

УДК 551.506:551:582

ПОЛЯРНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ (РЕЗУЛЬТАТЫ РОССИЙСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2015–2018 гг.)

© 2021 г. А. В. Клепиков^{а, *}, **А. И. Данилов^а**

^аАрктический и антарктический научно-исследовательский институт,
ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397 Россия

*e-mail: klep@aari.ru

Поступила в редакцию 18.01.2020 г.

После доработки 12.02.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Представлен обзор результатов российских полярных исследований в 2015–2018 гг., подготовленный в Комиссии по полярной метеорологии Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVII Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Монреаль, Канада, 8–18 июля 2019 г.)^{1, 2}.

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

DOI: 10.31857/S0002351521030068

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕТЕОРОЛОГИИ АРКТИКИ

Арктические регионы характеризуются самыми сильными и быстрыми климатическими изменениями. Скорость потепления в Арктике в последние десятилетия существенно больше глобальной и полушарной скорости. Отмеченное арктическое усиление, характеризующее степень более резких изменений климата в высоких широтах по сравнению с более низкими, связано с влиянием ряда факторов. На проявление арктического усиления влияют зависимость теплового излучения и альбедо системы от температуры, изменения вертикальной температурной стратификации атмосферы, меридионального теплопереноса, содержания в атмосфере водяного пара и облаков. Наиболее впечатляющие изменения в последние десятилетия связаны с очень быстрым уменьшением ледовитости Арктического океана, особенно в конце лета. Происходящие изменения свидетельствуют о возможной перспективе отсутствия морских льдов в Арктическом бассейне в летне-осенние месяцы уже в первой половине XXI века. Изменение режима распространения морских льдов в Арктике имеет большое значение в связи с перспективой развития арктических морских

транспортных систем и освоением шельфа. Все эти проблемы представлены в развернутых обзорах [1–3].

В работе [4] представлена оценка изменения климата в Арктике в процессе развития глобального потепления и рассмотрена роль различных факторов в усилении изменений в Арктике. Показано, что повышение температуры приземного воздуха началось в 1990-е гг. и достигло максимума в 2012 г. (по данным за 1951–2014 гг.) Одновременно произошло быстрое сокращение ледяного покрова Арктики в конце летнего периода и достигло самого глубокого минимума в сентябре 2012 г. Изменения летней температуры воздуха в морской Арктике и протяженность морского льда в сентябре коррелируют с коэффициентом -0.93 для 1980–2014 гг. Квадратичные и линейные модели зависимости между летней температурой воздуха и протяженностью морского льда указывают на период с 2029 по 2037 г. как на период исчезновения льда в сентябре. Приток теплой и соленой атлантической воды и смещение ее границ распространения в субатлантической Арктике, особенно значительное в Баренцевом море, влияют на изменение протяженности морского льда в зимний период. Показано, что наибольший вклад в усиление потепления климата Арктики вносит перенос тепла атмосферой к полюсам. Этот перенос составляет почти 90% тренда средней температуры в Арктике, большую часть тренда средней температуры в Северном полушарии и более по-

¹ Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences (2015–2018). Ed. by I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky. Moscow: MAKS Press, 2019. 332 p.

² Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 3–5.

ловины тренда глобальной средней температуры с 1969–2008 гг. [4].

В [5] проверяется предположение, что усиление потепления в Арктике, вызывающее уменьшение меридионального градиента температуры в тропосфере, увеличивает колебания планетарных волн, приводящих к экстремально погодным условиям в средних широтах. Для проверки этого изучается реакция атмосферы на арктическое усиление потепления на прогнозируемый летний период (при котором океан свободен от морского льда) с использованием модели атмосферы с заданными граничными условиями на поверхности из современной планетарной климатической модели. Помимо стандартного моделирования глобального потепления, был также проведен эксперимент по чувствительности к аномалиям температуры морского льда и температуры поверхности моря в Арктике. Показано, что при глобальном потеплении усиление переноса тепла на север вносит основной вклад в уменьшение меридионального градиента температуры в полярной тропосфере в холодное время года, вызывая более сильные колебания планетарных волн. Однако, хотя усиление потепления в Арктике значительно увеличивает температуру приземного воздуха в полярном регионе, оно недостаточно велико, чтобы вызвать рост колебаний планетарных волн [5].

В [6] обсуждаются возможные механизмы формирования значимых погодно-климатических аномалий на территории России в последние годы и их связь с глобальными изменениями климата и естественными квазициклическими процессами. Анализируются экстремальная жара 2010 г., наводнение на Амуре 2013 г. и аномально холодные зимы, связанные с формированием долгоживущих блокирующих антициклонов, для которых при продолжении глобального потепления можно ожидать общего увеличения повторяемости. При определении связи таких событий с глобальным потеплением необходимо учитывать эффекты регионально и глобально климатически значимых естественных квазициклических процессов, в том числе атлантического долгопериодного колебания, тихоокеанской десятилетней осцилляции и явления Эль-Ниньо–южное колебание [6].

Оценка взаимосвязи между изменениями площади морского льда и климатом Арктики представлена [7]. Повышение температуры приземного воздуха (SAT) в морской Арктике хорошо связано с уменьшением площади морского льда (SIE) летом. Была обнаружена сильная корреляция (коэффициент равен -0.93) между летним SAT в морской Арктике и индексом морского льда за сентябрь 1980–2014 гг. (среднее значение SIE в Арктике с 1978 г. по спутниковым данным в миллионах км²). На основании этого факта аномалии SIE в Аркти-

ке для сентября были реконструированы с начала XX века с использованием линейной регрессии. Реконструированная SIE показывает существенное снижение в 1930–1940-х гг. с минимумом в 1936 г., что, однако, составляет только половину снижения в 2012 г. Сильная связь между летней SAT и сентябрьской SIE использовалась для оценки начала исчезновения морского льда в Северном Ледовитом океане летом. Согласно оценкам, сделанным с помощью простой регрессионной модели, можно ожидать сезонного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда уже в середине 2030-х гг. Влияние притока теплой и соленой атлантической воды (AW) на зимнюю SIE было оценено на примере Баренцева моря. Эта оценка выявляет когерентную пространственную картину распространения AW, представленную распределением солёности поверхности и положением кромки морского льда, а также значительную корреляцию между притоком AW и максимальной площадью морского льда [7].

В [8] представлен обзор недавно опубликованных результатов исследований по ключевым проблемам эволюции морского ледяного покрова в Арктике. Показано, что потепление климата, отражаемое повышением приповерхностной температуры воздуха, и сокращение ледового покрова развиваются с высокой степенью согласия в летний сезон. На этом основании восстановлены аномалии сентябрьской площади льда с 1900 г., показавшие значительное понижение в 1930–1940 гг., но почти в 2 раза меньшее, чем в 2007–2012 гг. Влияние колебаний притока теплой и соленой атлантической воды отмечено в изменениях максимальной площади льда зимой в Баренцевом море. Установлено усиление положительного тренда температуры воздуха поздней осенью – в начале зимы 1993–2012 гг. в результате увеличения площади открытой воды в конце лета. Внутренние закономерности изменчивости площади льдов позволили разработать прогноз ежемесячных значений протяженности морских льдов с заблаговременностью от полугода до двух лет, а их тесная связь с температурой воздуха летом использована для оценки наступления летнего очищения Арктики ото льда.

Влияние аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в низких широтах Северной Атлантики на морской ледяной покров и температуру приземного воздуха в Арктике обсуждается в [9, 10]. Проанализированы данные о ТПО в Атлантическом океане из HadISST, ряды температуры воды на разрезе по Кольскому меридиану, а также среднемесячные данные о протяженности морского льда и температуре поверхности воздуха в Северном Ледовитом океане и Северном полушарии. Кросс-корреляционный анализ применялся для определения максимальных коэффициентов корреляции между аномалиями ТПО, климати-

ческими характеристиками и их соответствующими задержками во временных рамках от 33 до 38 мес. Обнаружено наличие тесной связи между изменениями ТПО Атлантики в низких широтах и площадью морского льда в Северном Ледовитом океане с коэффициентами корреляции до 0.90 и задержками до 3 лет. Предложен механизм формирования дистанционного воздействия низкоширотных аномалий ТПО на аномалии морского льда в Северном Ледовитом океане.

Существуют разные точки зрения на роль атмосферных притоков тепла и влаги в усилении летнего потепления в Арктике, которые часто основаны на анализе среднегодовых данных. В [11, 12] выполнен анализ летних атмосферных переносов, их влияния на температуру воздуха и содержание водяного пара в атмосфере, тенденций многолетних изменений переносов, отмечена важная роль притоков влаги из Северного Ледовитого океана в летний сезон и их влияние на рост нисходящей длинноволновой радиации и усиление сокращения площади льда.

В [13] показано, что запаздывание изменений концентрации углекислого газа в атмосфере относительно изменений глобальной приповерхностной температуры, полученное по данным палеореконокструкций, воспроизводится в рамках общепринятых климатических моделей и не противоречит выводам о ключевой роли антропогенного парникового эффекта в современных изменениях климата. Также получено, что зависимость растворимости углекислого газа в океане от температуры не меняет принципиальным образом взаимное запаздывание между концентрацией углекислого газа в атмосфере и глобальной приповерхностной температурой при внешнем воздействии на систему.

