

УДК 551.506:551:582

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. А. В. Клепиков*

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
ул. Беринга, д. 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия*

**e-mail: klep@aari.ru*

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен обзор результатов российских полярных исследований в 2019–2022 гг., подготовленный в Комиссии по полярной метеорологии Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVIII Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Берлин, Германия, 11–20 июля 2023 г.)*.

Ключевые слова: Арктика, Антарктика, изменение климата, метеорология, естественная изменчивость, потепление

DOI: 10.31857/S0002351523070040, **EDN:** TVOYTI

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕТЕОРОЛОГИИ АРКТИКИ

Описание современного состояния арктического климата дано в монографии [Климат Арктики, 2022], где представлены результаты исследований климата Арктики, выполненные в Институте физики атмосферы РАН. Приведены результаты анализа эмпирических данных для различных составляющих климатической системы Арктики: атмосферы, морских льдов, океана и суши с оценкой современных тенденций изменения. Рассмотрены характерные процессы и обратные связи в арктической климатической системе, важные для формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, а также механизмы влияния изменений климата в Арктике на циркуляцию атмосферы в средних широтах Северного полушария. Даны оценки возможных будущих изменений климата в Арктике по результатам численных расчетов с моделями климата при сценариях антропогенного воздействия, а также влияния этих изменений на продолжительность морской навигации вдоль Северного морского пути, морское волнение, характеристики многолетнемерзлых грунтов и распад придонных метангидратов.

В обзоре [Мохов, 2020] оцениваются особенности современных быстрых климатических изменений в Арктике и их последствий на основании результатов, полученных в последние годы.

Наряду с данными наблюдений анализировались различные данные реанализа, а также результаты численных расчетов с глобальными и региональными версиями климатических моделей при разных сценариях антропогенных воздействий для XXI века. Представлены оценки сравнительной роли естественных и антропогенных факторов в формировании температурных трендов на разных временных горизонтах. Согласно полученным оценкам, доминирующая роль радиационного форсинга парниковых газов проявляется в арктических широтах на временных масштабах около полувека и более. Новые климатические явления, в частности формирование кратеров на Ямале в условиях тающей вечной мерзлоты, и новые эффекты, в том числе для тенденций изменения морского волнения в акваториях Арктического бассейна, свидетельствуют о достижении определенного критического уровня регионального и глобального потепления, сопоставимого с потеплением оптимума голоцена. При этом современные климатические модели проявляют способность не только воспроизводить ключевые особенности современных климатических режимов и их изменчивости, но и дают возможность получать адекватные прогностические оценки даже для сложных процессов в Арктике.

В статье [Мохов, 2022] получены аналитические условия для оценки вклада разных внутренних и внешних факторов в формирование арктического (полярного) усиления при потеплении для земной климатической системы — с более сильными изменениями приповерхностной тем-

* Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022. Ed. by I.I. Mokhov, A. A. Krivolutsky. Moscow, MAKS Press. 2023. 440 p.

пературы в высоких широтах по сравнению с более низкими.

В работе [Демчев и др., 2020] приводятся результаты верификации значений приповерхностной температуры воздуха реанализов ERA-Interim и ERA-5 по данным, полученным с дрейфующих буев, наземных метеостанций, а также, впервые, по данным измерений, выполненных на дрейфующих станциях «Северный Полюс». Последние не ассимилировались ни в одном из рассматриваемых реанализов, что дает редкую возможность для независимого сравнения. По результатам сравнения с данными СП установлено, что средние ошибки для холодного сезона в Арктическом бассейне составляют: 2.25°C для ERA-I и 3.92°C для ERA5. Сравнение с данными дрейфующих буев позволяют сделать предположение о причине таких больших ошибок в реанализах. Часть буев была установлена с воздуха путем сброса на лед с борта воздушного судна. При этом температурный датчик буя был, с большой степенью вероятности, заглублен в снежный покров, который экранировал его от холодной атмосферы и способствовал прогреву вследствие потока тепла от нижележащего слоя морской воды. Ассимиляция таких данных вероятно и приводит к завышению реанализами температуры воздуха над дрейфующими льдами.

В [Акперов и др., 2019] на основе среднемесячных данных реанализа ERA-Interim (1979–2014 гг.) получены оценки вертикального градиента температуры g в тропосфере высоких широт Северного полушария с анализом его связи с приповерхностной температурой T_s в межгодовой изменчивости для разных сезонов. Проведен также анализ способности региональной климатической модели HIRHAM5 воспроизводить особенности распределения вертикального градиента температуры в тропосфере в арктических широтах и параметра чувствительности к изменению приповерхностной температуры dg/dT_s , выявленные по данным реанализа. Отмечены региональные особенности связи вертикальной стратификации температуры в тропосфере с арктическим колебанием. Полученные по данным реанализа и модельным расчетам оценки имеют особую значимость в связи с более высокой изменчивостью и чувствительностью климата арктических широт при глобальных изменениях, что характеризуется так называемым арктическим усилением.

Изменения характеристик циклонической деятельности (частоты, глубины и размеров) в Арктике анализируются в [Акперов et al., 2019] на основе моделирования с использованием современных региональных климатических моделей (РКМ) инициативы Arctic-CORDEX и глобальных климатических моделей (ГКМ) из CMIP5 (Coupled Models Intercomparison project, phase 5) в рамках сценария репрезентативной траектории концентрации (RCP) 8.5. В большинстве РКМ к

концу XXI века наблюдается увеличение повторяемости циклонов зимой (декабрь, январь, февраль) и уменьшение летом (июнь, июль, август). Однако, в половине РКМ циклоны становятся слабее и существенно меньше зимой и глубже и крупнее летом. РКМ, как и ГКМ, показывают увеличение повторяемости циклонов над морями Баффина и Баренцевым, к северу от Гренландии, Канадским архипелагом и снижение над Гренландским, Норвежским, Исландским, Бофорта и Карским морями, а также над субарктическими континентальными районами в зимний период. Летом модели дают к концу XXI века увеличение повторяемости циклонов над Центральной Арктикой и Гренландским морем и уменьшение над Норвежским и Карским морями. Снижение наблюдается и над высокоширотными континентальными районами, в частности над Восточной Сибирью и Аляской. Оценена чувствительность результатов расчетов по РКМ к граничным условиям и физике моделей. В целом, различные боковые граничные условия в ГКМ оказывают большее влияние на результаты моделирования по РКМ, чем различия в настройке и/или физике РКМ.

Влияние притока атлантических вод в Баренцево море на активность региональных циклонов в зимний период проанализировано в [Акперов et al., 2020] с использованием 10 ансамблевых расчетов по совместной модели арктической атмосферы-океана-морского льда HIRHAM-NAOSIM за период 1979–2016 гг. Модель показывает статистически устойчивую связь между притоком атлантических вод и изменчивостью климата в Баренцевом море. Анализ показывает, что аномально высокий приток атлантических вод приводит к изменению статической устойчивости и сдвига ветра в нижней тропосфере и, следовательно, к созданию благоприятных условий для циклогенеза над Баренцевым и Карским морями. Над Баренцевым морем увеличивается повторяемость циклонов, особенно интенсивных. Кроме того, циклоны в Баренцевом море становятся крупнее (увеличивается радиус) и сильнее (увеличивается интенсивность) в ответ на увеличение притока атлантических вод в Баренцево море по сравнению с годами аномально низкого притока атлантических вод.

Арктические циклоны, как преобладающая особенность совместной динамики арктической климатической системы, оказывают большое влияние на атмосферный перенос тепла и влаги, а также на деформацию и дрейф морского льда. Исследования, основанные на моделировании прошлого и будущего с использованием климатических моделей, показывают, что на арктический циклогенез влияет усиление глобального потепления в Арктике, например, растущий термический контраст между сушей и морем. Авторы работы [Акперов et al., 2021] предполагают, что биогеофизические обратные связи (БФОС) над сушей, в данном случае относящиеся, главным

образом, к потеплению из-за альбедо и похолоданию из-за испарения летом, могут потенциально существенно изменить циклоническую активность в Арктике. На основе региональной модели системы Земли (RCA-GUESS), которая объединяет динамическую модель растительности и региональную модель атмосферы, а также алгоритм обнаружения и отслеживания циклонов, в работе [Акрегов et al., 2021] впервые оценивается влияние БФОС на характеристики арктических циклонов в рамках трех сценариев репрезентативных путей концентрации МГЭИК (т.е. RCP 2.6, RCP 4.5 и RCP 8.5). Анализ сосредоточен на весеннем и летнем периодах времени, поскольку предыдущие исследования показали, что в эти сезоны БФОС наиболее выражены. Было обнаружено, что БФОС, вызванные изменениями приземных тепловых потоков, приводит к изменению теплового контраста суши и моря и устойчивости атмосферы. Это, в свою очередь, заметно изменяет бароклинность атмосферы и, таким образом, приводит к изменению циклонической активности в Арктике, в частности к увеличению повторяемости циклонов над Северным Ледовитым океаном весной. В исследовании подчеркивается важность учета БФОС в прогнозировании арктических циклонов и роли циркуляции в арктической региональной системе Земли.

