

ФОРМА 3. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

I. Аннотация проекта

Тема проекта

Роль градиционных потоков и облачности в долгопериодной климатической изменчивости Атлантики

Направление прикладных научных исследований

мировой океан: ключевые физические процессы, циркуляция, климатообразующая роль

Приоритет

20е - Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики

Ключевые слова

Взаимодействие океана и атмосферы, Атлантический океан, облачность, радиация, параметризации, моделирование, климатическая изменчивость

Сроки реализации проекта: с даты заключения соглашения о предоставлении гранта по 31.12.2024 в соответствии с планом-графиком.

Ожидаемые результаты проекта

- Долговременные однородные сеточные массивы характеристик облачности, включающие общую и нижнюю облачность, типы облаков, высоту нижней границы облаков, видимость и погодный код по данным судовых наблюдений и реконструкция потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности Атлантического океана на основе судовых наблюдений и новых адаптированных параметризаций за период с 1880 по 2021 гг.
- Новые параметризации потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности океана на основе данных высокоточных измерений, многоканальных спутниковых наблюдений и достижений в области физики переноса излучения для облаков, а также новые средства измерений характеристик радиационных потоков на поверхности моря, алгоритмы и программное обеспечение для обработки измерений.
- Количественные характеристики долгопериодных трендов, а также декадной и мультидекадной изменчивости в потоках радиации на поверхности океана и характеристиках облачности, необходимые для учета роли радиационных потоков в формировании суммарного теплового баланса Атлантического океана на различных временных масштабах.
- Оценки реалистичности потоков коротковолновой и длинноволновой радиации в исторических экспериментах с климатическими моделями (проект CMIP6) и в столетних реанализах (20CR, ERA-CLIM) с целью оценки неопределенностей радиационного обмена в моделях и реанализах, связанных с параметризациями радиационного обмена и облаков.

Данные результаты имеют не только научное, но и прикладное значение и обладают потенциалом коммерциализации. Долговременные сеточные массивы облачности и радиации будут переданы в прогностические центры, где будут использоваться для валидации результатов прогностических расчетов на климатических моделях. Новые параметризации смогут использоваться в оперативных моделях и будут оформлены в виде



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru 27.07.2021
Номер заявки на портале 2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки 61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

коммерческого прикладного программного пакета, защищенного регистрационным свидетельством. Созданные в ходе проекта новые средства наблюдений за радиацией и облаками (облачные камеры, трекары Солнца, измерители нижней границы облаков и программное обеспечение для обработки измерений) будут защищены патентами и предложены индустриальным партнерам для мелкосерийного производства. Оценки реалистичности климатических моделей могут быть использованы для дискриминации моделей и оценки их качества в рамках следующего отчета МГЭИК и подготовки национального отчета о климатических изменениях.

Сведения об исполнителях проекта

Проект будет выполняться совместно Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИОРАН, российский партнер), Институтом тропосферных исследований (Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, TROPOS, Лейпциг, Германия) и Институтом метеорологии университета Лейпцига (Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, UL, Германия).

Российский партнер, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, является одним из крупнейших мировых центров исследований океана, осуществляющий исследования в области физики, климатологии, химии, геологии и биологии океана. В ИОРАН и 5 его отделениях работает более 1200 сотрудников, из них 142 доктора и 280 кандидатов наук, 2 академика и 6 член-корреспондентов РАН. Институт управляет научно-исследовательским флотом, включающем 6 научно-исследовательских судов, оборудованных современными измерительными системами и ведущими все виды исследований в Мировом океане. В предметной области проекта ИОРАН ведет экспериментальные и диагностические исследования процессов взаимодействия океана атмосферы, включая потоки радиации на поверхности и характеристики облачного покрова над океаном, а также моделирование динамики океана и атмосферы.

Роль ИО РАН в рамках данного проекта будет состоять в создании долговременных скорректированных массивов облачности над Атлантическим океаном, включая создание сеточных массивов, получение долговременных характеристик потоков длинноволновой и коротковолновой радиации на основе параметризаций, разработанных совместно с немецкими партнерами, и исследование долгопериодного отклика теплового баланса, теплосодержания и циркуляции Атлантического океана на изменчивость радиационных потоков. В составе коллектива исполнителей со стороны ИО РАН 1 член-корреспондент РАН (С.К. Гулев, руководитель проекта с российской стороны), 4 доктора и 5 кандидатов наук, являющихся признанными экспертами в данной области. В состав исполнителей также входят молодые исследователи в возрасте до 39 лет, их количество составляет более 43% от общего числа исполнителей.

Институт тропосферных исследований (TROPOS, Лейпциг, Германия) является ведущим немецким исследовательским центром в области изучения динамики облаков и радиационных процессов над морем. Ученые института ведут как экспериментальные, так и модельные исследования облаков и потоков радиации, включая участие в рейсах немецких и российских научно-исследовательских судов с применением специально оборудованных контейнерных лабораторий. В институте TROPOS работает около 200 исследователей, из которых 16 являются полными профессорами или имеют уровень доктора наук (Habilitation), и более 40 – аспирантами. TROPOS обладает уникальной исследовательской системой Облачной башней-лабораторией (Cloud Tower Laboratory), которая будет использоваться в рамках проекта для разработки параметризаций



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

физических процессов в облачных системах над океаном. TROPOS также владеет мобильной исследовательской станцией «Melpitz» PollyNet, а также мобильной океанской системой LACROS (Leipzig Aerosol and Cloud Re-mote Observation System), наблюдения которой будут использоваться в рамках проекта. Кроме того, TROPOS обладает мощным суперкомпьютером Fujitsu PrimeQuest 3800B2 с более чем 2000 ядер и большим объемом дискового пространства, который также будет использоваться для работ в рамках проекта.

Второй немецкий партнер (Институт метеорологии университета Лейпцига, UL) является одним из ведущих немецких институтов в области моделирования облаков и аэрозолей и изучения их роли в измерениях климата. Кроме того, UL в содружестве с TROPOS ведет работы по анализу спутниковой информации об облаках и радиационных потоках над океаном. В институте работает 4 профессора и 21 исследователь уровня кандидата или доктора наук. Институт вовлечен в управление немецким исследовательским самолетом HALO и имеет собственный исследовательский радар для изучения процессов превращений влаги в облаках. UL обладает уникальными базами данных и собственными кодами моделей радиационных процессов, которые будут использоваться в проекте.

Роль немецких партнеров (TROPOS и LU) в рамках данного проекта будет состоять в разработке нового поколения параметризаций радиационных потоков и взаимодействия радиации и облаков над океаном, а также тестировании и валидации параметризаций с использованием прямых судовых наблюдений ИОРАН и TROPOS. Кроме того, совместно с учеными ИОРАН TROPOS и LU будут исследовать связь мод климатической изменчивости над Атлантикой с характеристиками радиации и облачности, а также анализировать реалистичность представления облачных процессов и радиационных потоков над океаном в климатических моделях ансамбля CMIP6 с целью улучшения прогнозов климата.

Более полное описание роли российского и немецких партнеров, существующей кооперации между ними и заделов в предметной области проекта приводится в разделе Международное сотрудничество.

II. Описание проекта

Цель проекта

Основная цель проекта – исследование роли облаков и радиационных потоков в изменчивости климата над Атлантикой и прилегающими континентами на основании высокоточных временных рядов характеристик облачности и потоков радиации за последние 150 лет и моделирования роли радиационных процессов в климатических изменениях.

Задачи проекта

Для достижения основной цели проекта в ходе его реализации будут решаться следующие задачи:

- Создание долговременных однородных сеточных массивов скорректированных характеристик облачности, включающих общую и нижнюю облачность, типы облаков, высоту нижней границы облаков, видимость и погодный код по данным судовых наблюдений за период с 1880 по 2021 гг.
- Разработка новых параметризаций потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности океана на основе данных высокоточных измерений,



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

многоканальных спутниковых наблюдений и достижений в области физики переноса излучения для облаков, а также тестирование параметризаций и их адаптация для расчетов с использованием данных судовых наблюдений.

Расчет потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности Атлантического океана на основе судовых наблюдений и новых адаптированных параметризаций за период с 1880 по 2021 гг. (включая формирование сеточных массивов с различным разрешением), валидация потоков радиации и проведение сопоставление с рядами спутниковых и инструментальных наблюдений за период последних десятилетий

Анализ долгопериодных трендов, а также декадной и мультидекадной изменчивости в потоках радиации на поверхности океана и характеристиках облачности, оценка роли радиационных потоков в формировании суммарного теплового баланса Атлантического океана на различных временных масштабах.

Оценка реалистичности потоков коротковолновой и длинноволновой радиации в исторических экспериментах с климатическими моделями (проект CMIP6) и в столетних реанализах (20CR, ERA-CLIM) с целью оценки неопределенностей радиационного обмена в моделях и реанализах, связанных с параметризациями радиационного обмена и облаков.

Анализ и интерпретация вынужденных и собственных мод изменчивости климата Атлантики, связанного с радиационными потоками и облачности и их влияния на климатическую изменчивость Европейского континента.

Поставленные задачи позволят объединить достижения партнеров в области анализа морских метеорологических данных, разработки новых параметризаций переноса излучения и процессов в облаках, а также работы в области климатического моделирования и диагностики с целью добиться нового уровня понимания роли радиационных потоков и облаков в климатической изменчивости Атлантики и ее влияния на климат прилегающих континентов.

Содержание проекта

Современное состояние отечественных и зарубежных исследований по научной проблеме проекта.

Долговременные изменения характеристик облачного покрова над океаном до сих пор широко изучались с использованием данных Международного спутникового проекта по климатологии облаков (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) и других спутниковых продуктов (Rossow and Schiffer 1991, Wylie et al. 2005), доступных с начала 1980-х годов. Эти исследования выявили общее увеличение количества облачности над океаном, особенно в тропиках. Спутниковые данные об облачности широко используются для установления связи различных типов облаков с погодными режимами и связанных с ними изменений шторм-треков, в том числе с приложениями для поверхностных потоков радиации (Rossow et al. 2005, Rémillard and Tselioudis 2015, Norris et al. 2016). Эти результаты выявили значительные неопределенности в спутниковых данных, что приводит к большому разбросу оценок для потоков коротковолновой и длинноволновой радиации. Так, изменения оптической толщины аэрозоля, полученные по спутниковым наблюдениям (Wei et al., 2019), показывают уменьшение концентраций аэрозолей после 2000 г, а соответственно увеличение потока длинноволнового излучения (Paulot et al., 2018), что согласуется с переходом от так называемого периода «затемнения» (dimming) к периоду большей оптической прозрачности атмосферы (brightening) с 1980-х годов по настоящее время (Wild et al. 2005, Dall'Amico et al. 2015). Однако этот сигнал подтверждается отнюдь не всеми массивами солнечной радиации (Wei et al., 2019).



