

УДК 551.583(551.515)

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ: ПРОГРЕСС, СМЕНА КОНЦЕПЦИЙ, АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

© 2021 г. В. А. Семенов^{a, b, *}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^bИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

*e-mail: vasemenov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 22.09.2020 г.

После доработки 08.10.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Представлен обзор некоторых значимых достижений в исследованиях изменений климата в Арктике в последнее десятилетие. Рассмотрены механизмы положительных обратных связей, усиливающих климатические изменения в высоких широтах Северного полушария. Приводятся примеры популярных до недавнего времени концепций, объясняющих изменения климата в Арктике и оказавшихся несостоятельными в свете современной динамики климата. Формулируются важные актуальные проблемы, требующие решения.

Ключевые слова: изменения климата Арктики, обратные связи в климатической системе, естественная изменчивость климата

DOI: 10.31857/S0002351521010119

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата в Арктике в последние десятилетия являются, пожалуй, наиболее заметным региональным проявлением продолжающегося глобального потепления. Темпы роста температуры в Арктике с конца 1970-х гг. превышают глобальные изменения примерно в два с половиной раза (рис. 1). Площадь морских льдов в Арктике в сентябре сократилась примерно на 40% за последние 40 лет [1]. Согласно данным палеорекострукций, современное потепление в Арктике беспрецедентно как минимум за последние 400 лет [2], а сокращение площади морских льдов превосходит все отрицательные аномалии за последнее тысячелетие [3]. Такое стремительное потепление в Арктике приводит к существенному уменьшению меридионального градиента температуры в средних и высоких широтах Северного полушария (СП), а также к изменению интенсивности и расположения источников и стоков тепла на нижней границе атмосферы (в т.ч. из-за сокращения площади морских льдов). Это, в свою очередь, сопровождается перестройкой атмосферной циркуляции, сменой погодных режимов, частоты экстремальных погодных явлений, в т.ч. в регионах Северной Евразии и Северной Америки [4, 5]. Изменениям климата Арктики посвящено огромное количество исследований, обзор которых приводится в рамках отчетов Межправительственной группы экспертов по изменению кли-

мата (<https://www.ipcc.ch/>), специального отчета в рамках деятельности Арктического совета [6], оценочных докладов Росгидромета по климату [7], где изменениям климата Арктики посвящены отдельные разделы. В последние два десятилетия существенно возросло количество и качество спутниковых наблюдений, усовершенствованы методики обработки данных дистанционного зондирования, накоплены новые данные океанографических измерений, произошел значительный прогресс в численном моделировании атмосферы, океана, климата и Земной климатической системы в целом, а также появились новые реанализы атмосферы и океана. Вместе с ростом вычислительных возможностей это позволило значительно точнее и полнее моделировать и диагностировать климатические процессы в Арктике. Все это способствовало не только значительному прогрессу в понимании механизмов происходящих изменений климата в последние годы, но в некоторых областях и к качественному изменению представлений о процессах и механизмах динамики климата Арктики как в современный период, так и в прошлом.

В данной работе приводится обзор некоторых важных с точки зрения автора недавних достижений в области исследования климата Арктики, примеры смены концепций, важных для понимания динамики климата, указывается на ряд нерешенных проблем. Ввиду ограниченного объема и

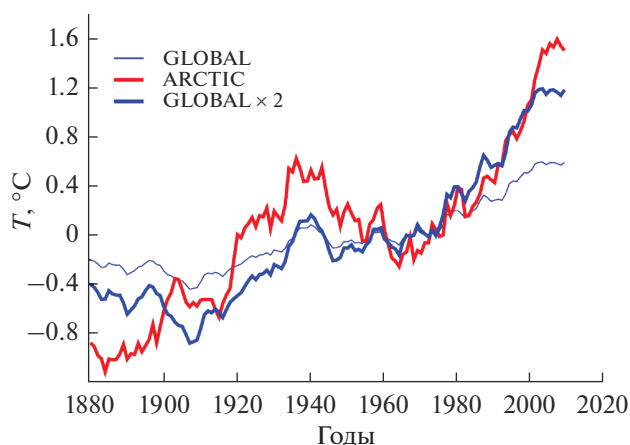


Рис. 1. Аномалии среднегодовой приповерхностной (в °C) температуры в Арктике (60° – 90° с.ш., красная кривая), глобальной температуры (тонкая синяя кривая), удвоенные аномалии глобальной температуры (жирная синяя кривая) по данным GISTEMP (13). Все ряды сглажены 5-летним скользящим усреднением.