Прогнозы приземной температуры воздуха, осадков и испарения в Арктике в XXI веке с использованием ансамбля климатических моделей CMIP5 проанализированы в [14, 15]. Прогнозы показаны для трех сценариев радиационного воздействия на климатическую систему: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. Проводится сопоставление с результатами расчетов с моделями CMIP3 для сценариев SRES.

В [16] проведено исследование взаимосвязей между климатическими процессами Северной Атлантики и Арктики. Показано, что таяние льда в Арктике в 70–90-х гг. XX столетия связано с изменчивостью климата в Северной Атлантике, хорошо отражаемой в индексах Атлантической мультидекадной осцилляции и интенсивности Атлантической меридиональной циркуляции. Последний отражает также климатические изменения в потоках тепла и пресной воды с поверхности Северной Атлантики в атмосферу в средних широтах. Предложен физико-статистический прогностический сценарий климатиче-

ских изменений (комбинированный сценарий) на основе композиции “парникового” (внешнее воздействие) и “циклических” (внутренняя изменчивость климатической системы) эффектов. Проведены численные эксперименты с моделью общей циркуляции океана INMOM по ретроспективному и прогностическому воспроизведению термохалинной циркуляции и морского льда в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах. Анализ результатов расчетов и исследование их циклических свойств позволили по-новому подойти к описанию климатической изменчивости Арктики и Северного морского пути. Этот подход позволяет описывать рост температуры, вызванный не только эмиссией парниковых газов, но и изменчивостью климата (в частности похолодание, наблюдавшееся в 1950–1970-х гг.). Предложенный комбинированный сценарий климатических изменений свидетельствует о возможном похолодании в Арктике и соответствующем снижении продолжительности навигационного периода Северного морского пути в ближайшие 10–20 лет. В целом исследование направлено на оценку того, в какой степени изменчивость Северной Атлантики влияет на вариации климата Евразии, чтобы учесть их при последующем прогнозировании.

В [17] исследовано влияние притока атлантической воды на колебания климата в Баренцевом море. Исходными данными послужили ряды температуры воды на разрезе вдоль Кольского меридиана, ежемесячные значения площади льда, температуры воздуха на станциях, давления на уровне моря по данным реанализа, температуры поверхности воды. Использованы методы многомерного корреляционного, спектрального и факторного анализа, EOF-разложения. Установлено, что изменения притока атлантической воды определяют основную часть межгодовой изменчивости площади льда, температуры воды и температуры воздуха в Баренцевом море в холодную часть года. Влияние региональной циркуляции атмосферы на межгодовую изменчивость указанных характеристик мало. Обнаружено влияние аномалий температуры воды в районе Ньюфаундленда и в экваториальной области Северной Атлантики на характеристики климата Баренцева моря, реакция которых отстает от соответствующих аномалий от 9 до 58 мес. Высокий уровень корреляции между ними создает возможность разработки метода статистического прогноза площади льда и температуры воды в Баренцевом море с заблаговременностью до 4 лет.

В [18] рассматриваются возможности прогнозирования для полярных районов от суточного к сезонному масштабу. В последние годы полярные регионы привлекают к себе все больше внимания, чему способствуют ощутимые последствия антропо-

погенного изменения климата. Изменение климата в полярных регионах открывает новые возможности, такие как сокращения морских транспортных путей между Европой и Восточной Азией, но также и новые риски, такие как возможность аварий или чрезвычайных ситуаций в морях, покрытых льдом. Утверждается, что системы прогнозирования окружающей среды для полярных регионов менее развиты, чем где-либо еще. Для такой ситуации есть много причин, в том числе то, что полярные регионы исторически имеют более низкий приоритет, там меньше объем наблюдений на месте и больше локальных физических процессов, которые хуже представлены в моделях. Сопоставлена относительная важность различных физических процессов в полярных и низких широтах, проиллюстрирована необходимость специальных усилий по полярному прогнозированию. Определены приоритеты исследований, которые помогут расширить возможности полярного прогнозирования. Приоритеты включают улучшение системы наблюдений в полярных районах, использование объединенных моделей атмосферы, морского льда и океана даже для краткосрочного прогнозирования и улучшение понимания связи полярных широт и более низких широт и их роли для прогнозирования. С учетом масштабности решения предстоящих задач в суровых и удаленных полярных регионах утверждается, что быстрый прогресс будет возможен только при скоординированных международных усилиях.

В [19] рассмотрено влияние глобального потепления и быстрого сокращения площади морского льда в Арктике (вплоть до формирования в летний период безледных условий в Северном Ледовитом океане) на гидрологический режим в Северной Евразии. Выполнены ансамблевые расчеты климата и оценены изменения влагооборота атмосферы и водного баланса на крупных водосборах после исчезновения многолетнего морского льда в Арктике. На примере крупных водосборов сибирских рек показаны существенные изменения гидрологического режима, которые особенно проявляются в период интенсивного таяния снега — весной и в начале лета. Установлено, что ожидается увеличение повторяемости весенних паводков на речных водосборах, примыкающих к Северному Ледовитому океану. Показано, что сокращение ледяного покрова Северного Ледовитого океана не оказывает значительного влияния на изменение гидрологического цикла в Северной Евразии в отличие от глобального потепления.

В [20] для проведения численных экспериментов с гидрологической моделью CaMa-Flood были использованы ансамблевые расчеты изменения климата по региональной климатической модели ГГО (разрешение 25 км) для Северной Евразии.

С использованием этого подхода оцениваются неопределенности в прогнозах максимального расхода воды в реках и риски наводнений к 2050–2059 гг. по сравнению с периодом 1990–1999 гг. в соответствии со сценарием IPCC RCP8.5. Большой размер ансамбля (30 членов) наряду с достаточно высоким разрешением моделирования позволяет эффективно оценивать естественную изменчивость климата и расширяет наши возможности прогнозировать будущие изменения в экстремальных гидрологических явлениях. Показано, что годовой максимальный сток рек может почти удвоиться к середине XXI века в устьях крупных сибирских рек. В западных регионах незначительно возрастут риски опасных наводнений по сравнению с естественной климатической изменчивостью. Прогнозируется, что максимальная годовая площадь затопления в Сибири увеличится в основном на 2–5% по сравнению с исходным периодом. Обсуждается вклад естественной изменчивости климата в различных временных масштабах в неопределенность ансамблевого прогноза. Анализ показывает, что ожидаются значительные изменения в вероятности экстремального стока рек в местах расположения ключевых гидроэнергетических объектов. Делается вывод, что необходимы обширные исследования для разработки рекомендаций по поддержанию региональной энергетической безопасности.

Климатология облачности над Норвежским, Баренцевым и Карским морями (НБК), основанная на долгосрочных визуальных приземных наблюдениях, представлена в [21]. Среднегодовая общая облачность (СОО) над НБК практически одинакова над покрытой морским льдом (МЛ) частью поверхности и открытой водой (ОВ): 73 ± 3 и $76 \pm 2\%$ соответственно. В целом, СОО имеет более высокую внутри- и межгодовую изменчивость над МЛ, чем над ОВ. Снижение СОО в середине XX века и увеличение в последние несколько десятилетий было обнаружено на отдельных станциях и для НБК в целом. В большинстве случаев эти изменения статистически значимы с величинами, превышающими неопределенность данных, связанную с приземными наблюдениями. Наиболее ярко выраженные тенденции наблюдаются осенью, когда происходят самые большие изменения сплоченности морского льда (СМЛ). СОО над ПЛ существенно коррелирует с СМЛ в Баренцевом море, со статистически значимым коэффициентом корреляции между годовым СОО и СМЛ. Облачность над ОВ слабо коррелирует с СМЛ. Общее увеличение частоты разорванной и рассеянной облачности и уменьшение частоты облачности и безоблачности было обнаружено над ОВ. Эти изменения статистически значимы и могут быть связаны с долговременными изменениями морфологических типов облач-

ности, а именно с увеличением количества кучевых и уменьшением количества слоистых облаков.