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

За последние десятилетия характеристики облачности в глобальных реанализах стали более точными, чем для реанализов первого поколения (Bedacht et al. 2007, Чернокульский и Мохов 2009, Chernokulsky et al. 2012), что связано с улучшением пространственного и вертикального разрешения моделей реанализов и развитием методов параметризации облачности. Тем не менее, характеристики облачности из реанализов по-прежнему характеризуются неопределенностями и требуют дальнейшей валидации (You et al. 2014; Dolinar et al. 2016; Calbó et al. 2016; Liu and Key 2016). Отчасти из-за этого потоки коротковолновой и длинноволновой радиации в реанализах существенно расходятся как между собой, так и по отношению к данным прямых измерений и спутниковых наблюдений (Yu 2019), демонстрируя самые сильные различия в тропиках.

Данные наблюдений попутных судов (Voluntary Observing Ships, VOS), объединенные в архиве ICOADS (Freeman et al. 2017), позволяют выявить общую тенденцию увеличения облачности над океаном с 1950-х по 2000-е годы (Norris 1999, Eastman et al. 2011, Aleksandrova et al. 2018), однако на достоверность этих оценок влияет существенная равномерная неоднородность количества наблюдений (Bedacht et al. 2007, Gulev 2007 a,b, Guleva and Belyaev 2012, Aleksandrova et al. 2018). Достоверный анализ изменений характеристик облачности до 1960 года, особенно в период 1880-1950 гг. практически невозможен из-за неполноты данных и изменений в практике наблюдений до и после 1960 г. (Norris 1999, Bellomo and Clement 2015, Aleksandrova et al. 2018). Недавнее объединение архива ICOADS с архивом DWD (Deutschen Wetterdienst) существенно минимизирует неоднородность количества данных (Freeman et al. 2017) однако вносит новые погрешности, связанные с использованием различных систем кодирования попутных, особенно в части типов облаков и характеристик видимости. В этом смысле ситуация с оценкой долговременных измерений облачности над сушей и над районами с островными станциями, однородные данные для которых доступны за последнее столетие принципиально отлична (Chernokulsky et al. 2017).

Это имеет прямые следствия для оценок изменений радиационных потоков. Ограниченное количество параметров облачности в попутных наблюдениях позволяет применять только относительно грубые параметризации радиации, учитывающие только общую облачность (Синицын и Гулев 2017, 2018). В то же время проведенные совместно российскими и немецкими партнерами прямые измерения в рейсах научно-исследовательских судов в ходе программы “MORE” (Meridional Oceanic Radiative Experiment) (Kalisch and Macke 2008, Sinitsyn et al. 2011, Smirnov et al. 2011, 2012, Bentamy et al. 2017) показали, что для получения точных оценок потоков длинноволновой и коротковолновой радиации помимо общей облачности требуется информация о типах облаков и высоте нижней границы облаков, которые позволяют правильно учесть влияние оптических свойств облаков и характеристик прозрачности атмосферы на радиационные потоки.

Начиная с 2007-2009 гг. в рамках совместного российско-немецкого эксперимента “MORE”, немецкое исследовательское судно “Polarstern” и российские суда «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе» были оснащены высокоточной аппаратурой для измерений радиации и облачности над морем в ходе рейсов экспедиционных рейсов в Атлантическом океане, что позволило получать высокоточные данные о радиации и облаках. Сейчас эти данные охватывают уже почти 15 лет и позволяют с одной стороны получать новые параметризации радиационных потоков (Kanitz et al. 2013 Griesche et al. 2020 Hanschmann et al. 2012, Krinitsky et al. 2021), а с другой – проводить валидацию спутниковых измерений, доступных для Атлантики благодаря высокоточным спутниковым измерениям системы EUMETSAT – CMSAF (Sinitsyn and Gulev 2017, 2020, Krinitsky and Sinitsyn 2016), обеспечивающей ежедневные измерения потоков радиации и



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

характеристик облачности с разрешением 4 км, начиная с 2004 года, а для некоторых характеристик с 1983 года (рис. 1).

Рис 1. Примеры спутниковых продуктов системы EUMETSAT – CMSAF. Слева: климатическое поле коротковолновой радиации на поверхности по данным спутников SARAH системы EUMETSAT – CMSAF за период 1983-2017 гг., в центре: покрытие облачностью (cloud fraction) за май 2018 г. и среднемесячное поле коротковолновой радиации за май 2018 г.

Эти исследования показали, что крайне трудно проецировать точные параметризации радиационных потоков на достаточно ограниченные по количеству параметров характеристики облачности и продемонстрировали, что даже для реалистично неоднородных трехмерных облачных полей информация об облачном покрове и типе облаков существенно улучшает параметризацию нисходящих потоков коротковолновой радиации на поверхности моря (Schewski и Macke 2013).

Роль радиационных потоков на поверхности океана в моделировании изменчивости климата также остается крайне плохо исследованной. Booth et al. (2012) продемонстрировал сильную корреляцию между поверхностным радиационным воздействием взаимодействия аэрозолей и облаков и Североатлантическим колебанием в Атлантико-Европейском секторе, однако Gulev et al. (2013) показал, что данный сигнал скорее связан с турбулентными потоками. Связь между временной эволюцией радиационных потоков, облачности, аэрозолей и осадков была обнаружена Rotstajn and Lohmann (2002) and Ackerley et al. (2011), однако анализ данных по динамике внутритропической зоны конвергенции и связанных с ней среднеширотных процессов противоречит данной гипотезе (Hoerling et al. 2006). Воздействие облаков и аэрозолей на динамику потоков радиации на поверхности в Северной Атлантике (Dagan et al. 2020) хорошо отслеживается на масштабах межгодовой изменчивости, но крайне неопределенно на масштабах междекадной и мультидекадной изменчивости (Gulev et al. 2013, Bellomo et al. 2015, Bellomo and Clement 2015, Cherian and Quaas 2020).

Неопределенности в характеристиках изменчивости потоков радиации и облачности по данным наблюдений и реанализов проецируются на существенный разброс оценок изменчивости по данным моделирования. На проблемы представления облачности в моделях было обращено внимание еще в начале 1980-х гг. (Мохов, 1982, Мохов и др. 1994). Уже на заре развития моделей общей циркуляции атмосферы было отмечено, что облачность в различных моделях воспроизводится по-разному вплоть до нарушения фазы годового цикла, когда тенденция изменения облачности от сезона к сезону может различаться даже по знаку (Мохов и др., 1994).

Несмотря на развитие климатических моделей и улучшение блока параметризации радиации и облачности в циркуляционных моделях, облачность все равно остается плохо воспроизводимой переменной (Bedacht et al. 2007, Chernokulsky and Mokhov 2012, Liu and Key 2016). Понимание того, что радиация и облачность являются одними из наиболее проблематичных характеристик климатических моделей остается на протяжении последних 15 лет (Bonu et al. 2004, 2006, Wing et al. 2020), что существенно препятствует достоверности воспроизведения современного климата и его достоверному прогнозированию.

Шестое поколение Проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP6; Eyring et al.,



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

2016) включает модели, которые существенно лучше воспроизводят радиационные характеристики и параметры облачности по сравнению с периодом 2000-2013 гг., а также позволяет анализировать ансамблевые эксперименты для современного климата и различных сценариев, что также существенно улучшает точность. Более того, в последние годы стали доступны ансамблевые интегрирования международных проектов взаимного сравнения моделей радиационного переноса (RFMIP, Pincus et al., 2016) и взаимного сравнения процесс-ориентированных моделей (DAMIP, Gillett et al., 2016). Эти эксперименты обеспечивают огромный объем данных о характеристиках радиации и облачности в период 1850-2014 гг., включая моделирование влияния отдельных факторов воздействия, таких как аэрозоли, оптические свойства облаков, переходные радиационные воздействия (Cherian and Quaas 2020). Валидация этих моделей требует, однако столь же долговременных массивов, основанных на данных, которые в настоящее время отсутствуют и на создание которых на основе судовых наблюдений, направлен данный проект.

Таким образом, во всех аспектах изучения долгопериодной изменчивости облачности и радиационных потоков над океаном – расчетные методы для достоверных оценок радиационных потоков по характеристикам облачности, оценка долгопериодных изменений, валидация климатических моделей – главным, что сдерживает прогресс, является отсутствие долговременных однородных массивов характеристик облачности и радиации. В рамках данного проекта мы предполагаем объединить достижения немецких партнеров (TROPOS и LU) в области параметризации потоков радиации с экспертным уровнем построения однородных массивов наблюдений над океаном и анализа долговременных рядов, имеющимся у российского партнера (ИОРАН). Это позволит впервые реконструировать долгосрочные (за период 1880-2021) временные ряды характеристик облачности и радиационных потоков, и обеспечить новое видение роли потоков радиации в долговременных изменениях теплового баланса океана и оценки его влияния на климатические изменения на континентах.

Научные подходы и методы, используемые для решения задач проекта.

1. Долговременные сеточные массивы попутных наблюдений.

В соответствии с поставленными задачами проекта нами будут использоваться методы анализа данных наблюдений и построения долговременных сеточных массивов, физические методы создания высокоточных параметризаций радиационного переноса над океаном, статистические методы анализа долгопериодной изменчивости и диагностические подходы к анализу модельных интегрирований.

Информационную основу создания долговременного массива облачности и сеточных массивов характеристик облаков над океаном составит база данных морских гидрометеорологических наблюдений, частично основанная на архиве ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, Freeman et al. 2013, 2017), значительно обогащенная за счет недавней обработки уникального немецкого архива наблюдений DWD (рис. 2), ранее не включавшегося в ICOADS. Отметим, что включение архива DWD для периода 1880-1950 гг. является критическим, особенно в средних широтах северной и южной Атлантики (рис. 2). Количество наблюдений возрастает почти за порядок от 5-10 наблюдений в квадрате до 30-100 наблюдений, что позволяет существенно улучшить описание климатической изменчивости до 1950 года. При этом важно, что больший рост количества наблюдений отмечается в областях, плохо охваченных данными ICOADS.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Рис. 2 Количество наблюдений попутных судов в массиве ICOADS before (a) and после (b) объединения ICOADS с массивом наблюдений DWD.

Рис. 3. Вверху – пример записи метеонаблюдений из немецкого наблюдательного журнала с данными об облачности, видимости и других параметрах за 02.04.1939 г. Внизу - временное распределение общего количества данных об облачности (желтый цвет), количества данных с типами облаков и высотой нижней границы облаков (оранжевый цвет) и процент данных, включающих видимость и код погоды (синий цвет).