Параметризация процессов взаимодействия океана–морского льда–атмосферы представляет собой проблему для региональных климатических моделей (РКМ) Арктики, особенно для зимних условий, когда небольшие фракции тонкого льда или открытой воды вызывают сильные модификации пограничного слоя. Таким образом, обработка параметры морского льда и подсеточные потоки в РКМ имеет решающее значение. Однако, ряды данных по морскому льду для зимних условий редки. В работе [Heinemann et al., 2021a] представлены данные натурного (с борта судна) эксперимента “Трансарктика-2019” в конце арктической зимы для условий толстого однолетнего льда. Данные используются для верификации региональной климатической модели COSMOCLM (CCLM). Кроме того, данные спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS) используются для сравнения температур поверхности льда (ТПЛ) модели морского льда CCLM. CCLM используется в режиме прогноза (вложенном в ERA5) для Норвежского и Баренцева морей с разрешением 5 км и запускается с различными конфигурациями модели морского льда и параметризациями подсеточных потоков. Использование нового набора параметризаций дает улучшенные результаты при сравнении с данными натурных наблюдений. Сравнение с ТПЛ по данным MODIS позволяет проводить проверку на больших территориях, а также показывает хорошее качество расчетов по CCLM. Сравнение с аэрологическими зондированиями дважды в день во время

“Трансарктики-2019”, ежечасными микроволновыми измерениями водяного пара на первых 5 км в атмосфере и ежечасными данными профиля температуры показывает очень хорошее представление температуры, влажности и структуры ветра во всей тропосфере для CCLM.

В 2014–2015 гг. в обсерватории Тикси (побережье моря Лаптевых) была проведена годовая полевая кампания с использованием измерений системы обнаружения звука и локации/радиоакустического зондирования (СОДАР/РАС) для исследования пограничного слоя атмосферы с упором на изучение струй малых высот (СМВ) в зимний сезон. В дополнение к вертикальным профилям температуры, скорости и направления ветра, полученным с помощью SODAR/RASS, был доступен набор дополнительных измерений обсерватории Тикси. В [Heinemann et al., 2021b] данные региональной атмосферной модели были использованы для помещения локальных данных в синоптический контекст и представлены два исследования событий СМВ. Статистика СМВ за шесть месяцев показывает, что примерно в 23% всех профилей присутствовали СМВ со средней скоростью и высотой струи около 7 м/с и 240 м соответственно. В 3.4% всех профилей наблюдались СМВ, превышающие 10 м/с. Основным движущим механизмом СМВ, по-видимому, является бароклинность, поскольку инерционных колебаний обнаружено не было. На СМВ высотой менее 200 м, вероятно, влияет местная топография.

Измерения структуры атмосферного пограничного слоя (АПС), выполненные в течение трех лет (октябрь 2017 г.–август 2020 г.) в российской обсерватории “Ледовая база мыс Баранова” (79.28° с.ш., 101.62° в.д.) с использованием ветрового профилемера SODAR, обсуждаются в [Heinemann et al., 2022]. В дополнение к вертикальным профилям скорости и направления ветра, полученным с помощью SODAR, обсерватория предоставила набор дополнительных измерений. Измерения ПСА использовались для верификации региональной климатической модели COSMOCLM (CCLM) с разрешением 5 км на 2017–2020 гг. CCLM запускался с вложением в данные ERA5 в режиме прогноза на период измерения. Измерения SODAR в основном ограничивались скоростями ветра <12 м/с, поскольку сигнал часто пропадал при более сильном ветре. Данные SODAR показали эффект топографического контроля поля ветра в нижнем стометровом слое и некоторых струях малых высот (СМВ). Сравнение результатов CCLM с приземными данными обсерватории показала хорошее согласие для ветра и наличие погрешности в сторону уменьшения для температуры на высоте 2 м. Сравнение с данными SODAR показало наличие погрешности в сторону увеличения для скорости ветра примерно на 1 м/с для слоя ниже 100 м, которая возрастала до 1.5 м/с для более высоких уровней. В отличие от данных SODAR,

данные SCLM показали частое присутствие СМВ, связанных с топографическим каналом в проливе Шокальского. Хотя профили ветра SODAR ограничены по диапазону и имеют много провалов, они представляют собой ценный набор данных для проверки модели. Однако, полную картину структуры АПС и климатологии каналобразующих событий можно было получить только на основе модельных данных. Климатологическая оценка показала, что на поле ветра у мыса Баранова влияло не только прямой топографический канал в условиях южных ветров через пролив Шокальского, но и канал через горный ущелье для западных ветров. СМВ были обнаружены в 37% всех профилей, и большинство СМВ были связаны с топографическими каналами, особенно СМВ со скоростью струи > 15 м/с (что составляло 29% всех СМВ). Анализ смоделированного поля ветра на высоте 10 м показал, что 99%-ная скорость ветра достигала 18 м/с и четко демонстрировала дипольную структуру направленного ветра на обоих выходах из пролива Шокальского. Климатология событий топографического канализирования показала, что такая дипольная структура была вызвана частым возникновением канализирования на обоих выходах. События канализирования продолжительностью не менее 12 часов происходили примерно 62 дня в году на обоих выходах из пролива Шокальского.

Простая аналитическая модель атмосферного пограничного слоя (АПС), связанного с морским льдом, представлена в [Chechin et al., 2019]. Он описывает охлаждение в случае ясного неба над морским льдом во время полярной ночи в присутствии разводий. Модельные решения показывают, что концентрация морского льда и скорость ветра оказывают сильное влияние на тепловой режим морского льда. Разводья вызывают как потепление АПС, так и повышение устойчивости над морским льдом. Модель описывает резкий переход АПС из слабоустойчивого “связанного” состояния в сильно устойчивое “отделенное” состояние при уменьшении скорости ветра. Пороговое значение скорости перехода ветра является функцией концентрации морского льда. Отделенное состояние характеризуется большой разницей между температурой воздуха и температурой поверхности морского льда, которая еще больше увеличивается из-за разводий. В связанном режиме температуры воздуха и поверхности увеличиваются почти линейно с увеличением скорости ветра из-за потепления от разводий, а также более медленного остывания АПС. Временные масштабы охлаждения демонстрируют немонотонную зависимость от скорости ветра будучи наименьшими при пороговом значении скорости ветра и возрастающими при слабом и сильном ветре. Теоретические решения хорошо согласуются с результатами более реалистичной одномерной модели и с наблюдениями, выпол-

ненными на трех российских дрейфующих станциях “Северный полюс” (СП-35, СП-37 и СП-39) и с поверхностным тепловым балансом Северного Ледовитого океана. Как результаты моделирования, так и наблюдения показывают сильную неясную зависимость чистого потока длинноволновой радиации на поверхности от скорости ветра.

В работе [Махотина и др., 2021] приводятся результаты анализа измерений облакомера на станциях “Северный Полюс”-37, 39 и 40. Для периода полярной ночи рассчитана повторяемость балла облачности, высот нижней границы облачности. Сравнение балла облачности по данным облакомера с данными визуальных наблюдений показало хорошее согласие, однако величина коэффициента корреляции зависит от интерпретации данных облакомера. В целом, для указанных станций характерно бимодальное распределение балла облачности с наибольшей повторяемостью ясного неба и сплошной облачности. Анализ повторяемости высоты нижней границы облачности показал, что наиболее характерны высоты нижней границы облачности ниже 600 м. В ноябре также наблюдаются высоты облачности в диапазоне 1000–2000 м, но их повторяемость снижается на протяжении зимы. Для облачности во время полярной ночи характерен сильный положительный радиационный эффект, который имеет тепляющий эффект на температуру поверхности льда и воздуха. Однако радиационный эффект облачности существенно отличается от станции к станции, как и повторяемость облачности и ее влияние на температурный режим. Эти различия могут стать предметом дальнейших исследований взаимосвязи характеристик облачности с другими процессами в климатической системе Арктики. Полученные статистические оценки существенно дополняют имеющиеся данные об облачном покрове Центральной Арктики.

В [Акперов и др., 2019] на основе результатов ансамблевых расчетов с использованием региональной климатической модели NIRHAM/NAOSIM для Арктики исследовано влияние притока океанических вод в Баренцево море на концентрацию морских льдов и характеристики атмосферы в зимние месяцы. Показана определяющая роль вариаций притока океанических вод в Баренцево море на режим морских льдов и приповерхностной температуры воздуха, а также статическую устойчивость атмосферы в зимний период. В работе [Мохов и Погарский, 2021] проведен анализ характеристик активности морского волнения в Арктическом бассейне с использованием модели WAWEWATCH III и результатов расчетов морских льдов и ветра в атмосфере с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP5. Сделана оценка относительной роли ветровых волн и зыби в общей активности морских волн в Арктическом бассейне по модельным расчетам в сопоставлении с полученными с использованием

данных реанализа и спутниковых данных. Получены оценки возможных изменений морского волнения, сопровождающих значительное уменьшение протяженности морских льдов в Арктике по модельным расчетам для XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий. Отмечены особенности различных режимов морских волн в Арктическом бассейне с оценкой роли ветровых волн, зыби, их взаимодействия, режимов хаотичного волнения типа волновой толчи.