В исследовании [22] сравниваются сезонные вариации поверхностных потоков (турбулентные, радиационные и почвенного тепла) и другие вспомогательные данные об атмосфере, подстилающей поверхности и вечной мерзлоте, основанные на натурных данных, полученных в обсерваториях, расположенных на побережье Северного Ледовитого океана. Осредненные за час многолетние ряды данных со станций Эврика (Нунавут, Канада) и Тикси (Восточная Сибирь, Россия) анализируются более подробно, чтобы выявить сходства и различия в сезонных циклах на этих двух арктических станциях, которые расположены на существенно разных широтах (80.0° с.ш. и 71.6° с.ш. соответственно). Хотя в годовых циклах различных метеорологических параметров и потоков существуют значительные общие черты, различия в широте, местной топографии, облачности, снегопадах и характеристиках почвы приводят к заметным различиям в потоках и структурах атмосферного пограничного слоя и профилях температуры верхнего слоя почвы. Хотя участки более высоких широт (в данном случае Эврика) обычно получают меньше годовой приходящей солнечной радиации, зато они получают больше общей дневной приходящей солнечной радиации в течение летних месяцев, чем участки более низких широт (в данном случае Тикси). Это приводит к парадоксальному состоянию, когда средний активный слой (или линия оттаивания) глубже, а температура верхнего слоя почвы в середине лета выше в Эврике, которая расположена почти в 10° к северу от Тикси. В исследовании подчеркиваются различия в сезонных и широтных вариациях приходящей коротковолновой и чистой радиации, а также эффекты уменьшения облачности, которые приводят к временным и пространственным различиям в структуре пограничного слоя атмосферы и самого верхнего слоя почвы. В частности, теплый сезон короче, а амплитуда поверхностных потоков в полдень в середине лета обычно меньше в Эврике, чем в Тикси. В темную полярную ночь и в холодное время года, когда земля покрыта снегом, а температура воздуха ниже нуля, приповерхностная среда обычно стабильно стратифицирована, а среднечасовые турбулентные потоки довольно малы и нерегулярны, в среднем, с небольшими потоками явного тепла, направленными вниз и направленными вверх потоками скрытого тепла и двуокиси углерода. Величина турбулентных потоков быстро увеличивается, когда снег исчезает с поверхности, а температура воздуха поднимается выше нуля во время весеннего таяния и в конечном итоге достигает летнего максимума. В течение летних месяцев обычно наблюдаются сильные восходящие потоки явного и скрытого тепла

и нисходящий поток углекислого газа (поглощение поверхностью), что указывает на постоянную нестабильную (конвективную) стратификацию. Из-за совместного воздействия большой продолжительности дня (например, в Эврике) и высоты Солнца над горизонтом конвективный пограничный слой формируется в высоких широтах Арктики и летом может достигать долгоживущих квазистационарных состояний. В конце лета и в начале осени все турбулентные потоки быстро уменьшаются по величине, когда температура воздуха понижается и опускается ниже нуля.

Статья [23] продолжает цикл работ по описанию современного климата приземной атмосферы Северной Якутии и, более подробно, района Гидрометобсерватории Тикси. Климатические характеристики минимальной и максимальной температуры воздуха получены по данным стандартных метеорологических измерений с 1978 по 2010 г. на 22 морских и континентальных ГМС, а для ГМО Тикси — по всем доступным данным с 1936 по 2015 г. Приведенные оценки дополняют информацию климатических справочников, основанную на данных, полученных до 1980 г., а на ряде ГМС и до 1965 г. Представлены таблицы основных характеристик экстремумов по месяцам, карты пространственного распределения и сопряженности, годовые экстремумы (наибольшие и наименьшие значения, их распределение по месяцам и тренды), климатические параметры амплитуды годового хода, оценки экстремальных значений температуры, возможных один раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Дополнительно исследованы синоптические условия возникновения штормов и резких перепадов температуры.

Результаты сравнительного анализа замеров осадков российскими и норвежскими датчиками в Баренцбурге, Западный Шпицберген, обсуждаются в [24]. В [25, 26] обсуждаются результаты измерений альbedo поверхности снежного ледника Свальбарда на примере ледника Альдегонда (залив Гринфьорд) и окрестностей российского поселка Баренцбург, полученные в последние годы, включая полевую фазу МПГ 2007–2008 гг. Проанализирована пространственная и временная изменчивость альbedo и ее связь с поверхностным антропогенным загрязнением.

Данные о спектральном составе коротковолнового излучения, отражающегося от снега и глубоко проникающего в снежный покров, полученные в районе поселка Баренцбург (Свальбард), обсуждаются в [27]. Измерения проводились с помощью спектрального радиометра TriOS Ramses в диапазоне длин волн 280–950 нм. Полученные результаты позволяют более корректно учесть влияние антропогенного загрязнения на радиационные свойства снежного покрова в условиях производ-

ственной деятельности по добыче и сжиганию угля в Баренцбурге.

В [28] обобщены результаты наблюдений за концентрацией метана в приповерхностном слое атмосферы, выполненных в экспедициях Арктического и антарктического научно-исследовательского института в 2002–2014 гг. Наблюдения проводились на дрейфующих станциях “Северный полюс-36” и “Северный полюс-39” в Центральной Арктике, в Гидрометеобсерватории Тикси, расположенной на берегу моря Лаптева в зоне многолетней мерзлоты и на научно-исследовательской станции “Остров Самойловский” в дельте р. Лены.

В [29] рассматриваются эпизодические выбросы метана объемом 4 млн^{-1} в нижний слой атмосферы вблизи материкового склона Северного Ледовитого океана. Установлено, что такие выбросы метана могут быть связаны с эрозией осадочных пород, содержащих газогидраты, например, в результате действия мутьевых (аналог селевых) потоков, вызванных неустойчивостью склоновых течений, а также геологической активностью в зоне больших перепадов глубин. Отмечается повышенный фон концентрации метана в центральной части Северного Ледовитого океана, вызванный, вероятно, биологической активностью в толще морского льда и на его нижней границе.

В [30] с использованием модели донных отложений ИФА РАН и модели циркуляции Северного Ледовитого океана Северной Атлантики ИВМиМГ СО РАН проанализирован отклик характеристик многолетнемерзлого слоя донных отложений и зоны стабильности субквальных метангидратов в зависимости от значений параметров задачи интенсивности геотермального потока тепла на нижней границе расчетной области донных отложений, а также глубины этой границы. В [31] проведены расчеты термического состояния грунтов п-ва Ямал и сопредельных регионов для последних 90 тыс. лет. Согласно полученным результатам при климатических условиях максимума оледенения около 90 тыс. лет назад глубина верхней границы зоны стабильности метангидратов в этом регионе могла достигать поверхности. Получены оценки влияния современных климатических изменений на прочность мерзлых пород и устойчивость реликтовых метангидратов п-ва Ямал. Формирование воронок после газовых выбросов на Ямале может быть связано с дестабилизацией реликтовых метангидратов в результате повышения приповерхностной температуры в последние годы. В [32] на основе результатов моделирования термического режима многолетнемерзлых грунтов и модельных расчетов климатических изменений в пределах последних 100 тыс. лет оценивается влияние современных климатических изменений на проч-

ность мерзлых пород и устойчивость реликтовых газовых гидратов п-ова Ямал.

В [33] с использованием ансамбля модельных расчетов термического режима многолетнемерзлых грунтов и палеореконструкций получены оценки устойчивости метангидратов континентальной криолитозоны регионов Северной Евразии и Северной Америки с риском газовых выбросов в атмосферу в результате возможной диссоциации газгидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях. В [34] представлены результаты моделирования изменений термического режима многолетнемерзлых грунтов с оценкой термобарических условий формирования, стабильности и диссоциации газовых гидратов на п-ве Ямал с учетом образования и деградации покровного оледенения, трансгрессии моря и различных геотермальных потоков.

В [35] с использованием спутниковых данных AIRS для периода 2003–2016 гг. проанализирована связь региональных аномалий содержания метана в атмосфере с аномалиями температуры у поверхности на севере Западной Сибири, в частности на п-ве Ямал летом 2016 г. Получены количественные оценки региональных аномалий, трендов и чувствительности изменений содержания метана в атмосфере к изменениям приповерхностной температуры на межсуточном и межгодовом масштабах. Отмечены особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции, способствовавшей формированию аномального температурного режима над севером Западной Сибири с увеличением регионального содержания метана в атмосфере.

В [36] представлены количественные оценки вклада радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды глобальной приповерхностной температуры и приповерхностной температуры в разных широтных зонах.

Характеристики циклонов (частота, интенсивность и размер) и их изменения в арктическом регионе при более теплом климате были проанализированы в [37] с использованием моделирования по региональной климатической модели HIRHAM с антропогенным сценарием SRES-A1B для XXI века. Основное внимание уделялось циклонам для теплого (апрель–сентябрь) и холодного (октябрь–март) сезонов. Современные циклонические характеристики, полученные при моделировании HIRHAM, в целом согласуются с данными реанализа ERA-40. Отмеченные различия в частоте циклонов связаны с разным пространственным разрешением при моделировании и данных повторного анализа. Проанализированы возможные будущие изменения характеристик циклонов в конце XXI века. Согласно моделированию, частота циклонов увеличивается

в теплое время года и уменьшается в холодное время года для более теплого климата в XXI веке.

В [38] оценена возможность выявления полярных мезоциклонов (ПМЦ) в атмосфере европейского сектора Арктики (ECA) по разным данным реанализа (NASA-MERRA, ERA-INTERIM, NCEP-CFSR, ASR) с различным пространственным разрешением и по расчетам с региональной климатической моделью высокого разрешения (PKM HIRHAM5). Получено, что по данным реанализа можно отождествлять до 65% арктических мезоциклонов, выявленных по спутниковым данным для 2002–2008 гг. (проект STARS – Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting of Polar Lows). Отмечено, что по данным арктического реанализа ASR при высоком пространственном разрешении воспроизводится больше ПМЦ, чем по остальным данным реанализа с более грубым пространственным разрешением. Отмеченные различия в характеристиках арктических мезоциклонов связаны как с особенностями моделей, используемых в реанализах, так и с особенностями ассимиляции данных. С использованием региональной климатической модели для арктических широт идентифицируется примерно столько же ПМЦ, как и по данным арктического реанализа ASR с высоким пространственным разрешением. Для воспроизведения мелких ПМЦ необходимы модели с более высоким пространственным разрешением и с адекватным описанием мезомасштабных процессов в Арктике.