В то же время, обновленная база данных ICOADS требует существенно нового уровня контроля информации и коррекции ошибок, как в ICOADS, так и в DWD данных. В частности, проблему представляет изначальное использование как 10-бальной, так и 8-бальной (окта – модель) шкалы облачности в данных DWD, тогда как в данных ICOADS стандартом является 8-бальная шкала. Приведение одной шкалы наблюдений к другой, выполненное в ICOADS, приводит к искусственному уменьшению повторяемости сплошной облачности и увеличению частоты появления 2-х и 6-бальной облачности. Если, начиная с 1960-х годов, большая часть наблюдений передавалась в виде телеграмм через GTS (Global telecommunication system), то в период 1880-1950 годов исходные наблюдения доступны из судовых журналов, которые были отцифрованы в ICOADS. Поэтому для коррекции этих и других ошибок и неопределенностей (например, в долговременном архиве нами будут анализироваться исходные журналы наблюдений (рис. 3), составляющие более 23 МБ записей, алгоритмы машинного обучения (Krinitzky et al. 2021), а также ранее разработанные нами аналитические функции плотности распределения облачности над океаном (Aleksandrova et al. 2018), которые позволяют эффективно восстанавливать и корректировать судовые наблюдения над облачностью. Одновременно с облачностью будет выполнен анализ характеристик температур воздуха и воды и влажности, также принципиально важных для расчета радиационных потоков. При этом будут использованы подходы уже разработанные авторами (Gulev et al. 2007, Gulev and Belyaev 2012, Josey et al. 2014).

Еще одним важным моментом обработки исходных записей об облачности и других параметрах прилегающего слоя атмосферы станет формирование однодольных сеточных массивов, для чего будут использоваться методы минимизации ошибок репрезентативности, связанные с временной и пространственной неоднородностью количества наблюдений. Эти подходы основаны на использовании так называемого ре-сэмплинга, то есть стохастической симуляции однородного количества наблюдений методами Монте-Карло (Gulev and Belyaev 2012, Gulev 2013, Aleksandrova et al. 2018), которые позволяют уменьшить ошибку репрезентативности в 4-10 раз. Для пространственной оптимальной интерполяции будет использоваться модифицированный метод локальных процедур (Akima 1970, Gulev et al. 2013).

2. Параметризации радиационных потоков.

Следующей важной задачей будет разработка параметризаций потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности океана на основе высокоточных измерений и ее адаптация к применению с судовыми наблюдениями за облачностью. Мы будем использовать массив совместных измерений облаков и радиации на борту немецких («Polarstern») и российских НИС («Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе») в



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Атлантике и в Арктике (Таблица 1). Эти рейсы охватывают регулярные трансекты из Европы в Антарктиду и обратно с 2007 по 2019 год (рис. 4), а также арктические экспедиции PS106 (PASCAL) и PS122 (MOSAIC). Основными данными являются полносферные изображения неба, полученные каждые 15-60 секунд (Kalisch and Macke 2008, 2012, Krinitsky et al.2021), нисходящая широкополосная коротковолновая и длинноволновая радиация с временным разрешением от 1 до 10 секунд и нижняя граница облаков. Высоты облакомеров и лидаров, обеспечивающие мгновенные корреляции излучения и облачности, которые являются репрезентативными для горизонтального масштаба от 10 до 50 км.

Таблица 1. Перечень немецких рейсов Polarstern (синий цвет) с непрерывными наблюдениями за облаками, аэрозолями и радиацией и российских (желтый цвет) рейсов с визуализацией облаков и измерениями радиации, которые будут использоваться в проекте. PS - рейсы НИС «Polarstern», AI - рейсы НИС «Академик Иоффе», ASV – рейсы НИС «Академик Сергей Вавилов».

Рис. 4. Схемы наиболее часто используемых маршрутов рейсов (см. Таблицу 1) немецких и российских исследовательских судов в Атлантике. Маршруты рейсов наложены на ежечасный снимок излучения SW EUMETSAT - CMSAF за 8 июня 2014 года, демонстрирующий сильную изменчивость коротковолновой радиации за счет синоптической изменчивости.

Использование данных наблюдений, а также результаты исследования физических механизмов, управляющих потоками коротковолновой и длинноволновой радиации на морской поверхности, позволит построить новые параметризации радиационных потоков и адаптировать их к применению с данными наблюдений попутных судов. Для этого будут применяться современные методы анализа многопараметрических статистических зависимостей, а также методы машинного обучения, разработанные как немецкими, так и российскими группами (Криницкий и др. 2021). В частности эти методы будут использоваться для параметризации нелинейных количественных связей между характеристиками облаков и аэрозолей и результирующими радиационными потоками на поверхности. Рис. 5 показывает результаты параметризации радиации на основе только двух параметров – общей облачности и высоты Солнца (Kalisch and Macke 2012), однако такая зависимость существенно изменится, если будет учтена роль типов облаков. На рис. 5 показан пример, демонстрирующий, что облачность разных типов может изменять поток радиации вдвое при формально одном и том же количестве облаков.

Разработанные параметризации будут тестироваться в исследовательских рейсах НИС ИО РАН в Атлантическом океане в течение 2-го и 3-го года выполнения проекта (2023-2024), одновременно с проведением прямых измерений радиационных потоков с использованием как российского, так и немецкого оборудования, включая лидарные комплексы, высокоточные радиометры и пиргеометры. В частности, будут исследовано, насколько параметризации адекватно описывают условия ясного неба, в том числе в присутствии аэрозолей, а также зависимость радиационных потоков от типов облаков при сплошной или близкой к сплошной облачности. Это позволит проверить работоспособность параметризаций в различных условиях по независимым данным, то есть наблюдениям, которые не были использованы для разработки параметризаций.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Рис. 5. Слева - поверхностный поток коротковолновой радиации, как функция облачного покрова и зенитного угла Солнца на основе измерений (a) и параметризации нелинейной зависимости радиации от облачности (b). Справа – полносферные изображения облачного неба при полном закрытии неба облаками разных типов – Ns (c) и St (d), и, как следствие, существенно разных измеренных потоков коротковолновой радиации.

Также нами будут использоваться данные реанализов и моделирования с высоким разрешением, выполненные в ИОРАН в рамках проекта RAS-NAAD (Gavrikov et al. 2020) которые позволят проанализировать данные наблюдений с точки зрения отдельных синоптических ситуаций и режимов погоды, что позволит строить многомерные статистические зависимости для различных режимов. Новые параметризации позволят также учесть данные долгосрочных измерений аэрозолей. С этой целью судовые наблюдения видимости при штилевом ветре и условиях чистого неба (минимальное влияние морских брызг) будут использоваться, как прокси для измерений аэрозолей со спутников, которые затем можно будет связать с наблюдаемой радиацией по данным судовых измерений.

3. Долговременная реконструкция радиационных потоков на поверхности Северной Атлантики за период 1880-2021 гг.

Для выполнения долговременной реконструкции потоков и формирования сеточных массивов с различным разрешением разработанные и адаптированные параметризации будут использованы для расчетов потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на основе данных судовых наблюдений за период с 1880 г. При расчетах коротковолновых радиационных потоков по данным приводных метеорологических параметров из VOS нами будет применяться процедура виртуального «вращения часовой стрелки», чтобы избежать неопределенностей, связанных с неравномерным распределением данных VOS по времени суток и дням месяца. Информация о типах облаков и высоте нижней границы облаков, доступная из базы данных ICOADS-DWD, позволит нам применять параметризацию, учитывающую типы облаков, оптические свойства различных облаков, высоту нижней границы. Используя оценки видимости по данным судовых наблюдений, мы также учтем воздействие аэрозолей на радиационные потоки, в первую очередь, в условиях ясного неба. После проведения расчетов формирование сеточных массивов за период 1880-2021 гг. будет выполняться в рамках тех же процедур, что для облачности, то есть с использованием стохастической симуляции однородного количества наблюдений методами Монте-Карло и модифицированного метода локальных процедур.

Рис. 6. Доступные массивы данных о потоках энергии между океаном и атмосферой на поверхности за разные периоды (которые будут использоваться в проекте для тестирования и валидации полученных радиационных потоков: VOS (фиолетовый), реанализы (красный), спутниковые данные (синий) и гибридные массивы данных (зеленый).

Нами будет применяться усовершенствованная методология построения координатной сетки для долговременных массивов, что позволит разработать оптимальные сеточные массивы потоков радиации для Атлантического океана с грубым разрешением (5°) за период с 1880 г. и далее и с высоким разрешением (1° и $0,25^\circ$) для периодов 1950-2020 и 1970-2020 годов. Полученные сеточные массивы потоков коротковолновой и длинноволновой радиации с различным разрешением за период 1800-2021 гг. с оценками неопределенностей будут далее подвергнуты детально валидации и тестированию с



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

использованием альтернативных данных (рис.6). В качестве спутниковых продуктов для валидации будут использоваться массивы ERBE, HOAPS4, J-OFURO, MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>), а также данные EUMETSAT об облаках и радиации высокого разрешения CMSAF (<https://www.cmsaf.eu/EN/Overview/OurProducts/>), и облачные и радиационные данные ISCCP. Валидация будет выполнена за периоды времени от одного до трех десятилетий в зависимости от доступности данных и позволит количественно оценить неопределенности в реконструированных долговременных массивах облаков и потоков радиации по данным VOS.

4. Многолетняя и междекадная изменчивость радиационных потоков, их роль в формировании теплового баланса океана на различных масштабах.

Далее нами будет исследована роль радиационных потоков в многолетней изменчивости суммарных потоков на поверхности и их связь с измерениями теплосодержания океана. Мы будем использовать долговременные сеточные массивы характеристик облачности и потоков коротковолновой и длинноволновой радиации для количественной оценки изменчивости полного потока энергии на поверхности на масштабах от десятилетий до столетий. Долгосрочные реконструкции поверхностных турбулентных тепловых потоков будут взяты из работ российского коллектива (Gulev et al. 2013, Gulev and Latif 2015, Cronin et al. 2019). Эти исследования предоставили наблюдательные доказательства того, что в Северной Атлантике и на временных масштабах более 10 лет поверхностные турбулентные тепловые потоки управляются океаном, тогда как на более коротких временных масштабах верно обратное (атмосфера управляет изменчивостью потоков на границе океан-атмосфера), тем самым подтвердив гипотезу Бьеркнеса (1964). Однако эти результаты не учитывали вклад радиационных потоков, который может быть весьма значительным (например, Booth et al. 2012). Теперь, вооружившись долговременными реконструкциями потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, полученными в рамках проекта, мы количественно оценим этот вклад и предоставим более точные оценки изменчивости поверхностного теплового баланса в Атлантике, которая может быть далее связана с изменениями поверхностной температуры и теплосодержания океана (von Schuckmann et al. 2020) на разных масштабах. Для этого мы будем использовать анализ линейных трендов, многопараметрические статистики и сингулярные разложения (SVD), что обеспечит надежные оценки многолетней изменчивости суммарных потоков тепла над Атлантикой и поможет связать изменения этих потоков с основными модами климатической изменчивости, такими как Атлантическая мультидекадная осцилляция, Северо-Атлантическое колебание, а также зональные и меридиональные режимы изменчивости тропической Атлантики (Latif et al. 2006, Gulev et al. 2013).