Прибрежные и припайные полыньи в арктических морях могут оказывать заметное влияние на арктический климат, повышая температуру холодного воздуха, поступающего зимой из материковой Сибири в эти моря и в Арктический бассейн. В работе [Prokhorova and Urazgildeeva, 2021] по данным полевых наблюдений и реанализа ERA-Interim изучено влияние полыней на приземную температуру воздуха и меридиональный перенос тепла и влаги. По результатам натуральных наблюдений, проведенных в 1990-е гг., рассчитаны оценки притоков тепла с поверхности полыньи. Из реанализа получены меридиональные теплопереносы через 70° с.ш., профили температуры воздуха, скорости ветра в районе моря Лаптевых ($100\text{--}140^\circ$ в.д.) и полыньи, расположенной в море Лаптевых ($120\text{--}130^\circ$ в.д.). Подтверждено, что зимние переносы холодного воздуха с материка не оказывают охлаждающего действия на среднюю зимнюю температуру воздуха севернее 70° с.ш. за счет нагревающего воздействия полыньи.

В работе [Мохов и Парфенова, 2022a] получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций протяженности снежного покрова и морских льдов в Северном полушарии с изменениями приповерхностной температуры на основе современных спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. Полученные новые результаты свидетельствуют об общей значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности снежного покрова и морских льдов не только в годовом ходе, но и для большинства месяцев в межгодовой изменчивости. При этом проявляются особенности в осенние месяцы, связанные с региональными особенностями изменчивости температурного режима и протяженности снежного покрова в сезон его формирования в Евразии и Северной Америке. Для зимних месяцев отмечено увеличение по абсолютной величине параметров чувствительности площади снежного покрова и морских льдов к температурным вариациям в течение последних десятилетий и коэффициентов их корреляции, а для теплых месяцев года — противоположные изменения. Наряду со статистически значимой отрицательной корреляцией общей протяженности снежного покрова и морских льдов с вариациями полушарной приповерхностной температуры в годовом ходе при кросс-вейвлетном анализе отмечена статистиче-

ски значимая отрицательная корреляция для наиболее долгопериодных междесятилетних вариаций с проявлением в последние годы значимой антикорреляции для межгодовых вариаций, в частности для вариаций с периодичностью, характерной для явлений Эль-Ниньо.

В [Мохов и Парфенова, 2022b] получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций протяженности снежного покрова и морских льдов в Северном полушарии с изменениями приповерхностной температуры на основе современных спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. Полученные новые результаты свидетельствуют об общей значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности снежного покрова и морских льдов не только в годовом ходе, но и для большинства месяцев в межгодовой изменчивости. При этом проявляются особенности в осенние месяцы, связанные с региональными особенностями изменчивости температурного режима и протяженности снежного покрова в сезон его формирования в Евразии и Северной Америке. Для зимних месяцев отмечено увеличение по абсолютной величине параметров чувствительности площади снежного покрова и морских льдов к температурным вариациям в течение последних десятилетий и коэффициентов их корреляции, а для теплых месяцев года — противоположные изменения. Наряду со статистически значимой отрицательной корреляцией общей протяженности снежного покрова и морских льдов с вариациями полушарной приповерхностной температуры в годовом ходе при кросс-вейвлетном анализе отмечена статистически значимая отрицательная корреляция для наиболее долгопериодных междесятилетних вариаций с проявлением в последние годы значимой антикорреляции для межгодовых вариаций, в частности для вариаций с периодичностью, характерной для явлений Эль-Ниньо.

В [Сакерин и др., 2019] обсуждаются результаты измерений комплекса физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля: аэрозольной оптической толщи, концентраций аэрозоля и сажи, элементного и ионного составов аэрозоля, содержания в нем органического и элементного углерода, а также изотопного состава углерода в пробах аэрозоля и снега в районе научно-исследовательского стационара ААНИИ “Ледовая база “Мыс Баранова” на архипелаге Северная Земля. Показано, что средние значения большинства характеристик аэрозоля, измеренных в апреле–июне 2018 г., немного ниже, чем в арктическом поселке Баренцбург (архипелаг Шпицберген), и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период.

В [Sakerin et al., 2019] обсуждаются результаты сравнения средних физико-химических характеристик аэрозоля в соседних районах: в арктиче-

ском поселке Баренцбург (арх. Шпицберген) и над Баренцевым морем. Отмечено небольшое превышение (менее 0.02) аэрозольной оптической толщи атмосферы в островном районе относительно морского. Более значительно различаются микрофизические характеристики аэрозоля в приземном слое: концентрации сажи выше в Баренцбурге (в 4 раза), а концентрации частиц — над морем (в 2.4 раза). Абсолютные концентрации ионов в атмосфере Баренцбурга кратно меньше, чем над морем. Однако по относительному содержанию в обоих районах преобладают ионы Na^+ , Cl^- и NH_4^+ , SO_4^{2-} , что свидетельствует о равнозначности вклада континентальных и морских источников.

Химический состав (ионы, элементы, полициклические ароматические углеводороды) атмосферного аэрозоля в различных районах Северной Арктики, европейской и российской частях Северного Ледовитого океана (СЛО), морях северных широт и Дальнего Востока рассматривается в [Голобокова и др., 2020a]. Исследования выполнялись с морских судов по маршрутам их следования (НИС “Академик Мстислав Келдыш”, НЭС “Академик Трешников”, НИС “Профессор Мультигановский”). Пробы воздуха отбирались по методике, принятой в международных сетях программ мониторинга атмосферы в Юго-Восточной Азии (EANET) и Европе (EMEP). Средняя сумма концентраций ионов и отдельных ионов в аэрозоле над морями Северной Атлантики и европейской частью СЛО согласуется с измерениями в море Лаптевых и Карском море в 2018 и 2019 гг. Повышенные значения ПАУ в аэрозоле морей и СЛО центральной части Российской Арктики совпадают с повышенными концентрациями ионов и микроэлементов в составе аэрозоля. Отмечается различие в распределении концентраций микроэлементов в составе аэрозолей морей Северной Атлантики и центрального района Российской Арктики, что может свидетельствовать о разных источниках этих компонентов.

Результаты исследований аэрозоля в арктической атмосфере, включая аэрозольную оптическую толщину (АОТ), концентрации аэрозоля и сажи, а также химический состав аэрозоля, представлены в [Sakerin et al., 2020]. Средние характеристики аэрозоля, измеренные в ходе девяти экспедиций (2007–2018 гг.) в евразийском секторе Северного Ледовитого океана, составили 0.068 для АОТ (0.5 мкм); 2.95 см^{-3} для числовых концентраций частиц; 32.1 нг/м^3 для массовой концентрации сажи. В пространственном распределении аэрозоля выявлено примерно двукратное снижение средних характеристик в восточном направлении (от Баренцева моря к Чукотскому морю). Средние характеристики аэрозоля над Баренцевым морем уменьшаются в северном направлении: концентрации сажи в 1.5 раза; концентрации частиц в 3.7 раза. Эти особенности

пространственного распределения обусловлены главным образом изменениями содержания мелкодисперсного аэрозоля, а именно: истечениями дымов от лесных пожаров и антропогенного аэрозоля. Отдельно авторы рассмотрели измерения характеристик аэрозоля в ходе двух экспедиций 2019 г.: на севере Баренцева моря (апрель) и по Северному морскому пути (июль–сентябрь). Во второй экспедиции средние характеристики аэрозоля оказались выше многолетних значений: АОТ достигала 0.36, концентрация частиц — до 8.6 см^{-3} , концентрация сажи — до 179 нг/м^3 . На повышенное содержание аэрозоля повлияли частые выбросы дыма от лесных пожаров. Основной (99%) вклад в элементный состав аэрозоля в исследуемых регионах внесли Ca, K, Fe, Zn, Br, Ni, Cu, Mn и Sr. Пространственное распределение химического состава аэрозолей было аналогичным микрофизическим характеристикам. Наименьшие концентрации органического и элементарного углерода (ОУ, ЭУ) и большинства элементов наблюдаются в апреле на севере Баренцева моря, а максимальные — в дальневосточных морях и на юге Баренцева моря. Среднее содержание углерода в аэрозоле над морями азиатского сектора Северного Ледовитого океана составляет $\text{ОУ} = 629 \text{ нг/м}^3$, $\text{ЭУ} = 47 \text{ нг/м}^3$.