В [39] выполнен анализ характеристик арктических циклонов и их внутри- и межгодовых вариаций, полученных по расчетам с региональной климатической моделью для Арктического региона (HIRHAM) со “спектральным притягиванием” (spectral nudging) в сопоставлении с данными реанализов с различным пространственным разрешением (ERA-Interim и ASR) для периода 2000–2009 гг. Отмечено, что характеристики арктических циклонов, особенности их пространственных распределений, годового хода и межгодовых вариаций по модельным расчетам в целом согласуются с данными реанализов, в том числе регионального арктического реанализа (ASR). Различия, отмеченные для повторяемости арктических циклонов, связаны, в частности, с разным пространственным разрешением данных и различиями в детектировании мелких циклонов, в том числе полярных мезоциклонов. Для воспроизведения мелких полярных мезоциклонов необходимы модели с более высоким пространственным разрешением и с адекватным описанием мезомасштабных процессов в Арктическом регионе.

Способность современных региональных климатических моделей воспроизводить активность циклонов в Арктике оценивается в [40] на основе

ансамбля из 13 расчетов на основе 11 моделей проекта Arctic-CORDEX. Характеристики циклонов, смоделированные ансамблем, сравниваются с результатами, полученными в четырех реанализах (ERA-Interim, NCEP Climate Forecast System Reanalysis, NASA Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications Version 2, and Japan Meteorological Agency-Japan 55-year reanalysis) для зимы и лета 1981–2010 гг. Статистические данные по циклонам, полученные при реанализе ERA-Interim и ASR, были сопоставлены за период 2000–2010 гг. Также количественно оцениваются отклонения в частоте, интенсивности и размере циклонов над Арктикой. Вариации частоты циклонов в различных моделях частично объясняются различиями в частоте циклонов над сушей. Различия между моделями максимальны для малых и мелких циклонов для обоих сезонов. Обнаружена связь между отклонениями зонального ветра на уровне 200 гПа и характеристиками циклонов для обоих сезонов. Большинство моделей недооценивают зональную скорость ветра в оба сезона, что, вероятно, приводит к недооценке средней глубины циклона и частоты глубоких циклонов в Арктике. В целом, региональные климатические модели могут воспроизводить пространственное распределение характеристик циклонов в Арктике.

В [41] циклоны в Арктике выявляются в четырех различных наборах данных реанализа с 1981 по 2010 г. Подробно исследуются пространственные и сезонные закономерности изменений их частоты, глубины и размера. Отмечены общие пространственные закономерности их возникновения, с центрами основной активности над морями зимой и с большей активностью над сушей и над полюсом летом. Глубокие циклоны чаще встречаются зимой, а количество слабых циклонов достигает максимума летом. Было получено хорошее согласие результатов для различных реанализов. Что касается изменений частоты, то следует отметить сильное уменьшение в Баренцевом море и вдоль побережья России к полюсу и увеличение в большей части центральной части Северного Ледовитого океана и в сторону Тихого океана зимой. Зимой области увеличения и уменьшения частот имеют одинаковый размер. Летом наблюдается продолжительный регион увеличения от моря Лаптевых к Гренландии, над Канадским архипелагом и над некоторыми более мелкими регионами к западу от Новой Земли и над Россией. На большей части Арктики частота сокращается. Установлено, что изменения частоты не связаны с изменениями глубины и размера циклона. Как правило, существует хорошее согласие между различными реанализами в пространственных моделях знака тренда. Масштабы

изменений в конкретном регионе могут сильно различаться в зависимости от данных.

Результаты экспедиционных измерений комплекса физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в районах арктических и дальневосточных морей летом 2013 г. представлены в [42]. Обсуждаются особенности пространственного распределения и изменения во времени аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы в диапазоне длин волн 0.34–2.14 мкм и высоты пограничного слоя, массовых концентраций аэрозоля и черного углерода, а также дисперсного и химического состава аэрозоля. Над Северным Ледовитым океаном наблюдается уменьшение концентраций аэрозоля и черного углерода в северо-восточном направлении: более высокие значения наблюдались в районе Шпицбергена и у Кольского полуострова; минимальные значения наблюдались на северных окраинах моря Лаптевых. Средние значения АОТ (0.5 мкм) в этом удаленном регионе были 0.03; массовые концентрации аэрозоля и черного углерода составляли 875 и 22 нг/м³ соответственно. Пространственное распределение большинства характеристик аэрозолей над дальневосточными морями показывает их уменьшение в северном направлении. От Японского до Чукотского моря концентрация аэрозолей снизилась в среднем с 23.7 до 2.5 см⁻³, массовая концентрация черного углерода снизилась со 150 до 50 нг/м³, а АОТ снизилась с 0.19 до 0.03. Вариации высоты пограничного слоя, измеренные судовым лидаром: среднее значение 520 м, максимальное значение 1200 м. В широтном распределении высоты пограничного слоя имеется характерный минимум на широте ~55° с.ш. Для водоемов восьми морей приводится химический состав фракции водорастворимого аэрозоля (ионы, элементы) и малых газофазных частиц, а также оценки их вертикальных потоков. Показано, что вещества в основном (75–89%) поступают из атмосферы на поверхность моря вместе с газофазными частицами. Выпавшие ионы составляют от 11 до 24.5%, а микроэлементы составляют 0.2–0.4% от общей суммы водорастворимых компонентов. Средние вертикальные потоки аэрозольного вещества в Японском море в 4–7 раз больше, чем в акваториях арктических морей [42].

В [43] обсуждаются результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы, выполненных в теплые периоды 2011–2016 гг. в арктическом поселке Баренцбург (арх. Шпицберген). Приводятся статистические характеристики сезонной и межгодовой изменчивости АОТ атмосферы в диапазоне спектра 0.34–2.14 мкм. Среднее значение АОТ (0.5 мкм) за шестилетний период наблюдений составило 0.086, в том числе мелкодисперсная компонента АОТ – 0.062, грубодисперсная – 0.024. Показано,

что сезонная изменчивость лучше всего проявилась в уменьшении модальных (наиболее вероятных) значений мелкодисперсной компоненты АОТ от 0.055 весной до 0.025 осенью. По сравнению с предшествующим периодом (до 2011 г.) отмечено сближение средних значений АОТ весной и летом, обусловленное уменьшением содержания мелкодисперсного аэрозоля весной и ростом – летом. Наиболее вероятной причиной летнего роста АОТ являются эпизодические выносы дымового аэрозоля из бореальных зон Евразии и Северной Америки.

В [44] обсуждаются результаты сравнения средних физико-химических характеристик аэрозоля в соседних районах: в арктическом пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) и над Баренцевым морем. Отмечено небольшое превышение (менее 002) 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 NH₄⁺, SO₄²⁻, что свидетельствует о равнозначности вклада континентальных и морских источников.

Четыре года непрерывных измерений числового распределения аэрозолей в Тикси анализируются в [45]. Распределение частиц по размерам измеряли с помощью измерителя частиц с дифференциальной подвижностью (в диапазоне диаметров 7–500 нм) и аэродинамического измерителя частиц (в диапазоне диаметров 0.5–10 мкм). Влияние области источника на модальные характеристики и количество частиц, а также массовые концентрации представлены для разных сезонов. Среднемесячная медианная концентрация общего количества аэрозолей в Тикси колеблется от 184 см⁻³ в ноябре до 724 см⁻³ в июле с локальным максимумом в марте 481 см⁻³. Общая массовая концентрация имеет четко выраженный максимум в феврале–марте (1.72–2.38 мкг м⁻³) и два минимума в июне (0.42 мкг м⁻³) и в сентябре–октябре (0.36–0.57 мкг м⁻³). Эти сезонные циклы количества и массовых концентраций связаны с изолированными процессами и явлениями, такими как арктическая дымка ранней весной, которая увеличивает накопление и количество грубых частиц, а также образование вторичных частиц весной и летом, что влияет на зародышеобразование и концентрации частиц в моде Эйткена. Образование вторичных частиц часто наблюдалось в Тикси и, как было показано, несколько чаще встречается в морских потоках по сравнению с

континентальными воздушными потоками. Скорость образования частиц была максимальной весной, тогда как скорость роста частиц достигла пика летом. Эти результаты предполагают два разных источника вторичных частиц: антропогенное загрязнение является важным источником весной, а биогенные выбросы значительны летом. Влияние зависящих от температуры естественных выбросов на количество ядер аэрозольной и облачной конденсации было значительным: увеличение как массы частиц, так и числа ядер облачной конденсации (CCN) с температурой было выше, чем в любом предыдущем исследовании, проведенном над бореальным лесом. Предполагается, что помимо выбросов прекурсоров биогенных летучих органических соединений частые сибирские лесные пожары, хотя и находящиеся далеко, играют роль в составе аэрозолей в Арктике в самые теплые месяцы. На основании анализа кластеризации было выделено пять событий пожара, и было показано, что эти события в некоторой степени повлияли на массу частицы и число CCN. Кроме того, в тихие и холодные месяцы концентрации аэрозолей иногда увеличивались из-за местных источников аэрозоля в улавливающих инверсиях [45].