Кроме этого особый интерес будет представлять анализ радиационных потоков и характеристик облачности в контексте основных атмосферных климатических феноменов в Атлантике. Мы рассмотрим связь характеристик облачности и радиации с поведением траекторий атлантических циклонов, в частности с феноменом отклонения основного шторм-трека к полюсу (Tilinina et al. 2013, 2018, Bender et al. 2012). Поскольку отклонение траекторий циклонов очень трудно обнаружить с помощью алгоритмов отслеживания циклонов (Tilinina et al. 2013, 2014), использование данных об облачности позволит получить более уверенные оценки этого феномена, считающегося одним из наиболее ярких проявлений наблюдаемых и прогнозируемых изменений климата. В свою очередь, отклонение траекторий циклонов к полюсу (и смещения облачных массивов) не может не оказывать влияния на тепловой баланс поверхности, что также будет исследовано на основе долговременной реконструкции потоков радиации. Еще одним приложением станет анализ роли радиационных потоков в формировании процессов вентиляции



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

поверхностного слоя океана в субтропических и средних широтах. До сих пор эти явления в основном анализировались с использованием данных с буев за периоды в несколько лет (Josey 2001). Созданные нами массивы позволят провести такой анализ за много десятилетний анализ с использованием сеточных массивов радиационных потоков, охватывающих всю область Атлантики. Для выполнения такого анализа мы разработаем композиты радиационных потоков, суммарного теплового баланса и облачности в циклонах (Tilinina et al. 2018) для периодов интенсивной вентиляции океана.

5. Оценка реалистичности воспроизведения облачности и радиации в климатических моделях.

Далее нами будет выполнено исследование реалистичности представления облачности и приземной радиации в климатических моделях и реанализах. Созданные в ходе проекта данные об облачности и радиации на поверхности, включая их связь со свойствами и типами облаков, будут использованы для оценки результатов реанализов и моделирования климата за последние 150 лет с целью добиться лучшего понимания роли радиационных процессов в изменениях климата в Северной Атлантике и над прилегающими континентами. Для этого будут использоваться 100-летние реанализы ERA2C и 20CR (Poli et al., 2016), а также и данные ансамбля моделей проекта CMIP6. Особое внимание будет уделено временной эволюции компонентов баланса потоков энергии на поверхности и динамики облаков, а также таким климатическим параметрам, как характеристики суточного хода над океаном, влагосодержание и осадки. Оценки позволят сопоставлять характеристики облачности и поверхностных радиационных потоков в долговременных реанализах и модельных данных (для «исторических» экспериментов) с одной стороны и в реконструированных характеристиках облачности и потоках радиации с другой. Это позволит установить закономерности изменений баланса энергии на поверхности и характеристик облаков, воспроизводимых моделями и реанализами, и, следовательно, оценить реалистичность параметризаций облачно-радиационных связей, используемых в моделях.

Далее будет выполнен анализ долговременных тенденций в характеристиках радиации и облачности, что позволит дискриминировать роль вынужденных (антропогенных) факторов и собственной изменчивости в формировании облаков и радиации в моделях. Первым аспектом в этом смысле является оценка тенденций облачности и характеристик видимости (как метрики аэрозолей) и их ковариаций (взаимодействия аэрозолей и облаков) в исторических экспериментах модельного ансамбля CMIP6 по сравнению с данными, причем акцент будет сделан на «историческое» моделирование с интерактивными аэрозолями и прямым включением соответствующих диагностических параметров, таких как оптическая толщина аэрозоля (AOD). Мы определим, в какой степени в моделях и данных наблюдений характеристики облачности и аэрозолей, а также потоки радиации на поверхности сопоставимы. Второй аспект - это обнаружение и увязка (с использованием результатов проектов DAMIP, и RFMIP) изменений в характеристиках облачности и связанных изменений в оптических диаграммах направленности с эффектами аэрозолей, парниковыми газами и многолетней естественной изменчивостью. Эта работа также будет включать многие дополнительные наблюдения попутных судов и модельные эксперименты с индивидуальными воздействиями (парниковый газ, аэрозоль), суммарными воздействиями (DAMIP), а также с оценками транзитных радиационных воздействий (RFMIP). Наконец, третий аспект - это исследование воздействия радиации и облачности на климат. Этот блок будет включать исследование диапазона суточных температур, который представляет особый интерес, поскольку на максимальные дневные температуры больше влияют взаимодействия аэрозоль-радиационное излучение и



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

аэрозоль-облака, тогда как на минимальную ночную температуру почти в равной степени влияют эти факторы и парниковый эффект (Quaas et al. 2004). Однако для достижения полного понимания необходимо тщательное разделение эффектов, поскольку важную роль играет также и естественная изменчивость характеристик облаков и водяного пара. Кроме того, мы будем стремиться оценить и количественно описать соответствующие удаленные связи между климатом Северной Атлантики - особенно изменчивостью облаков и радиации - с температурами и осадками в прилегающих континентальных регионах в долговременных реанализах и ансамбле моделей CMIP6.

Обоснование достижимости решения задач проекта и возможности получения ожидаемых результатов, достижение которых планируется в каждом отчетном году – описание должно обосновывать общий срок реализации проекта.

Достижимость решения поставленных задач и получения обозначенных результатов проекта определяется четкой проработкой методологий и научных подходов, представленных выше, а также четким планированием работ по проекту с разделением блоков работ между партнерами. В соответствии с целями и задачами проект будет разбит несколько основных рабочих пакетов (РП), включая подзадачи, сосредоточенные на основных вопросах: обработки данных, разработке параметризаций, реконструкции долгосрочных временных рядов радиационных потоков, анализе изменчивости климата и оценке климатических моделей.

РП1. Координация проекта (осуществляется совместно всеми партнерами – TROPOS, LU, ИОРАН). В рамках этого РП партнеры проекта будут координировать отдельные блоки проекта, корректировать определенные разделы рабочего плана, отслеживать рабочий процесс и результаты и оценивать их полноту, готовить промежуточные отчеты и заключительный отчет, а также организовывать рабочие встречи по проекту (стартовое совещание, 2 ежегодных проектных семинара и заключительное совещание по проекту).

РП2. Формирование глобальных долговременных данных об облачности на основе массивов ICOADS и DWD и создание сеточных массивов за период 1880-2021 гг. (ИОРАН – лидирующая роль, TROPOS и LU – участники).

Подзадача 2.1. Контроль и предварительная обработка объединенной базы данных (ICOADS и DWD) об облаках и видимости над Атлантикой за 1880-2021 гг.

Подзадача 2.2. Создание сеточных массивов характеристик облачности с разным разрешением (1880-2021 гг.) с оценками всех видов неопределенностей.

РП3. Параметризации потоков коротковолновой и длинноволновой радиации по данным прямых измерений и ее адаптация к использованию с судовыми наблюдениями (TROPOS – лидирующая роль, ИОРАН и LU – участники).

Подзадача 3.1. Инвентаризация наблюдательного компонента разработки параметризаций, включая совместные изменения облаков и радиации с использованием прецизионной аппаратуры на немецких и российских НИС и разработка пилотной версии параметризаций.

Подзадача 3.2. Исследование физических механизмов, управляющих потоками коротковолновой и длинноволновой радиации на морской поверхности и адаптация параметризаций радиационных потоков на поверхности моря к использованию с данными судовых наблюдений, а также тестирование параметризаций на основе данных



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

независимых экспедиционных наблюдений в течение 2-го и 3-го года выполнения проекта.

РП4. Реконструкция потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности Атлантики за последние 150 лет (ИОРАН – лидирующая роль, TROPOS и LU – участники).

Подзадача 4.1. Формирование массива мгновенных расчетных потоков радиации за период с 1800-2021 гг. на основе данных об облачности и метеорологических параметрах на поверхности и параметризаций разработанных в рамках РПЗ.

Подзадача 4.2. Сеточные массивы радиационных потоков за период 1800-2020 гг. с оценками неопределенностей на основе минимизации временных и пространственных неопределенностей выборки.

РП5. Исследование долговременных климатических тенденций и междекадной и межгодовой изменчивости поверхностных радиационных потоков и их роли в динамике суммарных тепловых потоков в Атлантике на различных временных масштабах (ИОРАН и TROPOS – лидирующая роль, LU - участник).

Подзадача 5.1. Роль радиационных потоков в долгопериодной и межгодовой изменчивости теплового баланса в Атлантике и связь радиационных потоков с температурой поверхности океана и изменениями теплосодержания.

Подзадача 5.2. Динамика облачности и радиационных потоков в Атлантическом океане и их связь с циркуляционными модами и основными климатическими феноменами в атмосфере и океане.

РП6. Оценка адекватности воспроизведения поверхностных радиационных потоков в исторических модельных экспериментах с климатическими моделями в рамках проекта CMIP6 и в многолетних реанализах (LU - лидирующая роль, TROPOS, ИОРАН - участники).

Подзадача 6.1. Оценка характеристик облачности и радиационных потоков на поверхности в климатических моделях и реанализах с акцентом на взаимосвязи между облаками и поверхностными радиационными потоками, включая реалистичность параметризаций.

Подзадача 6.2. Оценка климатических тенденций в характеристиках облачности и радиации атрибутирование сигналов в потоках радиации и облаках с использованием DAMIP и RFMIP и исследование воздействия радиации и облачности на климатическую изменчивость.

Временная организация данных рабочих пакетов и подзадач, а также связанные с подзадачами промежуточные и окончательные результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Временная организация работ по проекту для рабочих пакетов (WP) и подзадач (ST), а также промежуточных и окончательных результатов (D).

Диаграмма (таблица 2) предполагает, что мы начнем с концентрации усилий на РП2 (база данных характеристик облаков) и РПЗ (параметризация радиационных потоков), чтобы уже в конце первого года приступить к разработке технологии создания долговременных сеточных массивов радиационных потоков (РП4). Параллельно с разработкой технологии расчета потоков валидация параметризаций будет продолжаться, включая



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

исследовательские рейсы в конце второго и начале третьего года выполнения проекта. Одновременно с тестированием созданных сеточных массивов радиации (вторая половина второго года, Подзадача 4.2), мы начнем анализ многолетней и мультидекадной изменчивости (РП5), а также анализ экспериментов с климатическими моделями и многолетних реанализов (РП6), который будет запущен еще ранее, в середине второго года. Такая организация проекта позволит гарантировать достижимость выполнения его целей и задачи получение запланированных результатов.

Управление проектом

Эффективное управление проектом также станет основой его успешной реализации. Управление проектом будет осуществляться со-руководителями (Андреас Макке и Сергей Гулев), которые обеспечат административную и научную координацию проекта. У проекта будет также административный менеджер, отвечающий за оперативную координацию и тесно сотрудничающий с финансовыми администрациями TROPOS, LU и ИОРАН (а также с менеджерами финансирующих агентств). Координаторы проекта будут осуществлять взаимодействие с руководителями РП и специальной группой по управлению данными проекта. Рабочие встречи по проекту будут обеспечивать мониторинг текущего прогресса выполнения проекта и вносить при необходимости корректировки в план проекта и структуру рабочих групп. Между рабочими встречами по проекту координация и управление будут осуществляться посредством телеконференций и электронной почты. ИОРАН и TROPOS будут контролировать организационные, финансовые и научные аспекты, включая своевременную отчетность перед национальными финансирующими агентствами, завершение результатов и этапов, организацию рабочих встреч и предоставление результатов потребителям. Для каждого РП будет один руководитель и один со-руководитель, которые будут координировать выполнение подзадач РП. Руководители РП будут нести ответственность за обеспечение научного качества работы, а также за то, чтобы все основные промежуточные результаты были достигнуты своевременно. Руководители и соруководители РП будут тесно сотрудничать с административным менеджером проекта, обеспечивая управление на исполнительном уровне.