широты рассматриваемой тематики, данный обзор не претендует на полноту, а скорее представляет собой субъективный взгляд автора, в значительной части основанный на опыте и результатах собственных исследований климата Арктики в последние два десятилетия.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОЩАДИ МОРСКИХ ЛЬДОВ В АРКТИКЕ

Основные особенности изменений климата Арктики можно сформулировать, сравнив динамику глобальной температуры и температуры в Арктике в период инструментальных изменений (рис. 1). Очевидны значительно более высокие темпы (более чем в два раза) современного потепления в Арктике с 1970-х гг. относительно глобального потепления. Эта особенность получила название арктического усиления (АУ) [8]. До недавнего времени считалось, что главной причиной АУ является положительная обратная связь между приповерхностной температурой и альбедо подстилающей поверхности, которая наиболее эффективно проявляется при наличии снежно-ледового покрова в высоких широтах СП. Такая положительная обратная связь была предложена М.И. Будыко как причина неустойчивости климата в энергобалансовой модели [9]. Но с начала 2000-х гг. эта концепция начала пересматриваться [10]. Появились работы [11], указывающие на существование АУ в идеализированных экспериментах с акваланетой при отсутствии положительной обратной связи альбедо–температура. Важную роль в АУ в этих экспериментах играло усиление меридионального переноса тепла в вы-

соких широтах за счет роста потока скрытого тепла. Количественный анализ различных радиационных и термодинамических обратных связей в моделях климата при стационарном отклике на рост парниковых газов показал значимый (сравнимый по величине) вклад трех процессов в арктическое усиление глобального потепления, это – изменение высоты эффективной излучающей поверхности, положительной обратной связи альbedo–температура и эффекта Планка [12].

Вторая особенность изменений климата в Арктике – значительная междесятилетняя положительная аномалия в середине XX в. (рис. 1), получившая название потепления середины XX в. (ПСДВ). Эта глобальная аномалия температуры наиболее сильно выражена в высоких широтах СП [14]. В Арктике амплитуда ПСДВ значительно (примерно в два раза) выше, чем в среднем на планете (рис. 1). Если для глобальных температур современное потепление превысило пик ПСДВ во второй половине 1970-х гг., то в Арктике это произошло лишь в середине 1990-х гг. На метеорологической станции Малые Кармакулы (Новая Земля) максимальные температуры во время ПСДВ оставались рекордными вплоть до 2012 г. [15]. Все это говорит о более интенсивной внутренней изменчивости климата в Арктике и/или о региональном усилении климатических колебаний в высоких широтах СП. Продолжительное похолодание в Арктике вслед за пиком ПСДВ, с середины 1940-х до середины 1970-х гг., длительное время не позволяло говорить о значимой тенденции к потеплению в Арктике вплоть до начала XXI в. Интересным примером такой неопределенности служит заметка Джона Уолша в 1993 г. “Ускользящее потепление в Арктике” [16], где на основе анализа данных стационарных и самолетных наблюдений был обнаружен отрицательный тренд температуры в Арктике в последние на то время четыре десятилетия. Также указывалось, что такая тенденция идет вразрез с результатами моделей климата, предсказывающими наиболее сильное потепление в Арктике вследствие антропогенного роста содержания парниковых газов.

Темпы роста температуры, как в среднем по планете, так и в Арктике в период ПСДВ, были сравнимы с современными трендами, хотя скорость увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере в 1920–30-х гг. была примерно в 4 раза меньше, чем в последние 40 лет. Таким образом, антропогенные эмиссии парниковых газов не могут объяснить феномен ПСДВ. Значительный вклад в это потепление могли внести пауза в крупных извержениях вулканов и вариации солнечной активности [17], но и они, согласно модельным оценкам, не способны объяснить столь сильный рост температуры в середине XX в.