Данные глобального реанализа о температуре приземного воздуха (ТПВ) за последние десятилетия указывают на максимальное потепление в северной части Баренцева региона. Однако, нехватка наблюдений препятствует достоверности данных реанализа в этой “горячей” точке Арктики. В [Isaksen et al., 2022] авторы изучают потепление за последние 20–40 лет на основе новых доступных наблюдений ТПВ и комплексного набора данных ТПВ с контролируемым качеством с северных архипелагов в Баренцевом море. Выявлен статистически значимый рекорд — сильное годовое потепление до 2.7°C за десятилетие с максимумом осенью до 4.0°C за десятилетие. Результаты сравниваются с самыми последними наборами данных глобального и арктического регионального реанализа, а также с данными дистанционного зондирования концентрации морского льда, температуры поверхности моря и ледовыми картами высокого разрешения. Характер потепления в первую очередь соответствует сокращению морского ледяного покрова и подтверждает общие пространственные и временные закономерности, представленные реанализом. Однако, наши результаты предполагают даже более высокую скорость потепления и более сильную связь ТПВ с концентрацией морского льда, чем было известно в этом регионе до сих пор.

Электронные архивы данных стандартных метеорологических наблюдений (среднесуточные/месячные температуры приземного воздуха — ТПВ) на метеостанциях Бухта Тихая (остров Гукера, 1929–1960 гг.) и обсерватории Кренкеля (остров Хейса,

1957–2017 гг.) на Земле Франца-Иосифа (ЗФИ) представлены в [Ivanov et al., 2021a]. Проанализированы параллельные ряды данных ТПВ, сделанные в 1958 и 1959 годах на обеих метеостанциях. Также представлены уравнения линейной регрессии, использованные для экстраполяции репрезентативных данных наблюдений обсерватории Кренкеля за период 1929–1957 гг. Оценка отдаленных изменений ТПВ на ЗФИ проводилась на основе анализа полученных рядов (1929–2017 гг.). Основные выводы: общее потепление на архипелаге ЗФИ составило 1.6–1.8°C (0.2°C/десятилетие) за весь доступный период инструментальных наблюдений (1929–2017 гг.); самые высокие темпы потепления были зафиксированы в марте-апреле и составили 0.6°C/десятилетие; особенно сильное потепление наблюдается с 1990-х гг.; годовая температура увеличилась на 6.3°C (2.2°C/десятилетие) за период 1990–2017 гг. и на 5.2°C (2.9°C/десятилетие) за период 2000–2017 гг.; за период 1990–2017 гг. максимальная скорость потепления наблюдалась в период с октября по февраль и составляла 4.4°C/десятилетие; за период 2000–2017 гг. максимальная скорость потепления наблюдалась в период с января по апрель и с ноября по декабрь и составляла 5.6°C/десятилетие; доминирующие сезоны года – зима (ноябрь–апрель), весна (май), лето (июнь–сентябрь) и осень (октябрь); за весь период наблюдений наибольшее повышение температуры наблюдалось в зимний сезон; в период современного потепления (1990–2017 гг.) наибольшее повышение температуры наблюдалось зимой и осенью.

В статье [Ivanov et al., 2021b] рассматриваются региональные особенности климата Шпицбергена на основе данных регулярных метеорологических наблюдений, полученных на норвежских, российских и польских станциях. Особое внимание уделено пространственным особенностям многолетнего режима температуры приземного воздуха (ТПВ). Климатические нормы (1961–1990 гг., в соответствии с рекомендациями ВМО), рассчитанные по всем метеостанциям, а также многолетние изменения пространственных градиентов ТПВ и оценки размаха годовых колебаний, выявили станции (районы) с “континентальным” и “морским” типом климата, а также тенденции пространственных неоднородностей климата Шпицбергена. Темпы современного потепления климата (1990–2016 гг.) были в среднем в три раза выше по сравнению с периодом после Второй мировой войны (1948–2016 гг.). Анализируется континентальность и аномальность климата. Сформулированы выводы о закономерности изменения пространственных особенностей климата и проявления его аномального характера в разные периоды (1960–1970, 1988 и 2005–2014 гг.).

На архипелаге Шпицберген в арктической части Северной Атлантики происходят быстрые изменения приземного климата и распределения

морского льда, что оказывает воздействие на климатическую систему и местное сообщество. В исследовании [Dahlke et al., 2020] используются данные наблюдений за температурой приземного воздуха (ТПВ) в 1980–2016 гг. на всем архипелаге Шпицберген и за протяженностью морского льда (ПМЛ) на оперативных картах морского льда для систематической оценки долгосрочных изменений и региональных различий. Близость к теплым водным массам Западно-Шпицбергенского течения приводит к заметно более теплomu климату в западных прибрежных регионах по сравнению с северным и восточным Шпицбергеном. Это накладывает отпечаток на климатологию ПМЛ на юге и западе Шпицбергена, где годовые максимумы 50–60% площади ледового покрова существенно меньше 80–90% в северных и восточных фьордах. Из-за усиления зимнего потепления местный климат смещается в сторону более морских условий, и в отдельных регионах наблюдается сокращение ПМЛ на 5–20% за десятилетие, так что ряд фьордов на западе были практически свободны ото льда в последние зимы. Самое сильное снижение вызвано воздействием ТПВ и происходит в течение последних одного – двух десятилетий во всех регионах; в то время как в 1980-х и 1990-х годах усиление северных ветров и дрейф морского льда могло объяснить 30–50% изменчивости ПМЛ вокруг северного Шпицбергена, где они, соответственно, привели к увеличению ПМЛ. Предполагается, что при продолжающемся потеплении как метеорологические, так и криосферные условия на Восточном Шпицбергене будут становиться все более похожими на то, что уже наблюдается в западных фьордах, а именно будет наблюдаться подавление типичных арктических условий.

В [Священников и др., 2020] приведены результаты исследования временной изменчивости циркуляции атмосферы в Западной Арктике (Норвежское и Баренцево моря). Для характеристики атмосферной циркуляции был использован ежедневный архив форм циркуляции E, W, C по классификации Гирса–Вангенгейма, охватывающий период с 1891 по 2016 г. Особое внимание уделено оценке различий в условиях погоды в современный период потепления 1985–2015 гг. и в период 1920–1950 гг., отмечаемый как период первого потепления в Арктике. Для холодного (ноябрь–март) и теплого (апрель–октябрь) сезонов определены тенденции изменения повторяемости форм циркуляции и вычислена повторяемость числа дней подряд с одинаковой формой циркуляции атмосферы, которую можно рассматривать как характеристику устойчивости условий погоды в рассматриваемые периоды потепления. Исследования показали, что для обоих периодов потепления характерно преобладание повторяемости формы циркуляции E в теплый сезон. Современный период потепления в изучаемом районе, по сравнению с периодом первого потепления, характеризу-

ется увеличением повторяемости формы циркуляции S малой продолжительности. Можно сделать вывод, что современный климатический режим характеризуется повышением приземной температуры воздуха и при этом менее устойчивыми условиями погоды.

В [Ivanov, 2019] анализируются наблюдаемые общие черты и различия “раннего” и “современного” потепления. Используются наиболее длительные ряды метеорологических наблюдений, выполненных на архипелаге Шпицберген. Изучены фазы роста приземной температуры воздуха. Показано, что “раннее” потепление было более значительным по сравнению с “современным”. Наиболее значительные аномалии наблюдаются в зимние месяцы при “раннем” потеплении, тогда как “современное” потепление фиксируется в течение всего года.

В [Скакун и др., 2020] приведена интерпретация изотопных исследований проб воды, снега и льда, отобранных на ледниках Альдегонда, Западный и Восточный Грэнфьорд и в их долинах (озера, снежники, реки), а также в долине оз. Конгресс. На основании анализа изотопного состава атмосферных осадков в поселке Баренцбург в 2016–2017 гг. обсуждается использование изотопного состава как индикатора источника влаги для атмосферных осадков.