Рис. 7. Организационная структура проекта, показывающая взаимодействие партнеров в рамках РП (кроме РП1), результаты, получаемые в рамках РП (D), а также потоки данных / результатов между РП и сотрудничество с внешними партнерами проекта.

Общая организация проекта представлена на диаграмме (рис. 7). Она показывает, как результаты различных РП влияют на выполнение связанных WP, а также четко демонстрирует ответственность ИОРАН и TROPOS / LU за выполнение задач проекта и получение конкретных результатов. Из структуры проекта очевидно, что ORCA-4C может быть реализована только в тесном сотрудничестве между немецкими и российскими партнерами, поскольку практически все результаты (даже те, которые формально передаются отдельным партнерам) требуют участия обоих партнеров.

В течение срока проекта мы планируем тесное сотрудничество с внешними партнерами, не финансируемыми в рамках проекта, которые любезно согласились участвовать в проекте. Сотрудничество с NOAA / NCDC (Eric Freeman) имеет решающее значение для получения последних обновлений данных наблюдений ICOADS. Анализ моделей океана и данных наблюдений радиационных потоков будет обеспечен в сотрудничестве с LOPS (Брест, Франция, Anna Marie Tregurier). Подключение к проекту NASA/GSFC (Александр



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Смирнов) имеет решающее значение для получения последних обновлений измерений аэрозолей и облаков из сети AERONET. Сотрудничество с ECMWF важно для анализа облаков и радиации в экспериментах с глобальными климатическими моделями.

Актуальность и значимость проекта

Потоки энергии на границе океан-атмосфера представляют собой язык коммуникации между двумя средами (Gulev et al. 2013, Josey et al. 2013, Yu 2019) и управляют их взаимодействием и обратными связями на временных масштабах от дней до столетий. Изменчивость климата Атлантики, особенно Северной Атлантики, исключительно важна для понимания динамики глобального климата, поскольку глобальная циркуляция океана и ее влияние на энергетический, водный и углеродный циклы в значительной степени обусловлены глубокой конвекцией в Северной Атлантике. Для понимания динамики этих процессов критически важна роль тепловых потоков воздух-море в формировании наблюдаемых и прогнозируемых изменений теплосодержания океана. Постулируя, что «глобальное потепление - это потепление океана» (IPCC 2013), климатическое сообщество утверждает, что изменчивость состояния океана зависит от суммарного потока тепла на границе океан-атмосфера. В исследовании динамики энергообмена океан-атмосфера до сих пор основное внимание уделялось роли турбулентных потоков (Gulev et al., 2013, Cronin et al., 2019), что основано на предположении о большей интенсивности их изменчивости по сравнению с коротковолновой и длинноволновой радиацией.

Однако потоки радиации на верхней границе атмосферы и на поверхности океана доступны с высокой точностью только за последние несколько десятилетий благодаря спутниковым миссиям, таким как CERES (Loeb et al., 2020). Для более ранних периодов они оценены крайне неточно и могут быть рассчитаны только на основе характеристик облачности и атмосферы, наблюдаемых судами добровольных наблюдений (VOS), характеризующимися высоким уровнем случайных и систематических погрешностей, связанных с практикой наблюдений и неоднородностью выборки, уровень которых возрастает в период до 1960-х годов, (Norris 1999, Bedacht et al. 2007, Bellomo et al. 2014, Aleksandrova et al. 2018). Более того, параметризации радиационных потоков, применяемые для массовых расчетов, основаны исключительно на информации об общем бале облачности и очень неточны (Dobson and Smith 1988, Gulev 1995, Josey et al. 2003, Kalish and Macke 2008, 2012). Прогресс в параметризации турбулентных потоков (Cronin et al. 2019) и долговременные реконструкции рядов турбулентных тепловых потоков (Gulev and Belyaev 2012, Gulev et al. 2013) привел сегодня к ситуации, когда турбулентные тепловые потоки нам известны с более высокой точностью, чем радиационные. Рис. 8 (Yu 2019) наглядно демонстрирует, что даже для десятилетия 2000-2010 гг., характеризующегося наиболее точными данными, разброс оценок радиационных потоков сопоставим или даже больше (например, в средних широтах) по сравнению с турбулентными потоками, что делает оценки суммарного теплового баланса океана (то есть суммы турбулентных и радиационных потоков) весьма неопределенными.

Рис. 8. Зональные средние значения суммарного теплового потока на поверхности океана (Q_{net}) (b), суммарного потока радиации ($SW - LW$) (c) и суммы турбулентных потоков явного и скрытого тепла ($LH + SH$) (d) в различных массивах данных за 2000-2010 гг. Представлены оценки для современных реанализов (NCEP1, NCEP2, 20CR, CFSR, ERA-20C, ERA-Interim, JRA-55, NERRA, MERRA-2), спутниковой радиации по данным CERES



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

и ISCCP, данным NOC (Национальный центр океанографии Великобритании), массива OAFlux-1 в относительно низком и высоком разрешениях (Из работы Yu 2019).

Таким образом, улучшение точности расчетов коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности океана и создание длительных временных рядов радиационных потоков имеет решающее значение для количественной оценки наблюдаемой изменчивости климата и понимания механизмов изменений в океане и атмосфере (von Schuckmann et al., 2020). Отсутствие долговременных массивов радиационных потоков не позволяет понять механизмы вынужденной и собственной изменчивости климата и препятствует совершенствованию глобальных климатических моделей, демонстрирующих очень высокие погрешности именно в радиационных потоках (Bonu et al. 2006), что ограничивает способность моделей эффективно учитывать роль обмена энергии между океаном и атмосферой в динамике климата.

Это определяет высокую актуальность нашего проекта, направленного на создание таких массивов и их использование для установления механизмов долгопериодной изменчивости радиационных потоков на поверхности океана и их роли в формировании теплового баланса в различные периоды времени.

Значимость проекта для развития исследований в области динамики климата океана, его измерений и влияния на климат Земли обусловлена тем, что

- (1) впервые будут получены долговременные реконструкции облачности и радиационных потоков на границе океан-атмосфера в Атлетическом океане за период с 1880 года по 2021 год, что позволит впервые провести инвентаризация теплового баланса океана и атмосферы на основе независимых массивов данных;
- (2) впервые будут разработаны и апробированы высокоточные параметризации радиационных потоков на поверхности океана и выполнена их валидация на основе уникального массива судовых наблюдений российского и немецкого партнеров, что позволит в дальнейшем использовать данные параметризации для конфигураций моделей климата;
- (3) впервые глобально и регионально проинтегрированные потоки радиации и теплового баланса на поверхности Атлантического океана будут получены из нескольких независимых расчетных методов и независимых источников данных, включая косвенные оценки с погрешностями, сравнимыми с оценками теплового баланса атмосферы;
- (4) впервые будет выполнен анализ долгопериодных трендов, а также декадной и мультидекадной изменчивости в потоках радиации на поверхности океана и характеристиках облачности оценка роли радиационных потоков в формировании суммарного теплового баланса Атлантического океана на различных временных масштабах;
- (5) проект даст возможность впервые оценить реалистичность потоков коротковолновой и длинноволновой радиации в исторических экспериментах с климатическими моделями (проект CMIP6) и в столетних реанализах (20CR, ERA-CLIM) и получить оценки неопределенностей радиационного обмена в моделях и реанализах, связанных с параметризациями радиационного обмена и облаков

Проект полностью соответствует существующим мировым тенденциям в области взаимодействия океана и атмосферы. В табл. 3 приводятся оценки различных компонентов радиационного потока тепла в атмосфере по данным различных авторов. Хорошо видно насколько устойчивыми остаются относительные оценки пропускания радиации и ее



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

аккумуляции, меняясь соответственно в диапазонах 0.54-0.56 и 0.48-0.49, однако в сумме всегда давая больше единицы, что, собственно, и предполагает существование missing energy, (так называемый Earth Energy Imbalance, EEI). Исключение составляет лишь оценка Hatzianastassiou et al. (2005), однако она была получена на основе данных о радиации, основанных на BSRN (Baseline Surface Radiative Network) и их интерполяции, что вносит существенную погрешность в интегрирование (Loeb et al. 2014). Если верить остальным оценкам из табл. 3, то возникает естественный вопрос: куда девается missing energy, и какой компонент климатической системы получает в основном эту энергию?

Таблица 3. Глобальные оценки превращение коротковолновой радиации в атмосфере Земли (Вт/м²) по данным различных авторов. Для пропускания и поглощения в атмосфере приведены как абсолютные, так и относительные (в долях единицы) оценки.

Таким образом, в современных мировых исследованиях имеется ясная направленность на достоверное определение радианных потоков и в этом смысле Северная Атлантика является наиболее привлекательным объектом, поскольку именно здесь происходят наиболее сильные изменения океана.

Новизна проекта определяется тем, что будут использованы последние достижения в области анализа свойств облаков и физики переноса излучения над океаном (Hanschmann et al. 2012, Heinze et al., 2017; Costa Surós et al., 2020), которые позволяют разработать более точные параметризации потоков радиации на поверхности. Кроме того, последние обновления глобальной базы данных ICOADS в связи с включением данных наблюдений, собранных Немецкой метеорологической службой (Deutscher Wetterdienst, DWD) (Freeman et al. 2017, Gulev and Freeman 2017) дают возможность использовать информацию об облаках, включая типы облаков, высоту нижней границы облаков и видимость, начиная с 1920-х годов, а для некоторых регионов (включая Атлантику) - с конца XIX века. Это позволяет объединить достижения в области физики облаков и переноса излучения на основе высокоточных полевых наблюдений (Macke et al., 2017) и моделирования (Heinze et al., 2017; Costa Surós et al., 2020) с прогрессом в создании массивов данных наблюдений (Gulev and Belyaev 2012? Gulev et al. 2013, Gulev and Latif 2015, Aleksandrova et al. 2018). Это позволит впервые создать многолетние массивы радиационных потоков для анализа долгопериодной изменчивости обмена энергией на границе океана и атмосферы за последние 100-150 лет.

Данные об облаках и радиации, собранные Polarstern и российскими научными судами используются сегодня в рамках проекта OCEANET (Griesche et al.2020), что позволяет осуществлять непрерывное вертикальное профилирование облаков в соответствии со стандартами ASTRIS Европейской дорожной карты и разрабатывать точные параметризации радиационных потоков, опираясь на расширенные характеристики облаков, помимо облачного покрова.