Важным фактором в формировании ПСДВ считаются долгопериодные (с масштабом в несколько десятилетий) естественные колебания климата. Очевидным кандидатом на роль таких колебаний является Атлантическое долгопериодное колебание (АДК) – квазипериодические (с периодом 50–70 лет) колебания температуры поверхности океана в Северной Атлантике [18], связанные, как предполагается, с соответствующими колебаниями интенсивности Атлантической меридиональной океанической циркуляции (напр., [19]). АДК синфазно с изменениями арктической температуры [20]. Вместе с тем, такие колебания, объясняя изменения меридионального переноса тепла океаном в Северной Атлантике с амплитудой примерно 0.1 ПВт (около 10% общего океанического переноса тепла) через широту 30° с.ш., довольно слабо связаны с вариациями переноса тепла через параллели севернее 65° с.ш. [21]. Хотя гипотеза об АДК как главной причине квазициклических колебаний климата в Арктике является наиболее популярной, в последние годы появились работы, указывающие на роль других процессов, о чем будет сказано ниже.

Таким образом, ПСДВ представляет собой интерес не только как значительная аномалия климата в историческом прошлом, но и как ключ к пониманию причин современного потепления. Если внутренняя изменчивость климата способна привести к потеплению такой величины, то каков вклад естественной изменчивости в современное потепление? Этот вопрос остается открытым, и некоторые модельные оценки указывают на то, что такой вклад может достигать половины наблюдаемого в последние десятилетия потепления [20]. В условиях сильной долгопериодной естественной изменчивости климата в Арктике на фоне монотонного потепления, вызванного глобальными изменениями климата, оценка климатических трендов принципиально (иногда даже качественно) зависит от продолжительности и начала выбранного для анализа периода [22, 23].

Третья важная проблема изменений климата в Арктике следует из сопоставления динамики аномалий температуры в Арктике и удвоенных аномалий глобальной температуры (рис. 1). Видно, что при таком масштабировании (принимая во внимание эффект АУ) удвоенные глобальные аномалии температуры очень хорошо соответствуют арктическим с 1960 по 2000 г., но аномалии во время ПСДВ значительно различаются. Также заметна разница в аномалиях в начале XX в. В то время как в глобальных аномалиях виден так называемый “сбой глобального потепления”, в Арктике температура продолжала расти. Это указывает на нелинейность в процессах взаимодействия глобального потепления и изменений климата в Арктике и/или на независимую динамику арктической климатической системы.

Таким образом, тремя важными особенностями изменений климата в Арктике, которые указывают и на главные актуальные научные задачи, являются арктическое усиление глобальных изменений климата, интенсивная внутренняя (в т.ч. долгопериодная) изменчивость климата и ПСДВ как ее возможное проявление, а также нелинейная связь между изменениями приповерхностной температуры в Арктике и в среднем по планете.

ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИЯХ АРКТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Как и в других областях физики, прогресс в изучении изменений климата связан в первую очередь с появлением новых данных о динамике земной климатической системы. В Арктике проблема с эмпирическими данными стоит особенно остро, ввиду суровых погодных условий и наличия морского ледяного покрова, не позволяющего проводить регулярные метеорологические и океанографические измерения во многих регионах Северного Ледовитого океана (СЛО).

Регулярные океанографические измерения в высоких широтах СП, начатые с 1990-х гг. к настоящему времени позволили создать трехмерную картину изменчивости характеристик притока и трансформации атлантических вод в арктическом бассейне за последние несколько десятилетий. Это привело к выявлению важных особенностей современных изменений и их механизмов, в том числе к новым оценкам роли океанического притока в изменениях протяженности и толщины ледяного покрова [24, 25]. Среди важных достижений в области экспериментальной океанографии следует отметить прямые (с помощью буйковых станций) измерения скорости течения и температуры воды (от поверхности до придонного слоя) на разрезе вдоль западной границы Баренцева моря с 1997 г. [26], ежегодные (с 2002 г.) экспедиции в рамках проекта NAVOS [24], позволившие детально исследовать трансформацию атлантических вод в Евразийском бассейне Арктики, разработку однородного массива профилей температуры и солености в СЛО и прилегающих морях (UDASH [27]).