В [46] приведены результаты исследований аэрозольного состава приводного слоя атмосферы, выполненных в ходе экспедиции “Север-2015” на маршруте от порта Архангельск до архипелага Северная Земля в период 9–26 октября 2015 г. Полученные с высоким пространственно-временным разрешением данные о массовой концентрации черного углерода (ЕВС) на акваториях Белого, Баренцева и Карского морей показали ее значительную изменчивость: от фоновых значений порядка 20 нг/м^3 до значений более 1000 нг/м^3 в периоды переноса воздушных масс с континента. Кластерный анализ микроструктуры природных арктических аэрозолей позволил выделить доминирующие группы частиц морской соли и сульфатов кальция. При увеличении ЕВС до 250 нг/м^3 обнаружено появление групп углеродосодержащих аэрозолей и частиц, богатых серой, характерных для эмиссий при сжигании природного топлива.

В [47] получены оценки продолжительности навигационного периода и ее изменений в 1980–2013 гг. для Северного морского пути на основе спутниковых данных о концентрации морских льдов в Арктическом бассейне. Оценена способность современных климатических моделей воспроизводить современный режим морских льдов в Арктике и его изменения в сопоставлении со спутниковыми данными. Сделаны модельные оценки возможных перспектив Северного морского пути в XXI веке. В [48] получены новые оценки изменений продолжительности навигационного пе-

риода для Северного морского пути (СМП) на основе ансамблевых расчетов с современным поколением глобальных климатических моделей при умеренных антропогенных воздействиях в XXI в. С целью получения более надежных оценок проведен анализ способности современных климатических моделей воспроизводить в Арктическом бассейне, в частности на СМП, как средний режим морских льдов, так и их межгодовую изменчивость и тенденции изменения в сопоставлении со спутниковыми данными для последних десятилетий.

Возможности навигации по Северному морскому пути (СМП) по спутниковым данным и расчетам CMIP5 рассматриваются в [49]. Быстрое сокращение морского льда в Арктике за последние несколько десятилетий открывает новые перспективы для морского судоходства в Арктике. Как спутниковые данные, так и ансамбль климатических моделей CMIP5 использовались для оценки транзитного окна СМП, позволяющего осуществлять межконтинентальную навигацию между регионами Атлантики и Тихого океана. Проведен анализ расчетных дат начала и окончания сезона навигации по СМП. Показано, что современные климатические модели способны воспроизвести среднее время транзитного окна СМП и его тенденцию за последние несколько десятилетий. Выбранные модели демонстрируют, что темпы увеличения сезона навигации СМП замедлятся в течение следующих нескольких десятилетий при сценарии RCP4.5. К концу XXI века средние по ансамблю оценки показывают увеличение транзитного окна по СМП примерно на 4 и 6.5 мес. согласно RCP4.5 и 8.5 соответственно. Расчетные тенденции для даты окончания сезона навигации оказались более сильными по сравнению с тенденциями для даты начала [49].

В [50] утверждается, что при продолжении глобального потепления в XXI веке можно ожидать существенного увеличения продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП). В связи с достаточно большой неопределенностью чувствительности характеристик морских льдов в Северном Ледовитом океане к изменениям климата в современных климатических моделях необходимо использование методов анализа, учитывающих неопределенность результатов численных расчетов с такими моделями, а также неопределенность данных наблюдений. Цель данной работы – анализ изменений ПНП на СМП по расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5) с использованием байесовой статистики. Получено, что при сценариях антропогенных воздействий RCP (Representative Concentration Pathways) 4.5 и 8.5 ожидаемая ПНП на СМП составит 2–3 мес. в середине XXI века и 3–6 мес. в его конце.

В статье [51] представлен анализ воздействия изменения климата на природные и экономические системы Арктики и существующие методы оценки климатических рисков. На основе анализа воздействия изменения климата на природные и экономические системы и население Арктики сформирован реестр рисков, связанных с изменением климата. Предлагается концептуальная модель для оценки воздействия изменения климата на различные системы. Выявлены основные проблемы выявления климатических рисков в Арктике. Были выбраны индикаторы изменения климата: температура приземного воздуха; протяженность морского льда и частота экстремальных гидрометеорологических явлений, влияющих на экономическую деятельность в морской Арктике и ее субрегионах. Рассмотрена методология оценки уязвимости природных и экономических систем морской части Российской Арктики, включая подверженность воздействиям, чувствительность и адаптивный потенциал. Это ключевые факторы, на основе которых определяется уязвимость систем к изменению климата, а также информационная поддержка процессов оценки и снижения последствий климатических угроз. Алгоритм разработанной методики определения уязвимости включает последовательность из семи шагов [51].

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕТЕОРОЛОГИИ АНТАРКТИКИ

В Антарктике большинство российских метеорологических и климатических исследований связано с проблемами палеоклимата и атмосферными аэрозолями.

Важная часть палеоклиматической информации погребена в самых нижних слоях глубоких ледяных кернов. Улучшение качества палеоклиматических данных для более отдаленного периода является одной из основных задач ближайшего будущего. Важно оценить, на какой глубине эти данные еще останутся качественными, поскольку близость коренных пород может повлиять как на записанную временную последовательность, так и на свойства льда. В [52] выполнено многопараметрическое исследование (δD – $\delta^{18}O_{ice}$, $\delta^{18}O_{atm}$, общее содержание воздуха, CO_2 , CH_4 , N_2O , пыль, химический состав с высоким разрешением, текстура льда) нижнего 60-метрового керна проекта EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) из района купола “Dome C” в Центральной Антарктиде. Эти нижние слои были разделены на две отдельные фации: нижние 12 м, показывающие видимые твердые включения (фации базального дисперсного льда), и верхние 48 м, которые мы будем называть “фациями базального чистого льда”. Некоторые данные соответствуют перво-

зданному палеоклиматическому сигналу, другие показывают явные аномалии. Показано, что ни крупномасштабное повторное замерзание подледниковой воды, ни перемешивание не могут объяснить наблюдаемые свойства придонного льда. Делается вывод, что палеоклиматический сигнал лишь незначительно влияет на глобальные свойства льда в нижней части купола EPICA Dome C, но что временная шкала была значительно искажена механическим растяжением MIS20 из-за возрастающего влияния подледниковой топографии, процесса, который мог начаться намного выше нижней части льда. Следовательно, четкий палеоклиматический сигнал не может быть получен из более глубокой части ледяного керна EPICA Dome C. Работа предполагает, что наличие плоской монотонной границы раздела лед–коренная порода, которая в несколько раз превышает толщину льда, будет решающим фактором при выборе будущего места бурения “древнейшего льда” в Антарктиде [52].

Результаты исследований морских донных осадков показывают, что около 1 млн лет назад изменился характерный период климатических колебаний, связанных с чередованием ледниковых и межледниковых эпох: циклы в 40 тыс. лет сменились циклами в 100 тыс. лет. Причины, которые привели к перестройке климатической системы планеты в середине плейстоцена (Mid Pleistocene Transition – MPT), пока не известны и привлекают к себе пристальное внимание климатологов. Может ли керн древнего деформированного льда, залегающего в районе станции Восток в интервале глубин 3310–3539 м, дать ответы хотя бы на часть вопросов, связанных с генезисом MPT? В [53] анализируются предварительные результаты изучения этого керна и обосновывается программа дальнейших углубленных исследований древнейшего антарктического льда со станции Восток под общим названием Vostok Oldest Ice Challenge (VOICE).

Потеря и изменение прошлой атмосферной информации из-за механизмов захвата воздуха в условиях низкого накопления исследованы в [54] посредством анализа непрерывных измерений CH_4 (и CO). Изменения концентрации метана были измерены во время события 17 Дансгаарда–Ошгера (DO-17, ~60000 лет назад) в ледяном керне с российской антарктической станции Восток из скважины 4Г-2. Измерения проводились с использованием анализа непрерывного потока в сочетании с лазерной спектроскопией. Результаты выделяют множество аномальных слоев сантиметрового масштаба, которые неравномерно распределены по ледяному керну. Аномальные отношения смеси метана отличаются от таковых в ближайших окружающих слоях на величину до 50 частей на миллиард. Это явление может быть

теоретически воспроизведено с помощью простой модели слоистого захвата, воспроизводящей очень локализованные инверсии шкалы возраста газа. Предлагается метод очистки данных от аномальных значений, направленный на минимизацию систематической ошибки в общем сигнале. После того как аномалии, вызванные слоистым захватом, будут удалены из записи, то кривая DO-17 кажется более гладкой, чем эквивалентная кривая по керну льда WAIS Divide с высокой аккумуляцией. Это ожидается из-за более медленных скоростей погружения и уплотнения слоев фирна при меньшем накоплении. Однако степень сглаживания оказывается на удивление похожей между современными условиями и условиями DO-17 на Востоке. Это предполагает, что ледниковые записи газовых примесей из мест с низким уровнем накопления на Восточно-Антарктическом плато могут обеспечить лучшее временное разрешение прошлых изменений состава атмосферы, чем ожидалось ранее [54].

В [55] представлены результаты детальных изотопных исследований 2000 образцов ледяного керна со станции Восток, относящихся к эпохе МИС-11 (370–440 тыс. лет назад). Обсуждаются методики измерения 17O -эксцесс на лазерном анализаторе, а также интерпретации изотопного состава, основанные на совместном анализе трех независимых параметров: δD , d -excess и 17O -excess. Реконструированы климатические условия в окрестностях станции Восток и в месте испарения влаги (над океаном). Полученные результаты сравниваются с опубликованными результатами по станциям Восток и Конкордия, а также с данными по морским колонкам DSDP 94-607 и ODP 177-1090.