Проект имеет большую практическую значимость для достижения показателей подпрограммы 4 ("Формирование и реализация комплексных научно-технических программ по приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации, определенным в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, а также научное, технологическое и инновационное развитие по широкому спектру направлений") государственной программы и приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. В части обеспечения передачи научных знаний для развития технологий, продуктов (товаров, услуг) по широкому спектру направлений



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

научно-технологического и инновационного развития проект позволит создать уникальный массив данных, который будет использоваться для валидации прогностических климатических моделей, а также оперативных систем мониторинга, основанных, в том числе, на спутниковых измерениях. Помимо чисто научных результатов, созданные в рамках проекта массивы данных позволят оперативно оценивать тенденции климатических измерений и будут использованы для создания перспективных наблюдательных систем за состоянием океана и его взаимодействия с атмосферой.

Научный задел по проекту

Участники проекта, как с российской, так и с немецкой стороны, имеют существенный многолетний задел в области исследований облачности и радиации над морем.

Российская группа на базе П.П. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИОР АН) под руководством член-корр. РАН С. К. Гулева имеет многолетний опыт создания долговременных массивов данных об океане и атмосфере, разработки алгоритмов обработки данных попутных наблюдений и оценки неопределенностей в потоках энергии океан-атмосфера (Gulev et al. 2007, Gulev and Grigorieva 2006, Gulev and Freeman 2017, Grigorieva et al. 2019, Aleksandrova et al. 2018). В части методологий создания массивов и коррекции данных судовых наблюдений ИОРАН разработал новые функции распределения вероятностей для поверхностных турбулентных потоков (Gulev and Belyaev 2012), которые открыли путь для обнаружения зависимостей механизма взаимодействия океана и атмосферы от масштаба времени (Gulev et al., 2013, Gulev and Latif 2015). Подход, основанный на анализе аналитических функций распределения, был затем распространен на анализ полей облачности (Aleksandrova et al. 2018), что особенно важно для данного проекта. Российские ученые ИОРАН также имеют большой опыт анализа спутниковых наблюдений за радиацией и облачностью, включая их сопоставление с судовыми наблюдениями (Синицын и Гулев 2017б 2018), что также принципиально важно для реализации проекта. Ученые ИОРАН также активно разрабатывают новые методы измерения радиации и облачности в море, включая применение методов машинного обучения (Криницкий и др. 2021). Эти исследования были обобщены в коллективной монографии (Криницкий и др. 2018).

Российская группа также имеет обширный опыт валидации приземных потоков на основе результатов повторного анализа, спутниковых продуктов и наблюдений на местах в рамках нескольких крупномасштабных международных проектов (Bentamy et al., 2017, Cronin et al., 2019). Группа ИОРАН также имеет большой опыт моделирования атмосферы и океана с высоким разрешением. Недавно созданный ретроспективный анализ Северной Атлантики NAAD (North Atlantic Atmospheric Downscaling, Gavrikov et al. 2020, Verezhemskaya et al. 2021) позволил впервые получать 4-мерные поля над акваторией Северной Атлантики с высоким разрешением (14 км) за 40 лет с 1979 по 2018 гг., включая все характеристики облаков и излучения, которые также будут использоваться для валидации в ORCA-4C. Кроме того, ИОРАН является признанным лидером в области исследования отклика атмосферных процессов на потоки на границе океан-атмосфера. Здесь надо упомянуть работы по динамике циклонической траекторий (Tilinina et al. 2013, 2014, 2018), а также анализ роли переносов влаги в связи с сигналами в океане (Zveryaev and Hannachi 2017, 2021, Zveryaev and Arkhipkin 2019). Эти работы станут основой исследований в рамках РПБ данного проекта, направленного на анализ климатических откликов на океанский сигнал.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Участники проекта с российской стороны входят в состав многих управляющих и консультативных органов и советов имеют многочисленные дипломы и награды (см. информацию в соответствующей таблице заявки). Руководитель проекта С.К.Гулев является координирующим ведущим автором 6-го Оценочного Доклада Межправительственно Группы Экспертов по изменениям климата (МГЭИК, ИРСС).

В распоряжении заявителя имеются все необходимые материальные средства для успешного выполнения проекта. Группа российских ученых располагает комплексов измерительной аппаратуры потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, включая радиометры и пиргеометры Kipp&Zonen, а также пульсационную аппаратуру МЕТЕК. Кроме того, российская группа располагает полнообзорными облачными камерами, в том числе и собственной разработки (защищена патентом), а также комплексом матобеспечения для обработки спутниковых снимков. Это оборудование будет использовано для валидации разработанных параметризаций в ходе экспедиционных рейсов.

Российская группа также располагает всеми необходимыми базами данных, включая доступ к многолетним массивам реанализов, базам исторических данных ICOADS, спутниковым данным, оборудованием, программным обеспечением, а главное экспертными знаниями и опытом выполнения подобных работ (см. выше). В распоряжении коллектива имеются вычислительные мощности, как на компьютерах ИОРАН, так и ЦКП РАН, и МГУ (компьютеры ЛОМОНОСОВ и ЛОМОНОСОВ-II). ИОРАН располагает мощной вычислительной векторной платформой CRAY CX1 - Xeon X5670 с 800 вычислительными узлами. Кроме того, в распоряжении коллектива имеются мощная многопроцессорная LINUX - платформа среднего класса с 8-ми ядерными процессорами и оперативной памятью 512 Gb. Эти компьютеры позволяют не только эффективно осуществлять расчет параметров радиационных потоков, но и обеспечивать выполнение численных экспериментов с климатическими моделями. Проект предлагает обработку очень большого объема разнородной информации и, соответственно, выдвигает требования к накопителям информации. В настоящее время коллектив, помимо массива RAID-дисков на 1.3 ПБ, располагает общим объемом SCSI устройств в 280 ТБ на LINUX платформах и более 400 ТБ на Windows – платформах.

Немецкая группа, в которую входят ученые из TROPOS (проф. д-р. Андреас Макке) и Института метеорологии Лейпцигского университета (LU, проф. д-р Йоханнес Кваас), являются мировыми лидерами в области моделирования радиации, облаков и аэрозолей, а также наблюдений радиационных процессов в атмосфере на всех масштабах (от микрофизического до глобального). Проф. Макке является директором Лейбницкого института тропосферных исследований TROPOS, где он возглавляет отдел физики атмосферы. Он внес фундаментальный вклад в исследования пространственно-временной изменчивости гидрометеоров и облаков и их роли в радиационных характеристиках атмосферы. Им разработаны параметризации рассеяния света для несферических частиц в облаках (Maske and Muinonen 2004) и переноса излучения для неоднородных облаков (Cahalan et al. 2005), которые широко используются в научном сообществе. Он инициировал проект OCEANET по долгосрочным наблюдениям за облаками, аэрозолями и радиацией на борту НИС Polarstern. А. Макке также руководил крупнейшей в Германии полевой метеорологической кампанией по исследованию радиации и облачности HOPE (Maske et al., 2017). Группа Андреаса Макке в TROPOS является координирующим институтом немецкого национального проекта дорожной карты «Инфраструктура исследования аэрозолей и следовых газов» ACTRIS-D, который исследует роль облаков в радиационном взаимодействии океана и атмосферы в различных районах.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Проф. Кваас имеет фундаментальные результаты в области исследования роли облаков и взаимодействий аэрозолей и облаков в динамике радиационных потоков над океаном и изменениях климата. Им также выполнены широко известные и активно цитируемые работы в области моделирования климата с особым акцентом на использование наблюдений для оценки моделей, включая спутниковые данные (например, Quaas et al. 2009; 2020; Kretzschmar et al., 2019). Особое значение для ORCA-4C имеет опыт проф. Квааса в обнаружении и атрибуции климатических изменений (Quaas et al. 2004; Cherian and Quaas, 2020), использовании данных для понимания роли облачных структур в радиационных потоках (Cherian et al. 2014; Cherian and Quaas 2020) и оценке относительной роли парниковых газов и аэрозолей (Dufresne et al. 2005; Baker et al. 2015).

Немецкий коллектив располагает уникальной исследовательской системой Облачной башней-лабораторией (Cloud Tower Laboratory), которая будет использоваться в рамках проекта для разработки параметризаций физических процессов в облачных системах над океаном. TROPOS также владеет мобильной исследовательской станцией «Melpitz» PollyNet, а также мобильной океанской системой LACROS (Leipzig Aerosol and Cloud Remote Observation System), наблюдения которой будут использоваться в рамках проекта. Кроме того, TROPOS обладает мощным суперкомпьютером Fujitsu PrimeQuest 3800B2 с более чем 2000 ядер и большим объемом дискового пространства, который также будет использоваться для работ в рамках проекта.

Важно отметить, что ученые IORAS и TROPOS / LU наладили долгосрочное сотрудничество, начиная с 2008 года, когда Андреас Макке и Сергей Гулев организовали совместную программу наблюдений MORE (Meridional Atlantic Radiation Experiment, Синицын и др., 2006), в результате которой были получены данные на 20 разрезах в Атлантике с прямыми измерениями радиации и облачности, составляющие уникальную базу данных для использования в проекте. На рис. 9 мы приводим скрин-шоты первых публикаций по программе MORE, ставшей на полтора десятилетия основой исследования радиационных потоков над поверхностью Мирового океана.

Рис. 9 Скрин-шоты первых публикаций по программе MORE, ставшей на полтора десятилетия основой исследования радиационных потоков над поверхностью Мирового океана.

Результатом совместных работ стало большое количество совместных рецензируемых статей и полевые кампании на борту российских и немецких исследовательских судов. В работе Bedacht et al. (2007) Гулев и Макке выполнили первую проверку облачности реанализа по данным наблюдений судовых наблюдений. Позже Макке и Гулев совместно участвовали в международной деятельности AERONET, направленной на измерение морских аэрозолей, валидацию моделей аэрозолей и поиск со спутников (Smirnov et al. 2011, 2012). Также российские и немецкие ученые совместно участвовали в международных проектах по валидации потоков тепла над океаном, будучи соавторами в высокоцитируемых публикациях (Bentamy et al. 2017, Cronin et al. 2019). Сергей Гулев и Йоханнес Кваас очень тесно сотрудничают в течение последних 3 лет, будучи ведущими авторами (проф. Гулев в качестве ведущего автора-координатора) 6-го оценочного доклада МГЭИК в главе «Изменения климатической системы» (Gulev et al. 2021) в основном сосредоточены на радиационных потоках, облаках и аэрозолях. Таким образом, ORCA-4C является естественным развитием долговременного сотрудничества российский и немецких ученых.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Список литературы