Химический состав (ионы, элементы, полициклические ароматические углеводороды) аэрозольных и газообразных примесей (SO_2 , HNO_3 , HCl , NH_3) в приземном слое атмосферы Баренцбурга, расположенного на острове Западный Шпицберген, проанализирован в [Голобокова и др., 2020б]. Атмосферные аэрозоли и газообразные примеси, приносимые в Арктику из средних широт и оседающие на снегу и льду, не только взаимодействуют с различными природными объектами, но и распространяются на большие расстояния с таянием загрязненного снега и льда. Отбор проб воздуха проводился в соответствии с методологией, принятой международными сетями программ мониторинга атмосферы в Юго-Восточной Азии (EANET) и Европе (EMEP). В 2011–2015 гг. наблюдения за химическим составом приземного слоя атмосферы проводились ежедневно в световой сезон (апрель–сентябрь) и ежемесячно в период с апреля 2016 г. по 2018 г. Наибольшие суммарные концентрации ионов наблюдались в 2011–2012 гг. Сезонная изменчивость концентраций ионов в аэрозоле характеризовалась высокими значениями в холодный период (октябрь–февраль) и низкими значениями в теплый (май–июнь). Высокие значения коэффициента корреляции между ионами Na^+ и Cl^- ($r = 0.93$), а также между Mg^{2+} и Cl^- ($r = 0.81$) в течение года показывают, что основным источником аэрозоля является морская поверхность. Значительная корреляция между ионами K^+ , NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , K^+ , SO_4^{2-} в полярной ночи указывает на влияние местных

источников: добычу угля на шахте и его сжигание на теплоэлектростанциях. На выбросы полициклических ароматических углеводородов и газообразных примесей (SO_2 , HNO_3) в атмосферу, особенно в период полярной ночи, также влияют местные источники. Среди элементов максимальное обогащение аэрозоля выявлено As, Cr, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb при низком содержании Cd, Sn, Sb, W, Pb в углях, шламах. и на подстилающей поверхности. На основе элементного состава аэрозоля и обратно-траекторного анализа показано, что в район поселка Баренцбург из средних широт приходят воздушные массы, обогащенные тяжелыми металлами.

В [Метан, 2022] рассмотрены источники и стоки метана, представлены количественные оценки соотношения естественных (природных) и антропогенных выбросов в атмосферу метана в России и в мире. Выполнен анализ роли метана в атмосферных фотохимических процессах с оценкой современных изменений концентрации метана в атмосфере и их причин. Особое внимание уделено выбросам метана в Арктической зоне, включая эмиссию метана из многолетнемерзлых болот России. Представлены результаты сравнительного анализа систем коэффициентов, используемых при определении эмиссии метана в атмосферу в национальных кадастрах. Представлены соответствующие коэффициенты для производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. Рассмотрены новые метрики для оценки выбросов парниковых газов. Особое внимание уделено факторам, влияющим на глобальные и региональные изменения климата с оценкой роли антропогенных выбросов метана в атмосферу, в том числе с использованием различных моделей земной системы.

В последние годы в высокоширотных районах континентальной вечной мерзлоты наблюдаются новые геофизические явления. С 2014 г. на территории полуострова Ямал и соседних регионов обнаружены новые кратеры диаметром 10–20 м. Они связаны с выбросами газов, которые могли образоваться при диссоциации реликтовых газогидратных отложений вследствие повышения температуры почвы. В работе [Arzhanov et al., 2020] представлены результаты численного моделирования теплового режима вечной мерзлоты на севере Западной Сибири с оценкой зоны устойчивости гидрата метана при изменении климата за последние 130 000 лет. Согласно полученным результатам, верхняя граница зоны устойчивости гидратов метана на Ямале могла достигать поверхности в периоды ледниковых максимумов (около 90 000 и 60 000 лет назад). Показано, что в настоящее время в вечной мерзлоте Ямала выше современной границы зоны устойчивости, вероятно, существуют реликтовые гидраты метана на глубинах до 100–150 м, которые могли “пережить” потепление в оптимум голоцена около 6000 лет назад. и сохраняются в многолетнемерз-

лых породах при отрицательных температурах даже в условиях трансгрессии и повышенного геотермального потока.

В [Мохов и др., 2022] получены оценки внутри- и межвековой деградации многолетнемерзлых грунтов на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при потеплении на основе модели теплопереноса в грунте с использованием расчетов с глобальными климатическими моделями. В том числе использовались результаты расчетов с климатической моделью промежуточной сложности для последних 130 тыс. лет и расчеты с климатическими моделями общей циркуляции ансамбля CMIP6 (ScenarioMIP) с 1850 г. до конца XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий семейства SSP, в частности сценария SSP5-8.5. Получены оценки предельных режимов существования многолетнемерзлых грунтов на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при продлении сценариев глобального потепления до 2300 г. в соответствии с протоколом CMIP6 и модельных расчетов для следующих 15 тысячелетий с использованием, в частности, сценария антропогенных воздействий SSP5-8.5 до 2100 г.

Арктическая тундра сталкивается с беспрецедентным потеплением, которое приводит к изменениям в растительности, режимах оттаивания и, возможно, в обмене углерода между экосистемой и атмосферой (С). Однако оценки регионального баланса углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) весьма неопределенны. Авторы работы [Juutinen et al., 2022] измерили потоки CO_2 и CH_4 , состав растительности и индекс листовой площади (ИЛП), глубину протаивания и влажность почвы в Тикси (71° с.ш., 128° в.д.) – гетерогенном участке, расположенном в зоне обширной кустарничковой тундры на северо-востоке Сибири. Используя метод закрытой камеры, авторы определили чистый экосистемный обмен (NEE) CO_2 , экосистемное дыхание в темноте (ER), валовой фотосинтез экосистемы (Pg) и поток CH_4 в течение вегетационного периода. Для пространственной экстраполяции авторы применили ранее разработанную карту земного покрова высокого пространственного разрешения на площади 35.8 км^2 . Среди типов земного покрова, варьирующихся от бесплодной до кустарничковой тундры и тундровых водно-болотных угодий, NEE и Pg при плотности потока фотосинтетически активных фотонов $800 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ (NEE800 и Pg800) были наибольшими в местах с преобладанием злаков, то есть в прибрежных лугах и болотах, с EEE800 и Pg800 до -21 (поглощение) и $28 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ соответственно. Сосудистый ИЛП был надежным предиктором как NEE800, так и Pg800, а в ландшафтном масштабе болота были непропорционально важны для секвестрации CO_2 в летнее

время. Сухая тундра, в том числе кустарничковая и лишайниковая, имела меньшие скорости обмена CO_2 . Болота были крупнейшим источником CH_4 , тогда как сухая минеральная почва тундры потребляла атмосферный CH_4 , что в ландшафтном масштабе составляло $\sim 9\%$ от общего баланса CH_4 за вегетационный период. Наибольшая средняя сезонная скорость потребления CH_4 , равная $0.02 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, наблюдалась на бесплодных территориях, покрытых песком и камнями. Высокий уровень потребления согласуется с оценкой, основанной на измерениях вихревой ковариации на том же участке. Признается неопределенность, связанная с пространственной экстраполяцией из-за небольшого количества повторов для каждого типа растительного покрова. В этом исследовании подчеркивается необходимость различать различные типы растительного покрова, включая места обитания в сухой тундре, чтобы учитывать их различные модели потоков CO_2 и CH_4 , особенно потребление атмосферного CH_4 , при оценке обмена углерода в тундре в более крупном пространственном масштабе [Juutinen et al., 2022].

В работе [Makhotina et al., 2022] описаны характеристики приземного слоя атмосферы и компоненты теплового баланса снежно-ледового покрова при дрейфе НИС “Академик Трешников” к северу от архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, в районе $80\text{--}82^\circ$ с.ш., $30\text{--}45^\circ$ в.д. (экспедиция “Трансарктика 2019”), по сравнению с наблюдениями на дрейфующей станции “Северный полюс-35”, работавшей в том же районе в апреле 2008 г. и на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база мыс Баранова» в апреле 2019 г. На характеристики приземного слоя атмосферы и процессы энергообмена в период дрейфа экспедиции “Трансарктика-2019” существенное влияние оказали наличие облачности и состояние ледяного покрова. Влияние этих факторов привело к уменьшению радиационного охлаждения поверхности, образованию более теплого и влажного атмосферного погранслоя и к ослаблению турбулентного обмена между атмосферой и снежно-ледовым покровом. Сравнение характеристик энергообмена, рассчитанных для острова Большевик (79° с.ш.) и для района экспедиции “Трансарктика-2019”, показывает хорошее соответствие среднемесячных значений и трендов тепловых потоков, несмотря на то, что в первом случае подстилающей поверхностью был морской ледяной покров, а во втором – поверхность суши.

В [Махштас и др., 2020] приведено описание работы комплекса аппаратуры влажностно-температурного дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы (радиометр РВП и метеорологический профиломер МТР-5РЕ) в условиях Арктики. Выполнено сравнение результатов измерений радиометрических систем с данными аэрологического зондирования в широком спектре

метеорологических условий. Получены оценки интегрального влагосодержания атмосферы и характеристик инверсий в нижнем 1000-метровом слое атмосферы в период дрейфа НЭС “Академик Трешников” в северной части Баренцева моря.

В [Парфенова и др., 2022] проведен анализ продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) в XXI веке на основе моделей ансамбля CMIP5 при сценарии RCP 8.5 с использованием методов байесового осреднения с выделением различных участков СМП. Получено, что различия качества воспроизведения моделями ПНП и ее изменений в западной части СМП больше, чем в восточной. Ансамблевое среднее для ПНП получено в диапазоне 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Средние ансамблевые оценки изменения ПНП в целом устойчивы к выбору предположений, связанных с вычислением байесовых весов. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части СМП и в полтора раза — для восточной.