Вместе с сокращением количества стационарных метеорологических наблюдений в Арктике после развала Советского Союза, прекращением программы дрейфующих полярных станций в 1992 г. росло количество спутников, осуществляющих дистанционное зондирование атмосферы и поверхности Земли в полярных областях. В этой области принципиально важным достижением является появление данных о толщине морских льдов в Арктике, основанных на спутниковой альтиметрии. В отличие от концентрации морских льдов, достаточно точно определяемой с помощью спутниковых микроволновых радиомет-

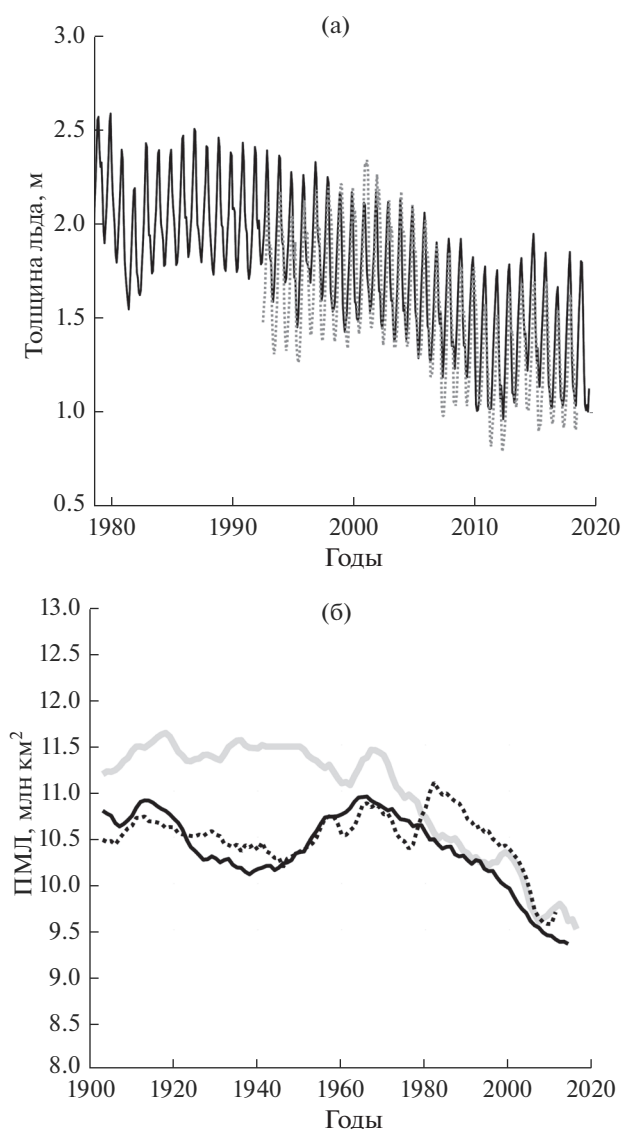


Рис. 2. (а) Среднемесячная толщина морских льдов (м) в Арктике по данным океанических реанализов PIOMAS (сплошная кривая) и MERCATOR (прерывистая кривая); (б) среднегодовая площадь морских льдов в Арктике по данным Центра Гадля HadISST1 (толстая серая кривая), данным SIBT1850 (прерывистая кривая) и сеточным данным, реконструированным с использованием ковариационного анализа на основе температурных данных (сплошная кривая) [37]. Ряды данных по площади льда сглажены 7-летним скользящим усреднением.

ров с 1979 г. [28], толщина морских льдов до начала 2000-х гг. была известна только по разнородным и локальным данным стационарных сонаров и сонаров на подводных лодках, измерениям на дрейфующих станциях и самолетным данным, включая данные электромагнитного зондирования и альтиметрии [29]. Эмпирические оценки климатических трендов толщины морских льдов характеризовались большой неопределенностью, от со-

кращения примерно на 10%/десятилетие в последние 40 лет XX в. по данным сонаров подводных лодок до 3%/десятилетие по данным измерений колебаний поверхности морского льда на станциях “Северный полюс” [30, 31]. Оценки на основе результатов расчетов с моделями общей циркуляции океана и морских льдов также различались в разы [32]. Появление данных спутниковых альтиметрических измерений достаточной точности в 2003–2008 гг. (спутник NASA ICESat) и затем с 2010 г. по настоящее время (спутник ESA CryoSAT-2) наконец позволили сделать достоверные оценки толщины морских льдов, величины сезонных и межгодовых вариаций с практически полным пространственным покрытием Арктики и высоким пространственным разрешением [33]. Хотя период непрерывных измерений пока составляет лишь 10 лет, сезонный ход толщины льда и ее межгодовые вариации позволили убедиться в достоверности данных океанических реанализов – моделей океана, использующих в качестве граничных условий данные атмосферных реанализов и ассимилирующих доступные данные океанографических наблюдений и данные о концентрации морских льдов. Их результаты оказались очень схожими со спутниковыми данными [34, 35].

