов с данными реанализа в теплый период года.

В заключении сформулированы следующие основные **выводы**.

1. Сравнительный анализ годового хода основных свойств аэрозолей по данным AERONET и аэрозольных климатологий MACv2 и Tegen на станциях в различных климатических зонах показал, что современная аэрозольная

климатология MACv2 лучше отражает реальное распределение свойств аэрозолей. Ее использование в алгоритме CLIRAD(FC05)-SW позволяет уменьшить погрешности расчета суммарной радиации в отдельные месяцы до 10–15 Вт/м².

2. Меньшие погрешности оценок аэрозольной оптической толщины и альbedo однократного рассеяния в климатологии MACv2 позволяют уменьшить среднеквадратическую ошибку расчета приземной температуры на 0,1–0,2°C (в отдельных станциях до 0,5°C) на юге Европы, юге Европейской территории России и Ближнем Востоке относительно расчетов с данными климатологии Tanre, применяющейся в оперативной модели COSMO-Ru Гидрометцентра России на момент проведения экспериментов до 2020 года. В безоблачных условиях уменьшение ошибки может достигать 1°C. Показано, что в теплый период года имеет место значимое изменение приземной температуры воздуха у поверхности Земли за счет радиационного эффекта аэрозоля, которое составляет 0,9±0,2°C /100 Втм⁻².

3. На основании измерений AERONET в МО МГУ за период с 2002 по 2014 г. с дополнительной коррекцией данных получен статистически значимый отрицательный тренд аэрозольной оптической толщины, составляющий в видимом диапазоне спектра -3,1±1,3% в год. Он связан, главным образом с уменьшением антропогенных выбросов предшественников аэрозоля на Европейской территории России и в Москве. Значимой связи аэрозольной оптической толщины с различными метеорологическими элементами, включая связи с изменениями в направлении адвекции воздуха, не обнаружено.

4. Для территории Кавказа, наряду с общей тенденцией сокращения общего содержания аэрозоля, по данным измерений в ледниковом керне на Эльбрусе получен положительный тренд содержания его минеральной компоненты (кальция), равный 4,0±0,5% в год, что определяется увеличением индекса засушливости над территорией Ближнего Востока, откуда, согласно данным траекторного анализа, осуществлялась адвекция минерального аэрозоля.

5. Учет эффектов облачно-аэрозольного взаимодействия за счет сульфатного аэрозоля в модели INMCM48 приводит к увеличению количества облачных капель (до 15 см-2) и балла общей облачности (до 2-х баллов) и уменьшению суммарной радиации до 20 Вт/м² в летний период над территорией Европы. Учет сульфатного аэрозоля в параметризации облачно-аэрозольного взаимодействия приводит к лучшему соответствию модельных данных с наблюдающимся ростом облачного пропускания в летний период на территории Европы, где отмечается отрицательный тренд сульфатного аэрозоля с 1980 по 2005 год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. **Полюхов А.А.**, Чубарова Н.Е., Ривин Г.С., Шатунова М.В., Тарасова Т.А. Оценка качества расчета солнечной радиации в COSMO-RU по данным точных радиационных расчетов и измерений в Москве в безоблачных условиях // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации – 2017. – №. 364. – С. 38-52. (IF= 0)

2. **Полюхов А.А.** Чубарова Н.Е., Блинов Д.В., Тарасова Т.А., Макштас А.П., Мускатель Х. Радиационные эффекты аэрозоля различных типов для территории Евразии по данным измерений и модельных расчетов // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 9. — С. 5–17. (WoS IF= 0,742)

3. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.И., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.Н., **Полюхов А.А.**, Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации cosmo-ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2019. — № 374. — С. 37–53. (IF= 0)

4. Chubarova N.Y., **Poliukhov A. A.**, Gorlova I.D. Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction // Atmospheric Measurement Techniques. – 2016. – Т. 9. – №. 2. – С. 313-334. (WoS IF= 4,176)

5. Chubarova N., **Poliukhov A.**, Shatunova M, Rivin G, Becker R, Kinne S Clear-Sky Radiative and Temperature Effects Of Different Aerosol Climatologies In The Cosmo Model // Geography, Environment, Sustainability. – 2018. – Т. 11. – №. 1. – С. 74-84. (Scopus IF(CiteScore)= 1,2)

6. Kutuzov S., Legrand M., Preunkert S., Ginot G., Mikhalenko V., Shukurov K., **Poliukhov A.**, Toropov P. The Elbrus (Caucasus, Russia) ice core record – Part 2: history of desert dust deposition // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2019. – Т. 19. – С 14133-14148. (WoS, Scopus IF= 6,133)

7. **Poliukhov A.A.**, Blinov D.V. Aerosol Effects on the Temperature Forecast in the COSMO-Ru Model // Russian Meteorology and Hydrology. — 2021. — № 1. — С. 29-39 (WoS IF= 0,742)

8. **Poliukhov A.**, Chubarova N., Kinne S., Rivin G., Shatunova M., Tarasova T. Comparison between calculations of shortwave radiation with different aerosol

datasets and measured data at the MSU MO (Russia) //AIP Conference Proceedings. 2017. – Т. 1810. – №. 1. – С. 100006. (WoS IF= 0,40)

9. **Poliukhov A.A.**, Chubarova N.E., Shatunova M.V., Rivin G.S., Tarasova T.A., Makshtas A.P., Muskatel H. Radiative effect of different aerosol types in clear sky conditions according to COSMO-Ru model // Proc. SPIE, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, 2018. – Т. 10833. – С. 1083308-1-1083308-4. (Scopus IF(CiteScore)= 0,8)

10. **Poliukhov A.A.**, Chubarova N.E., Volodin E.M. The effects of aerosol-cloud interaction and its influence on radiation in the INMCM5 climate model//Proc. SPIE, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2019. – Т. 11208. – С. 112081O-1-112081O-6. (Scopus IF(CiteScore)= 0,8)

Разделы в коллективных научных монографиях

Аэрозольное загрязнение городов и его эффекты на прогноз погоды, региональный климат и геохимические процессы / под ред. Н.Е.Чубаровой: Изд-во Макс-пресс, 2020.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

Полюхов А.А. Программа AEROCLO // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019619267. Дата гос. регистрации 15 июля 2019г.

Иные публикации:

33 работы в сборниках тезисов докладов на российских и международных научных конференциях. Их полный список доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/profile/Polukhov/>