Краткий обзор деятельности международного антарктического сообщества по поиску древнего льда в Антарктиде представлен в [56]. Приведены предварительные результаты работ, полученные на станции Восток в период 63-й Российской антарктической экспедиции, которые подтверждают, что возраст льда в уже полученном на станции керне превышает 1 млн лет. Сформулированы первоочередные задачи дальнейших исследований древнего антарктического льда на станции Восток и в районе Ледораздела В.

В [57] впервые на основании надежных полевых материалов составлены карты скорости накопления, изотопного состава и плотности снега для индоокеанского сектора Восточной Антарктиды и, более детально, для района подледникового оз. Восток. Анализ этих карт позволил установить региональные закономерности пространственной изменчивости указанных параметров. Обнаружен район минимальных значений изотопного состава и скорости аккумуляции снега. Показано, что в Центральной Антарктиде распределение гляцио-климатических характери-

стик с трудом подчиняется законам широтной зональности и высотной поясности, а на первое место выходит удаленность от источника влаги. Показан сложный характер взаимосвязи между изотопным составом снега и температурой воздуха в Центральной Антарктиде. Впервые продемонстрировано, что поверхность ледника над подледниковыми озерами является во многом уникальным местоположением с особыми метеорологическими и гляциологическими условиями.

По данным об изотопном составе ледяных кернов, полученных из скважин, пробуренных в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды между трассами Мирный–Восток и Прогресс–Восток, восстановлено изменение температуры воздуха и скорости снегонакопления за последние 350 лет [58]. Проанализирована связь временной изменчивости изотопного состава осадков с местной приземной температурой воздуха и температурой в источнике влаги. Обнаружено проявление малого ледникового периода, а также так называемого климатического сдвига 1970-х гг. в исследуемом секторе Антарктиды. Обсуждается роль неклиматических факторов, влияющих на формирование долгопериодных трендов в рядах изотопного состава осадков, получаемых по ледяным кернам.

На протяжении пяти летних сезонов и двух зимовок Российской антарктической экспедиции на станции Восток (Антарктида), в 2011–2015 гг., проводились прямые измерения скорости сублимации снега [59]. Установлено, что скорость сублимации зависит от двух параметров: приземной температуры воздуха и скорости ветра. В холодный период года (при средней суточной температуре $< -45^\circ\text{C}$) скорость сублимации примерно равна нулю, или даже имеет место конденсация водяного пара из атмосферы на снежную поверхность, которая в сумме за холодное полугодие составляет до 0.2 мм в. э. Суммарная сублимация снега в теплый период года (ноябрь–февраль) в среднем составляет около 2.3 мм в. э. Однако эта величина учитывает лишь сублимацию с поверхности снега, но не берет в расчет сублимацию снежных частиц во время метелевого переноса. Общая сублимация в течение антарктического лета может составлять 4–5 мм в. э. При современной скорости накопления снега на станции Восток, равной 23 мм в. э./год, годовое количество осадков в этом районе оценивается равным 25–28 мм.

Результаты гляциологических исследований в районе мегадюн в 30 км восточнее станции Восток представлены в [60]. Скорость накопления снега и содержание изотопов (δD , $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{17}\text{O}$) были измерены вдоль двухкилометрового профиля поперек гребня мегадюн вместе с точными измерениями высоты с помощью GPS и георадиолокации. Показано, что пространственная изменчи-

вость снегонакопления и содержания изотопов зависит от уклона поверхности. Скорость накопления закономерно изменяется на один порядок на расстоянии <1 км, при этом накопление уменьшается на подветренном склоне дюны и увеличивается накопление в впадине между дюнами. В то же время скорость накопления, усредненная по длине волны дюны (22 мм в. э.), хорошо соответствует значению, полученному на станции Восток, что свидетельствует об отсутствии дополнительной ветровой сублимации снега в мегадюнах по сравнению с окружающим плато. При этом изотопный состав снега отрицательно коррелирует со снегонакоплением. На основании проведенного анализа делается вывод, что пространственная изменчивость изотопного состава снега в районе мегадюн может быть объяснена постосадочными модификациями снега.

Чтобы лучше понять, как климатический сигнал передается от осадков к снегу, авторы [61] представляют результаты различных проб снега из Восточной Антарктиды. В [62] данные изотопного состава (δD) с шести участков на Земле Принцессы Елизаветы были использованы для реконструкции изменчивости температуры воздуха в этом секторе Восточной Антарктиды за последние 350 лет. Исследования изотопов воды с поверхности в Антарктике для количественной интерпретации данных кернов глубокого бурения льда представлены в [63].

В [64] продемонстрирована улучшенная временная синхронизация между ледяными кернами Гренландии и Антарктики во время геомагнитной экскурсии Лашампа ~ 41 тыс. лет назад. Это стало возможным с использованием новых измерений изотопа ^{10}Be с высоким разрешением. По оценке авторов, точность этой синхронизации составляет ± 20 лет, что на порядок лучше, чем ранее.

В [65] авторы описывают расширенную базу данных о стабильных изотопах воды в керне льда Антарктиды, состоящую из 112 записей и предназначенную для реконструкции изменчивости климата Антарктики в региональном и континентальном масштабах за последние 2000 лет. Новые реконструкции подтверждают значительную тенденцию к похолоданию с нулевого до 1900-го г. н. э. во всех регионах Антарктики, где были достаточно длинные ряды данных, за исключением побережья Земли Уилкса и побережья моря Уэдделла. Было обнаружено, что в рамках этой долгосрочной тенденции похолодания от нулевого до 1900 г. н. э. самый теплый период приходится на период между 300 и 1000 гг. С 1900 г. н. э. выявляются значительные тенденции потепления для Западно-Антарктического ледяного щита, побережья Земли Королевы Мод и регионов Антарктического полуострова, и эти тенденции устойчивы. Только для Антарктического полуострова эта тенденция

последнего столетия является необычной в контексте естественной изменчивости за последние 2000 лет [65].

Изменчивость снегонакопления в Антарктике в региональном масштабе за последние 1000 лет представлена в [66]. Всего было собрано 79 записей о накоплении снега из ледяных кернов, которые были отнесены к семи географическим регионам, отделяющим прибрежные зоны с высокой аккумуляцией на высоте ниже 2000 м от сухого центрального Антарктического плато. Региональные композитные данные годового снегонакопления были оценены на основе моделирования поверхностного баланса массы (SMB) из RACMO2.3p2 и осадков из реанализа ERA-Interim. За исключением побережья моря Уэдделла, композитные данные для районов, расположенных на небольшой высоте, отражают региональную изменчивость осадков и SMB в соответствии с модельными результатами. У районов Центральной Антарктиды такой согласованности нет, и они либо не отражают региональные осадки, либо указывают на неспособность модели уловить соответствующие процессы выпадения осадков на холодном и сухом центральном плато. Исследование подчеркивает важность прибрежных зон с низкой высотой, которые были недостаточно представлены в предыдущих исследованиях снегонакопления.

Авторы [67] сопоставляют современные изменения температуры воздуха и скорости накопления снега, полученные инструментальным путем на антарктической станции Восток, с палеоклиматическими реконструкциями за последние 250 лет. Показано, что период 1985–2015 гг., вероятно, был самым теплым 30-летием за последние 2,5 века. Скорость снегонакопления положительно коррелирует с изменчивостью температуры воздуха – это показывает, что повышение температуры в будущем будет сопровождаться ростом количества снега, накапливаемого в Антарктиде, что частично компенсирует рост уровня Мирового океана. Вместе с ростом температуры воздуха на протяжении последних 50 лет имело место и увеличение количества осадков, однако являются ли современные значения скорости снегонакопления аномальными для последних 250 лет на основании имеющихся данных, сказать трудно.

Реконструкции климата за последние 2000 лет исключительно важны для оценки потепления индустриальной эпохи на фоне естественной климатической изменчивости. В [68] представлена база данных температурных прокси-записей проекта PAGES2k. База данных содержит 692 записи из 648 локаций, включая все континентальные регионы и основные океанические бассейны. Использовались данные годовых колец деревьев, кернов льда, донных отложений, кораллов,

данные из пещер и других архивов. Их продолжительность составляет от 50 до 2000 лет, в среднем 547 лет, а временное разрешение колеблется от двух недель до столетия. Почти половина временных рядов косвенных значений достоверно коррелирована с температурой поверхности HadCRUT4.2 за период 1850–2014 гг. Комбинированные данные о глобальной температуре демонстрируют замечательную степень согласованности между архивами высокого и низкого разрешения. База данных подходит для исследования глобальной и региональной изменчивости температуры в течение нашей эры.