Появление океанических реанализов в начале XX в. является существенным прогрессом в изучении климата Арктики. Реанализы предоставляют полные пространственно-временные массивы данных о характеристиках морских льдов, температуре, солености, скорости течений и высоте поверхности океана, что делает возможным исследование процессов в регионах и на глубинах, где никогда не производились измерения. В том числе для анализа характеристик арктических морских льдов в настоящее время доступны результаты реанализа PIOMAS (Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System [34]), предоставляющие данные с 1979 г. Реанализ высокого разрешения (1/4 градуса) MERCATOR [35] предоставляет данные характеристик океана для периода с 1993 г. На рис. 2а показаны изменения средней толщины морских льдов в Арктике по данным этих двух реанализов. Видно, что толщина морских льдов в минимуме сезонного хода с 1980 г. сократилась почти в два раза. Также следует отметить значительные межгодовые вариации, в частности существенный рост с 2010 г. по 2015 г., который пришелся как раз на первые годы миссии CryoSAT-2 [36].

Что касается атмосферных реанализов, то для Арктики отсутствие регулярных данных радиозондирования атмосферы для областей, покрытых морским льдом, разреженная сеть стационарных наблюдений в пан-арктических регионах приводят к значительным систематическим ошибкам [38]. Ошибки связаны, прежде всего, с некоррект-

ным воспроизведением облачности, приповерхностных инверсий и турбулентных потоков над льдом. Ассимиляция спутниковых данных в ближайшее время вряд ли сможет существенно исправить ситуацию ввиду, в том числе, неоднородности измерений и неопределенности решения обратной задачи определения профиля температуры и влажности атмосферы с использованием сигнала GPS. Проблема уменьшения ошибок реанализов должна решаться путем улучшения параметризаций вышеупомянутых процессов в моделях атмосферы и ассимиляцией большего количества данных прямых наблюдений.

Вместе с тем, произошел прогресс в развитии реанализов с временным охватом данных не только для эпохи регулярных аэрологических и спутниковых наблюдений, но и для всего XX в. В начале XXI в. появилось три так называемых реанализа XX в. Это – NOAA-CIRES Twentieth-Century Reanalysis V2 [39] – совместный проект Управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration) – NOAA, и Совместного института по исследованиям в области наук об окружающей среде (Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences) – CIRES, реанализы Европейского центра среднесрочных прогнозов (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) – ECMWF ERA20C [40] и CERA20C [41]. Несмотря на привлекательность таких реанализов, предоставляющих данные для всех основных параметров атмосферы при полном пространственно-временном покрытии, использовать эти массивы данных для анализа изменений климата в Арктике до 1950-х гг. следует с осторожностью, ввиду некорректного воспроизведения температуры [14].

Следует также отметить недавнее появление реанализа характеристик арктических морских льдов для всего XX в. – PIOMAS-20C [42]. Заметим, что реанализ PIOMAS-20C использует данные атмосферного реанализа ERA20C как граничные условия для модели океана и, соответственно, ретранслирует ошибки воспроизведения атмосферных параметров в первой половине XX в., присущие ERA20C.

Помимо появления новых данных наблюдений для современного периода, в последние годы происходит расширение временного диапазона знаний о ключевых параметрах Арктической климатической системы в прошлое, как историческое, так и на масштабах тысячелетий. Ярким примером служат данные о морских льдах. До недавнего времени в зарубежной научной литературе считалось, что эволюция общей площади морских льдов в Арктике до начала современного сокращения в 1970-х гг. представляет собой “плато” без существенных декадных и мультидекадных колебаний (см. рис. 2б, данные HadISST1). Хотя