Каждый аспект деятельности человека в Арктике сталкивается с широким спектром рисков. К началу XXI века человечество осознало новый класс рисков, а именно риски, связанные с антропогенным изменением климата, что более заметно в Арктике, где темпы потепления вдвое превышают среднемировые. Глобальный и особенно арктический климат, вероятно, продолжит меняться, тем самым оказывая существенное влияние на будущее социально-экономическое развитие, биоразнообразие, экосистемы и человеческое общество. В работе [Soldatenko and Alekseev, 2020] авторы рассматривают климатические риски, связанные с социально-экономическим развитием Российской Арктики, и предлагают структуру моделирования, которая позволяет заинтересованным сторонам выявлять климатические риски и управлять ими, оценивать экономические последствия изменения климата в Арктике, а также оказывать помощь в разработке стратегий адаптации к изменению климата.

В [Soldatenko and Alekseev, 2020] получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели (РКМ) RCA4 при сценариях изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для 2006–2099 гг. Проанализирована мощность ветроэнергетического потенциала, пропорциональная кубу скорости ветра. Для оценки мощности ветрового потока (МВП) применена процедура коррекции систематической ошибки модельной скорости приземного ветра с использованием данных ERA5 в качестве эталонных с последующей

экстраполяцией скорости ветра на высоту турбины. По расчетам с помощью РКМ RCA4 для XXI в. при обоих сценариях антропогенных воздействий отмечено, в частности, заметное увеличение МВП над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой. Летом проявляется общее увеличение МВП над Северным Ледовитым океаном. При этом изменения больше при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для XXI века. Согласно полученным модельным оценкам, увеличение межсуточных вариаций МВП в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕТЕОРОЛОГИИ АНТАРКТИКИ

Если в Арктике установлена однозначная связь сокращения ледовитости с ростом приповерхностной температуры воздуха в Северном полушарии, то в Южном полушарии в последние десятилетия отмечалась противоположная тенденция, хотя и незначимая, с общим ростом протяженности морских льдов в Антарктике, в отличие от ожидаемого по модельным оценкам уменьшения ледовитости Южного океана. Это противоречие рассматривается в [Мохов и Парфенова, 2020]. Общее увеличение в последние десятилетия протяженности морских льдов в Антарктике, контрастировавшее с быстрым уменьшением общей протяженности арктических морских льдов при сильном арктическом потеплении, сменилось резким уменьшением ледовитости в Южном океане с 2016 г. Отмеченное до этого общее увеличение площади морских льдов в Антарктике объясняется тем, что спутниковые данные для протяженности морских льдов доступны только с конца 1970-х гг., когда отмечалось общее понижение, хотя и относительно слабое, температуры океана в антарктических акваториях. Региональное понижение температуры поверхности океана в антарктических широтах для последних четырех десятилетий на фоне общего потепления Южном полушарии объясняется значимым влиянием естественных климатических квазициклических процессов типа Эль-Ниньо, Антарктической осцилляции и декадной тихоокеанской осцилляции. Для более длительных периодов, в частности для последних шести десятков лет, проявляется уже общий рост температуры поверхности океана в антарктических широтах. При продлении ряда спутниковых данных для морских льдов в ближайшие годы на фоне общего потепления соответственно следует ожидать более значимое проявление общей тенденции уменьшения протяженности антарктических морских льдов. Явные признаки этого проявились в 2016 г., а результаты кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют, что уже в течение последних двух десятилетий проявляется все более

значимая отрицательная корреляция долгопериодных вариаций общей протяженности антарктических морских льдов с температурным режимом в Антарктике и для Южном полушарии в целом в соответствии с прогнозными модельными оценками [Akperov et al., 2020].

В [Мохов и Парфенова, 2021] получены количественные оценки связи межгодовой изменчивости антарктических и арктических морских льдов с изменениями приповерхностной температуры в Северном и Южном полушариях по спутниковым и наземным данным и данным реанализа для последних четырех десятилетий (1980–2019 гг.). Показано, что отмеченное ранее общее увеличение протяженности антарктических морских льдов до последних лет по спутниковым данным, доступным только с конца 1970-х гг., на фоне глобального потепления и быстрого уменьшения протяженности морских льдов в Арктике связано с общим понижением температуры у поверхности в приантарктических широтах с конца 1970-х гг. Это результат регионального проявления естественных колебаний климата с периодами до нескольких десятилетий на фоне глобального векового потепления с относительно слабым температурным трендом над океаном в Южном полушарии. С 2016 г. отмечено резкое уменьшение площади морских льдов в Южном океане. Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о значимой когерентности и отрицательной корреляции с приповерхностной температурой протяженности морских льдов в последние десятилетия не только в Арктике, но и в Антарктике.

Изменения снежного покрова и площади морского льда, связанные с изменением температуры в Северном и Южном полушариях за период 1979–2020 гг., проанализированы с использованием среднемесячных спутниковых данных и реанализа [Mokhov and Parfenova, 2022]. Получены количественные оценки связи между антарктическим и арктическим морским льдом и изменением приземной температуры воздуха. Общее увеличение площади морского льда Антарктики связано с региональным проявлением естественных долговременных климатических режимов с периодами до нескольких десятилетий (на фоне глобального потепления и быстрого сокращения площади морского льда в Арктике). Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа показывают значительную согласованность и отрицательную корреляцию температуры приземного воздуха как в Арктике, так и в Антарктике с соответствующей протяженностью морского льда в последние десятилетия. Отмечены сезонные и региональные особенности чувствительности снежного покрова к изменению температурного режима в Северном полушарии за последние четыре десятилетия. Представлены особенности изменчивости снежного покрова в Евразии и Северной Америке.

Стабильные изотопологи воды (СИВ) являются полезными индикаторами влажно-диабатических процессов в круговороте воды в атмосфере. Они обеспечивают основу для анализа влажных процессов в различных временных масштабах: от крупномасштабного переноса влаги до образования облаков, осадков и мелкомасштабного турбулентного перемешивания. Лазерные спектрометрические измерения на научно-исследовательских судах позволяют получить временные ряды изменчивости изотопного состава водяного пара в пограничном слое океана с высоким разрешением. В исследовании [Thurnherr et al., 2022] авторы представляют пятимесячный непрерывный временной ряд таких судовых измерений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в рамках Антарктической кругосветной экспедиции (Antarctic Circumnavigation Expedition – ACE) в Атлантике и Южном океане за период с ноября 2016 г. по апрель 2017 г. Авторы анализируют причины меридиональных изменений СИВ в морском пограничном слое в различных климатических зонах Атлантического и Южного океана с использованием лагранжевой диагностики источников влаги и связывают вертикальные различия СИВ со скоростью приземного ветра и состоянием поверхности океана. Медианные значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и избытка дейтерия во время ACE непрерывно уменьшаются от низких широт к высоким. Эти меридиональные распределения СИВ отражают климатические условия в месте проведения измерений и местах расположения источников влаги, такие как температура воздуха, удельная влажность и относительная влажность по отношению к температуре поверхности моря. Изменчивость СИВ на данной широте наиболее высока во внетропических и полярных регионах с уменьшением значений к экватору. Такое меридиональное распределение изменчивости СИВ объясняется изменчивостью местоположений источников влаги и связанных с ними условий окружающей среды, а также процессов переноса. Расположенные западнее источники влаги водяного пара во внетропических регионах сильно варьируют по протяженности и широте из-за частого прохождения циклонов и тем самым расширяют диапазон встречающихся значений СИВ в пограничном слое океана. Потеря влаги во время транспортировки также способствует высокой изменчивости СИВ во внетропических регионах. В субтропиках и тропиках устойчивые антициклоны приводят к четко ограниченному узким восточным областям источников влаги, что отражается в слабой изменчивости СИВ в этих регионах. Таким образом, ожидаемая дальность действия сигналов СИВ на данной широте сильно зависит от крупномасштабной циркуляции. Кроме того, временные ряды СИВ, полученные на высотах 8.0 и 13.5 м над поверхностью океана во время ACE, дают оценки вертикальных градиентов СИВ в самом нижнем пограничном слое океана. В сред-

нем, вертикальные градиенты высоты, обнаруженные во время АСЕ, составляют -0.1% для $\delta^{18}\text{O}$, -0.5% для $\delta^2\text{H}$ и 0.3% для избытка дейтерия. Тщательная калибровка и последующая обработка данных СИВ, а также подробный анализ неопределенностей обеспечивают прочную основу для представленных градиентов. Используя данные концентрации морских брызг и состояние моря, мы показываем, что вертикальные градиенты СИВ особенно велики в условиях высокой скорости ветра с повышенным вкладом испарения морских брызг или в условиях низкой скорости ветра из-за слабого вертикального турбулентного перемешивания. Хотя для подтверждения этих результатов необходимы дальнейшие измерения СИВ с более высоким вертикальным разрешением, одновременные измерения СИВ на нескольких высотах во время АСЕ показывают потенциал СИВ в качестве индикаторов вертикального перемешивания и испарения морских брызг в самом нижнем пограничном слое океана [Thurnherr et al., 2022].