Правильная оценка динамики обмена между стратосферой и тропосферой является ключевым моментом для улучшения понимания динамики климата на плато Восточной Антарктиды, поскольку здесь вклад стратосферы будет иметь важное значение. Хотя тритий (^3H или T), радионуклид, который естественным образом образуется в основном в стратосфере и быстро входит в круговорот воды в виде НТО, кажется первоклассным индикатором для изучения этих процессов, данных по тритию в этом регионе очень мало. Первые измерения концентрации трития с высоким разрешением за последние 50 лет в трех снежных шурфах со станции Восток представлены в [69]. Естественная изменчивость записей трития выявляет две выдающиеся частоты: одна составляет около 10 лет (что связано с солнечными циклами Швабе), а другая — с более короткой периодичностью. Несмотря на неопределенность датирования в этом коротком масштабе, наблюдается хорошая корреляция между ^3H и Na^+ и антикорреляция между ^3H и $\delta^{18}\text{O}$, полученная для отдельного шурфа. Результаты модели общей циркуляции атмосферы LMDZ, включая стабильные изотопы воды и тритий, демонстрируют ту же антикорреляцию ^3H - $\delta^{18}\text{O}$ и позволяют провести дальнейшее исследование связанных с этим механизмов. В межгодовом масштабе смоделированная ^3H изменчивость хорошо согласуется с индексом Антарктической осцилляции. По модельным расчетам поступления стратосферного трития в тропосферу происходят в зимних холодных и засушливых условиях.

Рассмотрена временная и пространственная изменчивость химического состава атмосферного аэрозоля, отобранного в период сезонных работ 52, 53, 55, 58–60-й РАЭ по маршруту следования НЭС “Академик Федоров” и “Академик Трешников” от станции Новолазаревская до станции Мирный [70]. Заметное снижение суммы ионов в аэрозоле в 2007–2008 гг. хорошо согласуется с исследованиями в районе Восточной Атлантики и связано с гидрологическими процессами в Атлантическом океане. Установлено высокое обогащение аэрозольных частиц Zn , Cu , Cr , Ba , Pb ,

Se , As , Ni , Cd . Содержание преобладающих химических компонентов (Na^+ , Cl^- , Zn , Fe), факторы и коэффициенты обогащения элементов ($\Phi\text{O} = 27\text{--}26\ 445$) и ионов ($\text{K} = 3.6\text{--}13.0$) в аэрозоле в поверхностном и свежевывавшем снеге ($\text{K} = 1.4\text{--}6.1$) прибрежной части Восточной Антарктиды свидетельствуют об идентичности источников формирования их состава.

В [71] обобщены результаты 12-летних исследований аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике и Южном океане. Проведен анализ пространственного распределения (с широтным шагом 5°) сезонной изменчивости (ноябрь/апрель) и взаимосвязей оптических и микрофизических характеристик аэрозоля. Показано, что среднее широтное изменение параметров аэрозоля в Восточной Атлантике превышает один порядок. Самые низкие значения наблюдаются вблизи Антарктиды, максимальные — в тропической зоне: аэрозольная оптическая толща ($0.5\ \mu\text{км}$) меняется от 0.02 до 0.5, счетные концентрации мелких частиц ($d = 0.4\text{--}1\ \mu\text{км}$) — $0.8\text{--}19\ \text{см}^{-3}$, концентрации крупных ($d > 1\ \mu\text{км}$) частиц — $0.04\text{--}2.2\ \text{см}^{-3}$, массовые концентрации аэрозоля — $0.5\text{--}14\ \text{мкг}/\text{м}^3$ и “сажи” — $0.026\text{--}0.7\ \text{мкг}/\text{м}^3$.

В [72] на основе данных многолетних (2004–2016 гг.) экспедиционных исследований проведено статистическое обобщение и районирование физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике (от Ла-Манша до Антарктиды). Для шести широтных зон Атлантического и Южного океанов ($>45^\circ$ с.ш., $20^\circ\text{--}45^\circ$ с.ш., $0^\circ\text{--}20^\circ$ с.ш., $0^\circ\text{--}20^\circ$ ю.ш., $20^\circ\text{--}55^\circ$ ю.ш., $>55^\circ$ ю.ш.) представлены средние значения основных характеристик аэрозоля: аэрозольной оптической толщи атмосферы, мелко- и грубодисперсной компоненты аэрозольной оптической толщи, счетных концентраций частиц, массовых концентраций аэрозоля, “сажи”, водорастворимых ионов (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}) и газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3). Показано, что диапазон зональной изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозоля — около одного порядка: самые большие средние значения наблюдаются в тропической зоне, минимальные — над Южным океаном. Зональные различия (от 1.3 до 4.3 раз) концентраций ионов и газообразных примесей существенно меньше и сопоставимы с синоптической изменчивостью. Максимальные концентрации “морских” ионов зафиксированы над Южной Атлантикой, “континентальных” ионов — в тропической и субтропической зонах Северного полушария, а минимальные концентрации всех ионов — над Южным океаном. Отмечена специфика географического распределения газообразных примесей: максимальные кон-

центрации HCl и NH₃ наблюдаются над Южной Атлантикой, SO₂ и HNO₃ — вблизи Европы, а самый низкий уровень — в тропической зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов И.И. Современные изменения климата Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.
2. Алексеев Г.В., Большианов Д.Ю., Радионов В.Ф., Фролов С.В. 95 лет исследований климата и криосферы Арктики в ААНИИ // Лед и Снег. 2015. № 55(4). С. 127–140.
3. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Смоляницкий В.М., Фильчук К.В. Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. № 64(3). С. 262–269.
4. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 11–26.
5. Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? // Tellus A. 2016. V. 68. P. 32330.
6. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
7. Alekseev G., Glok N., Smirnov A. On assessment of the relationship between changes of sea ice extent and climate in the Arctic // Int. J. Climatol. 2015. V. 36. № 9.
8. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 5–19.
9. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на теплоотдачу атмосферы в Арктику // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 1. С. 106–123.
10. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктику // Лед и снег. 2017. № 57(3). С. 381–390.
11. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных теплопереносов и влагопереноса на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 1. С. 43–63.
12. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П., Гнатюк Н.В. Влияние атмосферного переноса тепла и влаги на летнее потепление в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3(113). С. 67–77.
13. Мурьшиев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажеев А.В. Взаимное запаздывание между изменениями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере в простой совместной модели климата и углеродного цикла // Докл. АН. 2015. Т. 463. № 6. С. 708–712.
14. Катцов В.М., Павлова Т.В. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) // Труды ГГО. 2015. Вып. 579. С. 7–21.
15. Павлова Т.В., Катцов В.М. Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. 2015. Вып. 579. С. 22–36.
16. Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2(26). С. 35–52.
17. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на изменения климата в Баренцевом море и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. Т. 41. № 8. С. 38–56.
18. Jung T., Gordon N.D., Bauer P., Bromwich M., Chevallier J., Day J., Dawson F., Doblus-Reyes C., Fairall H.F., Goessling M., Holland J., Inoue T., Iversen S., Klebe P., Lemke M., Losch A., Makshtas B., Mills P., Nurmi D., Perovich P., Reid I.A., Renfrew G., Smith G., Svensson M., Tolstykh Q., Yang Advancing polar prediction capabilities on daily to seasonal time scales // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2016. V. 97. № 9. P. 1631–1647.
19. Мелешко В.П., Катцов В.М., Байдин А.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения гидрологического режима в Северной Евразии в результате исчезновения многолетнего морского льда в Арктике // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 5–21.
20. Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S. Future changes in peak river flows across Northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // Climate Dynamics. 2018. V. 50. P. 215–230.
21. Chernokulsky A.V., Esau I., Bulygina O.N., Davy R., Mokhov I.I., Outten S., Semenov A.V. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late nineteenth century // J. Climate. 2017. V. 30. P. 2103–2120.
22. Grachev A.A., Persson P.O.G., Uttal T., Akish E.A., Cox C.J., Morris S.M., Fairall C.W., Stone R.S., Lesins G., Makshtas A.P., Repina I.A. Seasonal and latitudinal variations of surface fluxes at two Arctic terrestrial sites // Climate Dynamics. 2018. V. 51. P. 1793–1818.
23. Иванов Н.Е., Махитас А.П. Особенности изменчивости климата Северной Якутии — экстремумы температуры воздуха // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 112(2). С. 50–69.