- Ackerley et al. 2011: Sensitivity of twentieth-century Sahel rainfall to sulfate aerosol and CO₂ forcing. *J. Climate* 24, 4999–5014.
- Aleksandrova et al. 2018: Probability distribution for the visually observed fractional cloud cover over the ocean. *J. Climate*, 31, 3207–3232.
- Aleksandrova, M. P., Sinitsyn, A. V., & Gulev, S. K. (2017). Climate patterns of short-wave solar radiation over oceans based on a new parameterization. *Oceanology*, 57(2), 225–228. doi:10.1134/S0001437017020011
- Baker et al., 2015: Climate responses to anthropogenic emissions of short-lived climate pollutants, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8201–8216.
- Bedacht et al. 2007: Intercomparison of global cloud cover fields over oceans from the VOS observations and NCEP/NCAR reanalysis. *Int. J. Climatol.* 27, 1707–1719.
- Bellomo and Clement 2015: Evidence for weakening of the Walker circulation from cloud observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 7758–7766.
- Bellomo et al. 2014: Observational and model estimates of cloud amount feedback over the Indian and Pacific Oceans. *J. Climate*, 27, 925–940.
- Bender et al. 2012: Changes in extratropical storm track cloudiness 1983–2008: observational support for a poleward shift. *Clim Dyn* 38, 2037–2053.
- Bentamy et al. 2017: Review and assessment of latent and sensible heat flux accuracy over the global oceans. *Remote Sens. Environ.* 201, 196–218.
- Bjerknes 1964: in *Advances in Geophysics Vol. 10* (eds Landberg, H. E. & van Mieghem, J.) 1–82.
- Bony S., J. L. Dufresne, H. Le Treut, J.J. Morcrette, C. Senior. On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Clim. Dyn.*, 2004, 22, 71–86, doi: 10.1007/s00382-003-0369-6.
- Bony, S., et multi. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, 2006, 19, 3445–3482
- Booth et al. 2012: Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability, *Nature*, 484, 228–233.
- Cahalan et al. (2005) The International Intercomparison of 3D Radiation Codes (I3RC): Bringing together the most advanced radiative transfer tools for cloudy atmospheres. *Bull. Amer. Met. Soc.* 86, 1275–1294.
- Calbó et al. 2016: Climatology and changes in cloud cover in the area of the Black, Caspian, and Aral Seas (1991–2010): A comparison of surface observations with satellite and reanalysis products. *Int. J. Climatol.*, 36, 1428–1443.
- Cherian and Quaas, 2020: Trends in AOD, clouds and cloud radiative effects in satellite data and CMIP5 and CMIP6 model simulations over aerosol source regions, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087132.
- Cherian et al. 2014: Pollution trends over Europe constrain global aerosol forcing as simulated by climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2176–2181.
- Chernokulsky, A. V., Esau, I., Bulygina, O. N., Davy, R., Mokhov, I. I., Outten, S., & Semenov, V. A. (2017). Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late nineteenth century. *Journal of Climate*, 30(6), 2103–2120. doi:10.1175/JCLI-D-16-0329.1
- Costa Surós et al., 2020. Detection and attribution of aerosol-cloud interactions in large-domain large-eddy simulations with the ICOSahedral Non-hydrostatic model, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 5657–5678.
- Cronin et al., 2019: Air-Sea Fluxes With a Focus on Heat and Momentum. *Frontiers Marine Sci.*, 6, 430.
- Dagan et al., 2020: Aerosol forcing masks and delays the formation of the North Atlantic warming hole by three decades. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL090778.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

- Dallafior et al. 2015: Dimming over the oceans: Transient anthropogenic aerosol plumes in the twentieth century. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3465–3484.
- Dobson and Smith 1988: Bulk models of solar radiation at sea. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114, 165–182.
- Dolinar et al. 2016: Evaluation and intercomparison of clouds, precipitation, and radiation budgets in recent reanalyses using satellite-surface observations. *Climate Dyn.*, 46, 2123–2144.
- Dufresne et al. 2005: Contrast of the climate effects of anthropogenic sulfate aerosols between the 20th and 21st century, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21703.
- Eastman and Warren, 2014: Diurnal cycles of cumulus, cumulonimbus, stratus, stratocumulus, and fog from surface observations over land and ocean. *J. Climate*, 27, 2386–2404.
- Eastman et al. 2011: Variations in cloud cover and cloud types over the ocean from surface observations, 1954–2008. *J. Climate*, 24, 5914–5934.
- Eyring et al. 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958.
- Freeman et al. 2017: ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record. *Int. J. Climatol.*, 37, 2211–2232.
- Gavrikov et al. 2020: RAS-NAAD: 40-year high resolution North Atlantic atmospheric hindcast for multipurpose applications (New dataset for the regional meso-scale studies in the atmosphere and the ocean). *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 59.
- Gillett et al. 2016: The Detection and Attribution Model Intercomparison Project (DAMIP v1.0) contribution to CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3685–3697.
- Griesche et al. 2020: Application of the shipborne remote sensing supersite OCEANET for profiling of Arctic aerosols and clouds during Polarstern cruise PS106, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 5335–5358.
- Gulev and Belyaev, 2012: Probability distribution characteristics for surface air-sea turbulent heat fluxes over the global ocean. *J. Climate*, 25, 184–206.
- Gulev and Freeman, 2017: Tracking progress in marine climatology. *Int. J. Climatol.*, 37, 5, 2209–2219.
- Gulev and Grigorieva 2006: Variability of the winter wind waves and swell in the North Atlantic and North Pacific as revealed by the Voluntary Observing Ship data. *J. Climate*, 19, 5667–5685.
- Gulev et al. 2007: Estimation of the impact of sampling errors in the VOS observations on air-sea fluxes. Part I. *J. Climate*, 20, 279–301.
- Gulev et al. 2013: North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales. *Nature*, 499, 464–467.
- Hahn et al. 2001: ISCCP cloud properties associated with standard cloud types identified in individual surface observations. *J. Climate*, 14, 11–28.
- Hanschmann et al. 2012: Evaluation of the shortwave cloud radiative effect over the ocean by use of ship and satellite observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 12243–12253.
- Heinle et al. 2010: Automatic cloud classification of whole sky images. *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 557–567.
- Heinze et al., 2017: Large-eddy simulations over Germany using ICON: A comprehensive evaluation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 143, 69–100.
- Hoerling, et al. 2006: Detection and Attribution of Twentieth-Century Northern and Southern African Rainfall Change, *J. Climate*, 19, 3989–4008.
- IPCC 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC 2021: *The Physical Science Basis. The 6th Assessment Report*. Under final submission.
- Josey 2001: A comparison of ECMWF, NCEP–NCAR, and SOC surface heat fluxes with moored buoy measurements in the subduction region of the northeast Atlantic. *J. Clim.* 14, 1780–1789.
- Josey et al. 2003: A new formula for determining the atmospheric longwave flux at the ocean



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

surface at mid-high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 108, 3108.

Josey et al. 2013: Exchanges through the ocean surface. In: "Ocean Circulation and Climate. A 21st century perspective" (second edition). Ed. G. Siedler, S. Griffies, J. Gould, J. Church, Academic Press, 115-140.

Kalisch and Macke 2008: Estimation of the total cloud cover with high temporal resolution and parametrization of short-term fluctuations of sea surface insolation, *Meteorol. Z.*, 17, 5, 603-611.

Kalisch and Macke 2012: Radiative budget and cloud radiative effect over the Atlantic from ship-based observations, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2391-2401.

Kanitz et al. 2013: Radiative effect of aerosols above the northern and southern Atlantic Ocean as determined from shipborne lidar observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 12, 556–12,565.

Kent and Berry 2005: Quantifying random measurement errors in Voluntary Observing Ship meteorological observations. *Int. J. Climatol.* 25, 843–852.

Kretzschmar et al. 2019: Arctic clouds in ECHAM6 and their sensitivity to cloud microphysics and surface fluxes, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 10571-10589.

Krinitzkiy, M. A., & Sinitsyn, A. V. (2016). Adaptive algorithm for cloud cover estimation from all-sky images over the sea. *Oceanology*, 56(3), 315-319. doi:10.1134/S0001437016020132

Krinitzkiy et al. 2021: On the Generalization Ability of Data-Driven Models in the Problem of Total Cloud Cover Retrieval. *Remote Sens.* 13(2).

Latif et al. 2006: Is the Thermohaline Circulation Changing?, *J. Climate*, 19, 4631–4637.

Liu and Key 2016: Assessment of Arctic cloud cover anomalies in atmospheric reanalysis products using satellite data. *J. Climate*, 29, 6065–6083.

Loeb et al. 2020: New Generation of Climate Models Track Recent Unprecedented Changes in Earth's Radiation Budget Observed by CERES. *Geophys. Res. Lett.* (in press).

Macke A., Muinonen K. (2004) Polarized Light Scattering by Large Nonspherical Particles. In: Videen G., Yatskiv Y., Mishchenko M. (eds) *Photopolarimetry in Remote Sensing*. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, vol 161. Springer, Dordrecht.

Macke et al., 2017: The HD(CP)² Observational Prototype Experiment (HOPE) – an overview, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 4887–4914.

Norris 1999: On trends and possible artifacts in global ocean cloud cover between 1952 and 1995. *J. Climate*, 12, 1864–1870.

Norris et al. 2016: Evidence for climate change in the satellite cloud record. *Nature*, 536(7614), 72-75.

Paulot et al. 2018: Changes in the aerosol direct radiative forcing from 2001 to 2015: observational constraints and regional mechanisms, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 13265–13281.

Pincus et al., 2016: The Radiative Forcing Model Intercomparison Project (RFMIP): experimental protocol for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3447–3460.

Poli et al., 2016: ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century, *J. Climate*, 29, 4083-4097.

Quaas et al. 2004: Treut, Impacts of greenhouse gases and aerosol direct and indirect effects on clouds and radiation in atmospheric GCM simulations of the 1930 – 1989 period, *Clim. Dyn.*, 23, 779-789.

Quaas et al. 2009: Aerosol indirect effects - general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8697-8717.

Quaas et al. 2020: Constraining the Twomey effect from satellite observations: Issues and perspectives, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 15079-15099.

Rémillard and Tselioudis 2015: Cloud Regime Variability over the Azores and Its Application to Climate Model Evaluation, *J. Climate*, 28, 9707-9720.

Rossow and Schiffer, 1991: ISCCP cloud data products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 2–20

Rossow et al. 2005: Tropical climate described as a distribution of weather states indicated by



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

distinct mesoscale cloud property mixtures. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21812.

Rotstayn & Lohmann 2002: Tropical rainfall trends and the indirect aerosol effect, *J. Climate*, 15, 2103-2116.

Schewski and Macke 2003: Correlation between domain averaged cloud properties, and solar radiative fluxes for three-dimensional inhomogenous mixed phase clouds. *Meteorol. Z.* 12, 293-299.

Sinitsyn et al. 2006: MORE cruises launched, *Flux news*, 1, 11-13

Sinitsyn, A. V., & Gulev, S. K. (2017). Comparison of in-situ and satellite data of surface incoming short-wavelength radiation for the atlantic ocean during 2004–2014. *Oceanology*, 57(2), 239-244. doi:10.1134/S0001437017020199

Sinitsyn, A. V., & Gulev, S. K. (2020). Short-wave radiation above the ocean based on integral parametrization and satellite data on the amount of cloud cover. *Doklady Earth Sciences*, 490(2), 104-109. doi:10.1134/S1028334X20020142

Smirnov et al. 2011: Maritime aerosol network as a component of AERONET – first results and comparison with global aerosol models and satellite retrievals, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 583–597.