В [Сибир и др., 2020] представлены результаты анализа данных наблюдений за общим содержанием озона на российских антарктических станциях Мирный, Новолазаревская и Восток за период 1975–2019 г. и на научно-экспедиционных судах ААНИИ в 2005–2019 г. До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной, в настоящее время наблюдается тенденция возвращения содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры.

В [Jonassen et al., 2019] наблюдения приземного слоя и верхних слоев атмосферы в ходе двух рейсов исследовательских судов и ледовой станции в море Уэдделла в 1992 и 1996 годах используются для проверки четырех текущих продуктов атмосферного реанализа: ERA-Interim, CFSR, JRA-55 и MERRA-2. Все четыре реанализа показывают температуру на высоте 2 м выше, чем наблюдения, а отклонения варьируются от $+2.0\text{ K}$ в CFSR до $+2.8\text{ K}$ в MERRA-2. Все четыре реанализа, как правило, завышают температуру атмосферного пограничного слоя (АПС) с погрешностями до $+1.4\text{ K}$ (ERA-Interim). Формы облачности относительно плохо воспроизводятся реанализами: MERRA-2 и JRA-55 имеют самые сильные положительные и отрицательные отклонения примерно $+30\%$ и -17% соответственно. Оценки погрешностей показывают, что ERA-Interim в целом выглядит лучше других как в сравнении с наблюдениями за приземным слоем, так и с аэрологическими наблюдениями. CFSR занимает второе место, а JRA-55 и MERRA-2 имеют худшие оценки. Завышение температуры АПС согласуется с предыдущими подобными исследованиями в высоких широтах. Делается вывод о необходимости улучшения систем моделирования, включая ассимиляцию данных, а также совер-

шенствование параметризаций АПС и приземного слоя [Jonassen et al., 2019].

С 2004 г. в рамках Российской антарктической экспедиции ежегодно проводятся измерения физико-химических характеристик аэрозолей на борту научно-исследовательских судов в высоких широтах Южного полушария ($34\text{--}72^\circ$ ю.ш.; 45° з.д. – 110° в.д.). В работе [Sakerin et al., 2022] авторы обобщают результаты многолетних (2004–2021 гг.) измерений в этом районе аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ), концентраций аэрозоля и эквивалентного черного углерода (ЭЧУ), а также ионного состава аэрозоля. Общей закономерностью было снижение характеристик аэрозоля с увеличением широты вплоть до побережья Антарктики, где содержание аэрозоля соответствовало глобальному фоновому уровню. Между Африкой и Антарктидой АОТ снизилась с 0.07 до 0.024, объем частиц уменьшился с 5.5 до $0.55\text{ мкм}^3/\text{см}^3$, ЕВС снизился с 68.1 до $17.4\text{ нг}/\text{м}^3$, а суммарная концентрация ионов снизилась с 24.5 до $2.5\text{ мкг}/\text{м}^3$. Полученное пространственное распределение характеристик аэрозоля качественно удовлетворительно соответствовало данным реанализа MERRA-2, но имело количественные различия: модельные значения АОТ были завышены (в среднем на 0.015); при этом концентрации ЭЧУ были занижены (на $21.7\text{ нг}/\text{м}^3$). Интересная особенность была обнаружена в пространственном распределении аэрозолей в районе антарктических островов: на расстоянии 300 км от островов концентрации ЭЧУ снижались в среднем на 29%, а содержание аэрозоля увеличилось в 2.5 раза [Sakerin et al., 2022].

Аэрозольно-оптическая толщина атмосферы, получаемая по результатам прямых спектральных солнечных фотометрических измерений, и интегральная оптическая толщина, определяемая по данным стандартных актинометрических наблюдений за прямой солнечной радиацией, являются показателями оптического состояния атмосферы. В [Sakerin et al., 2022] приводятся количественные оценки величин интегральной прозрачности и аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде, исследуется их многолетняя изменчивость за всю историю проведения наблюдений, а также представлены результаты сопоставления полученных данных с российскими и зарубежными данными, накопленными в других природных регионах и условиях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в периоды без влияния вулканических извержений уровни аэрозольного замутнения атмосферы в Антарктиде на протяжении последних десятилетий являются минимальными на планете и могут рассматриваться в качестве глобальных фоновых характеристик.

С учетом ощутимых изменений климата на планете в целом, особую роль приобретают базы и архивы данных основных климатообразующих ха-

рактических характеристик атмосферы, собранных за длительные периоды времени в различных районах земного шара и, в частности, в полярных областях. Суммарная солнечная радиация входит в число важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля–атмосфера. В [Сибир и др., 2021] приведено описание созданной базы данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях. База данных предназначена для исследования радиационного режима Антарктики с начала актинометрических наблюдений и до настоящего времени. На основе содержащейся в ней информации были получены оценки характеристик изменчивости суточных, месячных и годовых сумм суммарной радиации на станциях Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская и Прогресс за весь период наблюдений по 2019 г. Результаты их анализа свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в поступлении суммарной солнечной радиации на антарктическую поверхность за более чем шестидесятилетний период актинометрических наблюдений.

В [Екайкин и др., 2020] показано, что снегомерные речные наблюдения в Центральной Антарктиде систематически занижают величину прироста высоты снежного покрова. Для учета этого занижения разработаны два метода для расчета соответствующей поправки в данные снегомерных наблюдений на полигоне станции Восток. Первый метод основан на применении “закона Зорге”, рассмотрены также два независимых метода для оценки скорости снегонакопления в районе станции Восток – геодезические данные о скорости погружения слоев снега и гляциологические данные по снежным шурфам. Наиболее достоверная оценка скорости снегонакопления в данном районе составила 2.26 ± 0.10 г/см² за год, что на $(8 \pm 4)\%$ больше, чем по нескорректированным результатам снегомерных наблюдений.

Изучение изотопного состава ледяных кернов дает нам ценную информацию о климате прошлого. Для правильной интерпретации данных, полученных из ледяных кернов, необходимо понимать процесс формирования изотопного сигнала в атмосферных осадках. В [Тебенкова и др., 2021] исследована зависимость изотопного состава трех основных для Центральной Антарктиды типов осадков – ледяных игл, изморози и снега – от приземной температуры воздуха. Использованы образцы, отобранные в районе российской внутриконтинентальной станции Восток в период с 1998 по 2020 г. Коэффициенты линейной регрессии между концентрацией дейтерия (δD) и температурой различаются статистически незнано для всех типов осадков в пределах года: $2.93 \pm 0.51\%$ °C⁻¹ для ледяных игл, $2.32 \pm 1.34\%$ °C⁻¹ для снега и $2.52 \pm 0.35\%$ °C⁻¹ для изморози. Сделан анализ сезонной изменчивости изотопно-температурной зависимости для ледяных игл. Для зимнего периода связь между изо-

топным составом и температурой воздуха не обнаружена. Летом наблюдается наибольший наклон изотопно-температурной зависимости, равный $5.34 \pm 3.11\%$ °C⁻¹, наклон для осеннего периода равен $2.1 \pm 1.3\%$ °C⁻¹, тогда как для весеннего периода нет достаточного количества данных для анализа. В исследовании не использовались осадки, отобранные во время метелей, поскольку было установлено, что метель привносит в отобранную пробу снег с другим изотопным составом.

В [Екайкин и др., 2022] представлены данные о плотности снежно-фирновой толщи в интервале глубины 0–70 м в районе станции Восток (Антарктида). Охарактеризованы основные стадии уплотнения (быстрый рост плотности в пределах верхних 0.3 м, переход от снега к фирну на глубине 22.5 м). Выполнены тесты с помощью полуэмпирической и нестационарной физической моделей с целью изучения гляциоклиматических условий, при которых происходил. В первом приближении распределение плотности можно объяснить исходной плотностью снега 0.35 г/см³, температурой поверхности ледника –57°C и скоростью снегонакопления 1.8–2.1 г см⁻²/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кёниг Т. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменения в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18–29.
- Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А., Парфенова М.Р., Ринке А. Особенности температурной стратификации и ее изменений в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельным расчетам // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 19–27.
- Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р., Дембицкая М.А., Бокучава Д.Д., Ринке А., Дорн В. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 529–538.
- Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Лисицин А.П., Шевченко В.П. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2020а. Т. 33. № 6. С. 421–429.
- Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Жученко Н.А., Маринайте И.И. Химический состав приземного атмосферного аэрозоля в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген) по результатам многолетних исследований. // Лед и Снег. 2020б. Т. 60. № 1. С. 85–97.
- Демчев Д.М., Кулаков М.Ю., Махитас А.П., Махотина И.А., Фильчук К.В., Фролов И.Е., Верификация данных о приповерхностной температуре воз-