24. *Urazgildeeva A.V., Sviashchennikov P.N., Ivanov B.V., Isaksen K., Førland E.J., Brækkan R.* Comparative analysis of Russian and Norwegian precipitation gauges measurements in Barentsburg, Western Spitsbergen // Czech Polar Reports. 2017. № 7(1). P. 1–5.
25. *Иванов Б.В., Священников П.Н.* Альbedo снежно-ледниковой поверхности архипелага Шпицберген // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 88–93.
26. *Иванов Б.В., Священников П.Н.* Альbedo снежно-ледниковой поверхности архипелага Шпицберген // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 9. С. 943–948.
27. *Священников П.Н., Уразгильдеева А.В., Курочкин Ю.Н., Иванов Б.В., Чистяков К.В., Divin D., Hudson S.* Исследование спектрального состава отраженной и проникающей вглубь снежного покрова коротковолновой радиации в районе поселка Баренцбург (архипелаг Шпицберген) // Лед и Снег. 2015. № 55(3). С. 67–72.
28. *Нагурный А.П., Макитас А.П., Макаров А.С.* Метан в приповерхностном слое атмосферы Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2(104). С. 33–43.
29. *Нагурный А.П., Макитас А.П.* Концентрация метана в пограничном слое атмосферы по данным измерений на дрейфующих ледовых станциях “Северный полюс-36” и “Северный полюс 39” // Метеорология и гидрология. 2016. Т. 41. № 3. С. 63–70.
30. *Елисеев А.В., Малахова В.В., Аржанов М.М., Голубева Е.Н., Денисов С.Н., Мохов И.И.* Изменение границ многолетнемерзлого слоя и зоны стабильности гидратов метана на арктическом шельфе Евразии в 1950–2100 гг. // Докл. АН. 2015. Т. 465. № 5. С. 598–603.
31. *Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н.* Дестабилизация реликтовых газовых гидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4. С. 46–51.
32. *Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н.* Влияние региональных климатических изменений на устойчивость реликтовых газовых гидратов // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 5. С. 572–574.
33. *Аржанов М.М., Мохов И.И.* Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // Докл. АН. 2017. Т. 476. № 4. С. 456–460.
34. *Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И.* Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчетам // Докл. АН. 2018. Т. 480. № 6. С. 725–729.
35. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Аномалии содержания метана в атмосфере над севером Евразии летом 2016 года // Докл. АН. 2018. Т. 480. № 2. С. 223–228.
36. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультитенетной осцилляции в тренды приповерхностной температуры // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 5–13.
37. *Akperov M., Mokhov I., Rinke A., Dethloff K., Matthes H.* Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model simulations // Theor. Appl. Climatol. 2015. V. 122. P. 85–96.
38. *Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А.* Арктические мезоциклоны по спутниковым данным, данным реанализа и модельным расчетам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 297–304.
39. *Акперов М.Г., Дембицкая М.А., Мохов И.И.* Циклоническая активность в Арктическом регионе по модельным расчетам и данным реанализа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 6. С. 39–46.
40. *Akperov M., Rinke A., Mokhov I., Matthes H., Semenov V. and the Arctic Cordex Team.* Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX) // J. Geophys. Res.: Atmos. 2018. V. 123. P. 2537–2554.
41. *Zahn M., Akperov M., Rinke A., Feser F., Mokhov I.I.* Trends of cyclone characteristics in the Arctic and their patterns from different re-analysis data // J. Geophys. Res.: Atmos. 2018. V. 123. P. 2737–2751.
42. *Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Pol'kin Vas. V., Pol'kin Vik. V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F.* On measurements of aerosol–gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 12413–12443.
43. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н.* Обобщение результатов измерений оптической толщины атмосферного аэрозоля на архипелаге Шпицберген в 2011–2016 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 2. С. 163–170.
44. *Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г.* Сравнение средних характеристик аэрозолей в соседних арктических регионах // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 8. С. 640–646.
45. *Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen, Y., Urttil T., Ivakhov V., Makshitas A.* Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // Atmos. Chem. Phys. V. 16. P. 1271–1287.
46. *Поповичева О.Б., Макитас А., Мовчан Н.М., Персианцева М.А., Тимофеев Н.М. Ситников* Аэрозольная составляющая приземного слоя атмосферы по наблюдениям экспедиции “Север-2015” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4(114). С. 57–65.
47. *Мохов И.И., Хон В.Ч.* Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. 2015. № 2(18). С. 88–95.

48. *Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А.* Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 6. С. 699–704.
49. *Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Transit navigation through Northern Sea Route from satellite data and CMIP5 simulations // Environ. Res. Lett. 2017. V. 12. P. 024010.
50. *Кибанова О.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Хон В.Ч.* Изменения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей: байесовские оценки // Докл. АН. 2018. Т. 481. № 1. С. 88–92.
51. *Солдатенко С.А., Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Вязилова А.Е., Харланенкова А.В.* Об оценке климатических рисков и уязвимости природных и экономических систем в морской зоне Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. № 64(1). С. 55–70.
52. *Tison J.-L., de Angelis M., Littot G., Wolff E., Fischer H., Hansson M., Bigler M., Udisti R., Wegner A., Jouzel J., Stenni B., Johnsen S., Masson-Delmotte V., Landais A., Lipenkov V., Loulergue L., Barnola J.-M., Petit J.-R., Delmonte B., Dreyfus G., Dahl-Jensen D., Durand G., Bereiter B., Schilt A., Spahni R., Pol K., Lorrain R., Souchez R., Samyn D.* Retrieving the paleoclimatic signal from the deeper part of the EPICA Dome C ice core // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1633–1648.
53. *Липенков В.Я., Райно Д.* Климатическая перестройка в середине плейстоцена и проблема исследования древнейшего антарктического льда со станции Восток // Лед и Снег. 2015. № 55(4). С. 95–106.
54. *Fourteau K., Faïn X., Martinerie P., Landais A., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Chappellaz J.* Analytical constraints on layered gas trapping and smoothing of atmospheric variability in ice under low-accumulation conditions // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 1815–1830.
55. *Верес А.Н., Екайкин А.А., Владимирова Д.О., Козачек А.В., Липенков В.Я., Скакун А.А.* Климатическая изменчивость в эпоху МИС-11 (370–440 тыс. лет назад) по изотопному составу (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{17}O$) ледяного ядра станции Восток // Лед и Снег. 2018. № 58(2). С. 149–158.
56. *Липенков В.Я., Екайкин А.А.* В поисках древнейшего льда Антарктиды // Лед и Снег. 2018. № 58(2). С. 255–260.
57. *Владимирова Д.О., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Шибанов Ю.А.* Пространственная изменчивость скорости накопления и изотопного состава снега в индоокеанском секторе Восточной Антарктиды, включая район подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1(103). С. 69–86.
58. *Владимирова Д.О., Екайкин А.А., Липенков В.Я.* Изменчивость климата в Индоокеанском регионе Восточной Антарктиды за последние 350 лет // Лед и Снег. 2015. № 55(4). С. 5–18.
59. *Екайкин А.А., Заровчатский В.А., Липенков В.Я.* Измерения скорости сублимации снега на станции Восток, Центральная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4(106). С. 20–25.
60. *Ekaykin A., Eberlein L., Lipenkov V., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A.* Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic mega-dunes // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 1217–1227.
61. *Touzeau A., Landais A., Stenni B., Uemura R., Fukui K., Fujita S., Guilbaud S., Ekaykin A.* Acquisition of isotopic composition for surface snow in East Antarctica and the links to climatic parameters // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 1–16.
62. *Ekaykin A.A., Vladimirova D.O., Lipenkov V.Ya., Masson-Delmotte V.* Climatic variability in Princess Elizabeth Land (East Antarctica) over the last 350 years // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 61–71.
63. *Landais A., Casado M., Prie F., Magand O., Arnaud L., Ekaykin A., Petit J.R., Picard G., Fily M., Minster B., Touzeau A., Goursaud S., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Orsi A.* Surface studies of water isotopes in Antarctica for quantitative interpretation of deep ice core data // C. R. Geosci. 2017. V. 349. P. 139–150.
64. *Raisbeck G.M., Cauquoin A., Jouzel J., Landais A., Petit J.R., Lipenkov V.Y., Beer J., Synal H.-A., Oerter H., Johnsen S.J., Steffensen J.P., Svensson A., Yiou F.* An improved north-south synchronization of ice core records around the 41 kyr ^{10}Be peak // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 217–229.
65. *Stenni B., Curran M.A. J., Abram N.J., Orsi A., Goursaud S., Masson-Delmotte V., Neukom R., Goosse H., Divine D., van Ommen T., Steig E.J., Dixon D.A., Thomas E.R., Bertler N.A.N., Isaksson E., Ekaykin A., Frezzotti M., Werner M.* Antarctic climate variability at regional and continental scales over the last 2000 years // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 1609–1634.
66. *Thomas E.R., van Wessel J.M., Roberts J., Isaksson E., Schlosser E., Fudge T., Vallelonga P., Medley B., Lenaerts J., Bertler N., van den Broeke M.R., Dixon D.A., Frezzotti M., Stenni B., Curran M., Ekaykin A.A.* Regional Antarctic snow accumulation over the past 1000 year // Climate of the Past. 2017. V. 13. P. 1491–1513.
67. *Екайкин А.А., Владимирова Д.О., Липенков В.Я.* Вариации скорости снегонакопления в Центральной Антарктиде за последние 250 лет // Лед и Снег. 2017. № 57(1). С. 5–9.
68. *PAGES2k Consortium (including Ekaykin A., Vladimirova D.).* A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era // Sci. Data. 2017. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.88>
69. *Fouéré E., Landais A., Cauquoin A., Jean-Baptiste P., Lipenkov V., Petit J.-R.* Tritium Records to Trace Stratospheric Moisture Inputs in Antarctica // J. Geophys. Res.: Atmos. 2018. V. 123. P. 3009–3018.
70. *Голобокова Л.П., Польшкин В.В., Онищук Н.А., Хурганова О.И., Тихомиров А.Б., Тертугова С.А., Польшкин В.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф.* Химиче-

- ский состав аэрозоля в приземном слое прибрежной зоны Восточной Антарктиды // Лед и Снег. 2016. № 56(2). С. 177–188.
71. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Польшин В.В., Радионов В.Ф., Холбен В.Н., Смирнов А. Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 666–678.
72. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Польшин В.В., Радионов В.Ф. Зональное распределение физико-химических характеристик аэрозолей в Восточной Атлантике // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 5. С. 492–501.

Polar Meteorology: the Results of Russian Research in 2015–2018

A. V. Klepikov^{1, *} and A. I. Danilov¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Beringa str., 38, 199397 Russia

*e-mail: klep@aari.ru

This publication is an overview of the results of Russian polar research in 2015–2018, 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 XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Montreal, Canada, July 8–18, 2019).

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