данные о ледовитости морей восточной Арктики, полученные в Арктическом и Антарктическом НИИ, свидетельствовали о существенной отрицательной аномалии в середине XX в. в летний период [43], такие аномалии считались региональным проявлением. Лишь в последнее десятилетие стали появляться косвенные (основанные на моделировании) данные [44] и данные реконструкций, свидетельствующие о существенной, сравнимой с современной, отрицательной аномалии площади морских льдов в Арктике в период ПСДВ [45]. Появились и полные сеточные архивы, основанные как на анализе региональных данных [46], так и на использовании связей ледовитости с вариациями температуры [37, 47]. Примеры таких данных показаны на рис. 2б и они указывают, что ПСДВ сопровождалось значительной отрицательной аномалией площади льдов, которая, тем не менее, примерно в два раза меньше, чем современные аномалии. Скрупулезный анализ станционных данных позволил также расширить в прошлое (до начала XX в.) и знания об облачности в Арктике [48] – пожалуй, самой малоизученной климатической характеристике, которая является ключевой для энергетического баланса и также является одним из главных источников неопределенностей в моделях климата. Из недавних реконструкций можно отметить палео реконструкции площади арктических морских льдов за последние 1450 лет [3] и интенсивности притока теплых атлантических вод в Арктику в последние 2000 лет [49], в обоих случаях свидетельствующие о беспрецедентности современных изменений.

Значительный прогресс наблюдается и в развитии моделей климата и их способности воспроизводить изменения климата в Арктике. В разы за последнее десятилетие увеличилось пространственное разрешение моделей, в частности ансамбль моделей CMIP5 в целом лучше воспроизводит характеристики арктических морских льдов, чем предыдущее поколение моделей CMIP3 [50]. Разработаны региональные модели климата Арктики, включая совместные модели атмосферы океана и морского льда, позволяющие детально исследовать процессы изменения климата. Такие модели значительно лучше воспроизводят региональные особенности изменчивости климата Арктики, в частности циклоническую активность (в т.ч. мезоциклоны), чем глобальные модели более низкого разрешения, а наличие модельного ансамбля позволяет оценить устойчивость результатов (напр., [51, 52]).

НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Прогресс в океанографических измерениях, моделировании и теоретических исследованиях климата в Арктике привел в начале XX в. к открытию новых процессов и обратных связей в аркти-

ческой климатической системе. Заслуживающих внимания результатов в этой области очень много и в данной работе могут быть упомянуты лишь некоторые из них.

Одним из важных недавно обнаруженных процессов является так называемая атлантификация вод приатлантических областей Северного Ледовитого океана (СЛО), прежде всего в Баренцевом море и Евразийском бассейне (СЛО) [53, 54]. Этот процесс заключается в качественном изменении вертикальной структуры океана на путях проникновения теплых атлантических вод в Арктику [55, 56]. Сокращение морских льдов в Баренцевом море вместе с ростом температуры и солености приходящих атлантических вод приводят к ослаблению вертикальной стратификации и интенсивному теплообмену между атлантической водой, находящейся на глубинах ниже ста метров под поверхностью, и поверхностным слоем. Это еще больше препятствует образованию льда и приводит к формированию заглубленного однородного перемешанного слоя и ослаблению пикноклина, что напоминает зимнюю стратификацию в Северной Атлантике (поэтому процесс назван “атлантификацией”). Важно отметить, что такой процесс обладает положительной обратной связью, и новое состояние может стать устойчивым и необратимым [56, 57].

Другой процесс, способствующий ускоренному таянию многолетних морских льдов, также связан с особенностями притока атлантических вод в СЛО. Эта ветвь притока из пролива Фрама проходит между Шпицбергом и Землей Франца Иосифа в бассейне Нансена. Анализ описанных ранее буйковых измерений вертикальной структуры океана в этом регионе в начале XXI в. и численное моделирование процессов конвекции позволили выявить положительную обратную связь между сокращением толщины и площади льда и термохалинной конвекцией, перемешивающей теплые атлантические воды с поверхностным слоем, что приводит к еще более интенсивному таянию морских льдов [56, 57].

Выявлена новая положительная обратная связь между притоком атлантических вод в Баренцево море и толщиной морских льдов, действующая через увеличение содержания водяного пара в атмосфере зимой при сокращении площади морских льдов. При этом, благодаря специфическому отклику атмосферной циркуляции на сокращение площади льдов, положительная аномалия содержания водяного пара эффективно распространяется на центральную часть СЛО, приводя к росту нисходящей длинноволновой радиации и дополнительному сокращению толщины льда [58].