- духа реанализов ERA-Interim и Era-5 в Арктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 36–45.
- Екайкин А.А., Тебенькова Н.А., Липенков В.Я., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Рихтер А. Недооценка скорости снегонакопления в Центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным речных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 114–125.
- Екайкин А.А., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Липенков В.Я., Тебенькова Н.А., Туркеев А.В. Профиль плотности снежно-фирновой толщи в районе станции Восток, Центральная Антарктида // Лед и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 504–511.
- Климат Арктики: процессы и изменения / Под ред. И.И. Мохова, В.А. Семенова. М.: Физматкнига, 2022. 360 с.
- Макитас А.П., Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Миллер Е.А., Троицкий А.В., Кустов В.Ю., Большакова И.И., Ризе Д.Д. Опыт дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы в период дрейфа НЭС “Академик Трешников” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 349–363.
- Махотина И.А., Чечин Д.Г., Макитас А.П. Радиационное воздействие облаков на морской лед в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный полюс” –37, –39 и –40. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 451–460.
- Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. / Под ред. В.Г. Бондура, И.И. Мохова, А.А. Макоско. М.: РАН. 2022. 388 С.
- Мохов И.И. Аналитические условия формирования Арктического усиления в Земной климатической системе // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 103–108.
- Мохов И.И. Особенности современных изменений в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462.
- Мохов И.И., Малахова В.В., Аржанов М.М. Модельные оценки внутри- и межвековой деградации “вечной мерзлоты” в регионе полуострова Ямал при потеплении // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 219–226.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным в связи с температурными изменениями // Метеорология и гидрология. 2022а. № 2. С. 32–44.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Особенности изменчивости антарктических и арктических морских льдов в последние десятилетия на фоне глобальных и региональных климатических изменений // Вопросы географии. 2020. Сб. 150. С. 304–319.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь площади снежного покрова и морских льдов с температурными изменениями в Северном полушарии по данным последних десятилетий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 4. С. 411–423.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979–2020 гг. // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 71–77.
- Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в арктическом бассейне по ансамблевым модельным расчетам для 21 века // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193.
- Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.
- Радионон В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е. Многолетние изменения интегральной и спектральной прозрачности атмосферы по данным наблюдений в обсерватории Мирный (Антарктида). // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 35–44.
- Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглицкий И.А., Макаров В.И., Макитас А.П., Попова С.А., Радионон В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” в 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 421–429.
- Священников П.Н., Прохорова У.В., Иванов Б.В. Сравнение атмосферной циркуляции в районе архипелага Шпицберген во время потепления 1920–1950 гг. и в современный период // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 36–44.
- Сибир Е.Е., Радионон В.Ф., Русина Е.Н. Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 33–43.
- Сибир Е.Е., Радионон В.Ф., Русина Е.Н. База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ изменения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 249–260.
- Скаун А.А., Чихачев К.Б., Екайкин А.А., Козачек А.В., Владимирова Д.О., Верес А.Н., Веркулич С.Р., Сидорова О.Р., Демидов Н.Э. Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 379–394.
- Тебенькова Н.А., Екайкин А.А., Лэппле Т., Нотц Д., Козачек А.В., Верес А.Н. Связь изотопного состава разных типов осадков в Центральной Антарктиде с температурой воздуха // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 368–381.
- Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Parfenova M.R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Guitjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX). // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182, P. 103005.
- Akperov M., Semenov V.A., Mokhov I.I., Dorn W., Rinke A. Impact of Atlantic water inflow on winter cyclone activity in the Barents Sea: insights from coupled regional climate model simulations // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. № 2. P. 024009.
- Akperov M., Zhang W., Miller P.A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Matthes H., Smith B., Rinke A. Responses of Arctic cyclones to biogeophysical feedbacks under future warm-

- ing scenarios in a regional Earth system model. // *Environ. Res., Lett.* 2021, V. 16. № 6. P. 064076.
- Arzhanov M.M., Malakhova V.V., Mokhov I.I. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrates stability zone of the Yamal Peninsula permafrost. // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020. V. 31. № 4. P. 487–496.
- Chechin, D., Makhotina, I., Lüpkes, C., Makshtas, A. Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night. // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2019. V. 76. № 8. P. 2481–2503.
- Dahlke S., Hughes N.E., Wagner P.M., Gerland S., Wawrzyniak T., Ivanov B.V., Maturilli M. The observed recent surface air temperature development across Svalbard and concurring footprints in local sea ice cover. // *Int. J. Climatol.* 2020. V. 40. P. 5246–5265.
- Heinemann G., Drüe C., Makshtas A.A. Three-Year Climatology of the Wind Field Structure at Cape Baranova (Severnaya Zemlya, Siberia) from SODAR Observations and High-Resolution Regional Climate Model Simulations during YOPP // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 957.
- Heinemann G., Drüe C., Schwarz P.; Makshtas A. Observations of Wintertime Low-Level Jets in the Coastal Region of the Laptev Sea in the Siberian Arctic Using SODAR/RASS // *Remote Sens.* 2021b. V. 13. P. 1421.
- Heinemann G., Willmes S., Schefczyk L., Makshtas A., Kustov V., Makhotina I. Observations and Simulations of Meteorological Conditions over Arctic Thick Sea Ice in Late Winter during the Transarktika 2019 Expedition // *Atmosphere*. 2021a. V. 12. P. 174.
- Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B. et al. Exceptional warming over the Barents area // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 9371.
- Ivanov B., Karandasheva T., Demin V., Revina A., Sviashchennikov P., Isaksen K., Førland E.J., Nordli Ø., Gjeltén H.M. Assessment of long-term changes surface air temperature from the High Arctic archipelago Franz Joseph Land from 1929 to the present (2017) // *Czech Polar Report*. 2021a. V. 11. № 1. P. 114–133.
- Ivanov B., Prokhorova Y., Sviashchennikov P. Analysis of continentality and anomaly of Svalbard climate according to observations of surface air temperature in the second half of the XX century // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021b. V. 606. № 012021.
- Ivanov B.V. Comparing the “earlier” and the “modern” warming in West Arctic on example of Svalbard. // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 231. № 012023.
- Jonassen M.O., Valisuo I., Vihma T., Uotila P., Makshtas A.P., Launiainen J. Assessment of Atmospheric Reanalyses With Independent Observations in the Weddell Sea, the Antarctic. // *JGR Atmospheres*. 2019. V. 124. № 23. P. 12468–12484.
- Juutinen S., Aurela M., Tuovinen J.-P., Ivakhov V., Linkosalmi M., Räsänen A., Virtanen T., Mikola J., Nyman J., Vähä E., Loskutova M., Makshtas A., and Laurila T. Variation in CO₂ and CH₄ fluxes among land cover types in heterogeneous Arctic tundra in northeastern Siberia. // *Biogeosciences*. 2022. V. 19. P. 3151–3167.
- Makhotina I.A., Makshtas A.P., Kustov V.Yu. Sea ice – Atmosphere heat exchange during expedition “Transarctica-2019” // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 606. № 012032.
- Mokhov I.I. and Parfenova M.R. Changes of the sea ice and snow cover extent associated with temperature changes in the Northern and Southern Hemispheres in recent decades // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022. V. 1040. № 012016.
- Prokhorova U.V. and Uragildeeva A.V. Effect from polynyas in the Siberian Arctic seas to atmospheric transport of heat and moisture // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 606. № 012047.
- Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Radionov V.F. and Chernov D.G. Comparison of Average Aerosol Characteristics in Neighboring Arctic Regions // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. V. 32. № 1. P. 33–40.
- Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Pol'kin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D. Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in the Russian sector of the Arctic Ocean // *Atmosphere*. 2020. V.11. № 11. P. 1170.
- Sakerin S.M.; Golobokova L.P.; Kabanov D.M.; Khuriganova O.I.; Pol'kin V.V.; Radionov V.F.; Sidorova O.R.; Turchinovich Y.S. Spatial distribution of aerosol characteristics over the South Atlantic and Southern Ocean using multiyear (2004–2021) measurements from Russian Antarctic Expeditions // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 3. P. 427.
- Soldatenko S.A., Alekseev G.V. Managing climate risks associated with socio-economic development of the Russian Arctic. // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 606. № 012060.
- Thurnherr I., Kozachek A., Graf P., Weng Y., Bolshiyarov D., Landwehr S., Pfahl S., Schmale J., Sodemann H., Steen-Larsen H.C., Toffoli A., Wernli H., and Aemisegger, F. Meridional and vertical variations of the water vapour isotopic composition in the marine boundary layer over the Atlantic and Southern Ocean // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20. P. 5811–5835.

Russian Research in 2019–2022 of Polar Meteorology

A. V. Klepikov*

Arctic and Antarctic Research Institute, ul. Beringa 38, Saint-Petersburg, 199397 Russia

**e-mail: klep@aari.u*

This publication is an overview of the results of Russian polar research in 2019–2022, based on paper prepared by the Commission on Polar Meteorology of the National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20 2023).

Keywords: Arctic, Antarctic, climate change, meteorology, natural variability, warming