Smirnov et al. 2012: Effect of wind speed on aerosol optical depth over remote oceans, based on data from the Maritime Aerosol Network, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 377–388.

Stevens et al., 2020: Large-eddy and storm resolving models for climate prediction - the added value for clouds and precipitation, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 98.

Tilinina et al. 2018: Association of the North Atlantic surface turbulent heat fluxes with midlatitude cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 3691–3715.

von Schuckmann et al., 2020: Heat stored in the earth system: Where does the energy go? *Earth System Science Data*, 12(3), 2013-2041.

Wei et al., 2019: Intercomparison in spatial distributions and temporal trends derived from multi-source satellite aerosol products, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 7183–7207.

Wendisch et al., 2019: The Arctic Cloud Puzzle: Using ALOUD/PASCAL Multi-Platform Observations to Unravel the Role of Clouds and Aerosol Particles in Arctic Amplification, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 100, 841-871.

Wild et al. 2005: From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science*, 308, 847–850.

Wing, A. A., Stauffer, C. L., Becker, T., Reed, K. A., Ahn, M. -, Arnold, N. P., . . . Zhao, M. (2020). Clouds and convective self-aggregation in a multimodel ensemble of radiative-convective equilibrium simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(9) doi:10.1029/2020MS002138

Wylie et al. 2005: Trends in Global Cloud Cover in Two Decades of HIRS Observations, *J. Climate*, 18, 3021-3031.

You et al. 2014: Comparison of NCEP/NCAR and ERA-40 total cloud cover with surface observations over the Tibetan Plateau. *Int. J. Climatol.*, 34, 2529–2537.

Yu 2019: Global air-sea fluxes of heat, fresh water, and momentum: Energy budget closure and unanswered questions. *Annual Review of Marine Science*, 11, 227-248.

Zveryaev, I. I., & Arkhipkin, A. V. (2019). Leading modes of interannual soil moisture variability in european russia and their relation to regional climate during the summer season. *Climate Dynamics*, 53(5-6), 3007-3022. doi:10.1007/s00382-019-04677-5

Zveryaev, I. I., & Hannachi, A. A. (2021). Summertime variability of mediterranean evaporation: Competing impacts from the mid latitudes teleconnections and the south asian monsoon. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1-2), 779-791. doi:10.1007/s00704-021-03577-1

Zveryaev, I. I., & Hannachi, A. B. A. (2017). Interdecadal changes in the links between mediterranean evaporation and regional atmospheric dynamics during extended cold season. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1322-1340. doi:10.1002/joc.4779

Мохов И.И. О влиянии облачности на энергетический баланс климатической системы.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

Метеорология и гидрология. 1982. № 8. С. 34.

Мохов И.И., Галин В.Я., Дегтярев А.И., Круглова Е.Н., Мелешко В.П., Соколов А.П., Спорышев П.В., Стенчиков Г.Л., Тростников И.В., Шейнин Д.А. Сравнение моделей общей циркуляции атмосферы: диагностика внутригодовой эволюции облачности.

Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1994, том 30, №4, с. 527-542.

Синицын А.В., Александрова М.П. Оценка погрешностей прямых измерений приходящих радиационных потоков, связанных с колебаниями корабля. Океанология. 2009. Т.49. № 4. С. 494-500.

Синицын А.В., Гулев С.К. Сравнение натуральных и спутниковых данных о приходящих коротковолновых потоках солнечной радиации для Атлантического океана в период 2004-2014 гг. Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 268-274.

Синицын А.В., Гулев С.К. Сравнительный анализ спутниковых баз данных приходящих коротковолновых потоков на поверхность Мирового океана. Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 689-695.

Чернокульский А.В., Мохов И.И. Сравнение современных глобальных климатологий облачности. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 235-243

Международное сотрудничество

Проект предполагает активное международное сотрудничество, как между российским и немецким коллективами, так и с другими международными партнерами. Между Институтом Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, TROPOS и LU заключено соглашение о сотрудничестве (см. Приложение), которое четко определяет схему взаимодействия и определяет вклад немецкой стороны в проект, составляющий 559 568,73 € из средств проекта, финансируемого BMBF и собственных средств TROPOS и LU. Кроме того, в проекте будут принимать участие другие иностранные партнеры с собственным финансированием. С NOAA / NCDC (Eric Freeman) – центром поддерживающим международный архив данных ICOADS, также имеется соглашение о сотрудничестве, подтвержденное письмом NOAA/NCDC. Также имеется тесное сотрудничество с Лабораторией океанографии LOPS (Брест, Франция, Anna Marie Tregurier) и NASA/GSFC (Александр Смирнов), что принципиально важно для получения данных океанских реанализов и для получения последних обновлений измерений аэрозолей и облаков из сети AERONET.

В проекте с российской стороны будут принимать участие зарубежные ученые, уже работающие в ИО РАН, а также предполагающие участвовать в работах по проекту. Здесь можно упомянуть Бернара Барнье – известного ученого в области динамики океана и взаимодействия океана и атмосферы, уже работающего в ИОРАН с 2017 года, а также Амбруаза Дюфура – специалиста в области анализа крупномасштабных потоков тепла, также являющегося сотрудником ИОРАН. Кроме того, предполагается привлечение к работе по данному проекту иностранных специалистов Карины фон Шукман (MERCATOR, Франция), специалиста в области переносов тепла в океане, проф. Университета Рединга (Великобритания) Ричарда Аллана (Rischarde Allan), эксперта в области глобального энергетического цикла и его динамики, д-ра Лизан Ю (Lisan Yu), ведущего сотрудника Вудсхольского океанографического института (WHOI, USA), эксперта в создании синтетических климатологий состояния океана.

Участники проекта имеют большой опыт организации совместных международных конференций и семинаров. Ниже приводится список конференций и сессий на конференциях, организаторами которых выступали участники проекта;



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru

27.07.2021

Номер заявки на портале

2021-2251-ПП4-2648-9557

CRC-код заявки

61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

- CLIMAR-5 workshop, Hamburg, Germany, September 2019 (Сергей Гулев конвинуер, Андреас Макке – участник).
- Sixth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, Dubrovnik, Macedonia, November 2018 (Андреас Макке и Сергей Гулев, конвинуеры)
- 15th Conference on Cloud Physics/15th Conference on Atmospheric Radiation, Vancouver, BC, Canada, July 2018 (Андреас Макке, конвинуер, 3 российских участников из ИОРАН)
- Open Session on General Circulation, Ocean Climate Variability and Air-Sea Interactions of the European Geosciences Union General Assembly, 2018, Vienna, Austria, April 2018 (Сергей Гулев, организатор и конвинуер)
- Aerosols Clouds Precipitation and Climate Working Group, Nanjing, China, April, 2018 (Андреас Макке и Сергей Гулев, конвинуеры)
- The World Climate Research Program (WCRP) is holding a workshop entitled “The Earth’s Energy Imbalance (EEI) and its implications”, Toulouse, France November 2018 (Сергей Гулев, организатор).
- CLIVAR Open Science Conference, September 2016, Qingdao, China (Сергей Гулев, член оргкомитета и конвинуер, Йоханнес Кваас, - заказной доклад).

В ходе выполнения проекта партнеры предполагают организацию следующих конференций:

- Специальные сессии на Генеральной ассамблее Европейского Союза Геонаук, Вена, Австрия, апрель, 2022 г. и 2023 г.
- Специальная сессия на годовом собрании Американского Геофизического Союза, Сан-Франциско, США, декабрь, 2022 г.
- Открытая сессия на Международном симпозиуме по радиации, Греция, Салоники, июль, 2022 г.

Необходимость совместного выполнения проекта обосновывается уникальной возможностью объединить экспертизу российских участников в области создания долговременных массивов данных и расчетных полей потоков энергии океан-атмосфера с компетенциями немецких коллег в области развития параметризаций радиационных потоков над океаном и моделирования роли облаков и радиации в измерениях климата. Именно это даст возможность достижения главной цели проекта - исследования роли облаков и радиационных потоков в изменчивости климата над Атлантикой и прилегающими континентами на основании высокоточных временных рядов характеристик облачности и потоков радиации за последние 150 лет. Эта цель не может быть достигнута партнерами по отдельности. В ходе выполнения проекта российские участники получают доступ к компьютерным кодам параметризаций, разработанных немецкими партнерами, а главное – к уникальной инфраструктуре, включающей исследовательскую облачную башню-лабораторию (Cloud Tower Laboratory), которая будет использоваться в рамках проекта для разработки параметризаций физических процессов в облачных системах над океаном, а также мобильной исследовательской станции «Melpitz» PollyNet и системе LACROS (Leipzig Aerosol and Cloud Re-mote Observation System). Эти объекты инфраструктуры немецких партнеров позволят выполнить совместные исследования влияния облачности на радиацию, как в ходе разработки параметризаций, так и в период валидации параметризаций. Кроме того, партнеры предполагают объединить компьютерные мощности ИО РАН и суперкомпьютера Fujitsu PrimeQuest 3800B2 (Лейпциг) с целью создания



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2

распределенного ресурса для обработки результатов моделирования радиационных процессов над морем.

Риски проекта

Существует 3 основных группы рисков успешного выполнения проекта. Первая связана с возможными задержками обработки и контроля качества исходных массивов характеристик метеорологических параметров, включая облачность из архивов ICOADS и DWD. Это может привести к задержке начала расчетов радиационных потоков с использованием новых параметризаций. Для минимизации этого риска нами уже сейчас начато построение интерактивной базы данных в тесной кооперации с NCDC/NOAA, что позволит иметь готовыми к анализу все данные, по крайней мере, до 1950 года (наиболее проблематичная часть) уже к весне 2022 года.

Еще одна группа рисков связана с ограничениями дискового пространства для формирования массива расчетных потоков радиации. Этот риск будет минимизирован установкой новой системы для хранения данных в ИОРАН не позднее февраля 2022 года. Кроме того, TROPIS выделит до 400 ТБ дискового пространства для совместного проекта, начиная с марта 2022 г.

Третья группа рисков связана с возможностью организации экспедиционных наблюдений в 2023-2024 гг. для независимой валидации разработанных параметризаций и расчетных потоков радиации. Пока неясно, будет ли завершена модернизация НИС «Академик Сергей Вавилов» (планируемый к использованию) к началу 2023 года. Этот риск может быть минимизирован использованием другого подобного судна, находящегося в оперативном управлении ИО РАН. Предполагаемая к использованию российская и немецкая аппаратура не является стационарной и легко может быть инсталлирована на другом судне. Кроме того, в настоящее время Андреас Макке подает заявку на проведение таких измерений на судне «Polarstern», что является еще одним запасным вариантом.



Дирекция научно-технических программ

Документ сгенерирован на портале prz.sstp.ru	27.07.2021
Номер заявки на портале	2021-2251-ПП4-2648-9557
CRC-код заявки	61c16cca-971e-4c5d-a143-c3fd9b1f8df2