Накопление океанографических данных в атлантическом секторе Арктики, в т.ч. прямые измерения притока океанического тепла в Баренце-

во море с начала XXI в. (см. выше), позволило детально исследовать процессы взаимодействия атмосферы и океана в Баренцевом море — регионе с максимальной климатической изменчивостью в Арктике [59, 60]. Было обнаружено, что океанический приток в Баренцево море летом объясняет более 80% изменчивости площади морских льдов во всей Арктике следующей зимой [61] и может служить достаточно надежным предиктором зимних аномалий площади льдов с заблаговременностью 2 года [62]. Более того, данные о состоянии океана в северных регионах Северной Атлантики и морей Атлантического сектора Арктики могут обеспечить прогноз аномалий климата в Северной Европе с десятилетней заблаговременностью [63].

Важным шагом к пониманию механизмов современных изменений климата в Арктике стало выявление существенной роли внутренних естественных колебаний системы океан—атмосфера в северном Тихом океане, т.н. Тихоокеанского десятилетнего колебания (ТДК). Если влияние АДК на долгопериодные колебания климата в СП и в Арктике получило подтверждение в ряде исследований уже 15–20 лет назад (напр., [64–67]), то о вкладе процессов в Тихом океане в современные изменения климата заговорили в связи с т.н. “сбоем глобального потепления” в первом десятилетии XXI в. [68]. В последние годы были опубликованы работы, указывающие на сравнимую с АДК, а возможно, и ведущую роль ТДК в потеплении середины XX в. и в современном усилении глобального потепления в Арктике [69–72]. Механизм такого влияния связан главным образом с изменением интенсивности Алеутского минимума и аномальной адвекцией тепла в Арктику. Следует отметить и гипотезу о влиянии аномалий температуры в тропической Атлантике на колебания климата в Арктике [73].

Максимум климатической изменчивости в атлантическом секторе Арктики, прежде всего в Баренцевом море, объясняется вариациями притока теплых атлантических вод и их тесной связью с площадью морских льдов и турбулентными потоками тепла из океана в атмосферу в относительно неглубоком Баренцевом море. В начале XX в. были предложены механизмы положительных обратных связей, способных усиливать вариации океанического притока в Баренцево море [19]. Одна из таких связей формируется за счет циклонического отклика атмосферной циркуляции над Баренцевым морем в ответ на сокращение площади морских льдов при положительной аномалии океанического притока. Это приводит к усилению юго-западных ветров, увеличению положительного градиента уровня океана юг—север и еще большему усилению притока [74, 75]. Было показано, что такая положительная обратная связь, усиливающая отрицательную аномалию

притока, может приводить к полной остановке океанического притока и резким региональным изменениям климата [76], указывая на существование точек неустойчивости в климатической системе Арктики – концепции, объясняющей резкие региональные изменения климата [77]. Сокращение площади морских льдов в Баренцевом море приводит к более интенсивным потерям тепла океаном и формированию более плотных холодных вод в восточной части моря с усилением истока воды из Баренцева моря и понижением уровня на востоке моря, что также приводит к усилению притока на его западной границе [19]. Такой процесс формирует еще одну положительную обратную связь. Также следует отметить положительную обратную связь в виде усиления южных ветров на южной границе моря при увеличении площади открытой воды, что приводит к еще большему сокращению площади морских льдов как в результате атмосферной адвекции тепла, так и за счет динамического воздействия [78].

Несколько аномально холодных зим в начале XXI в. на территории Северной Евразии, в т.ч. в Европе, на фоне рекордно высокой глобальной температуры вновь сделали актуальным вопрос об отклике атмосферной циркуляции в средних и высоких широтах СП на сокращение площади морских льдов и АУ, интенсивно исследовавшийся с 1970-х гг. с развитием численного моделирования атмосферы (начиная с работ [79, 80]). В работах [81, 82] было показано, что сильные отрицательные аномалии температуры зимой в начале XXI в. могут быть связаны с ускорившимся сокращением площади морских льдов в восточной Арктике. Впоследствии на эту тему было опубликовано огромное количество исследований (см., напр., обзоры [4, 5, 83, 84]), часто с противоречивыми результатами, о чем будет вкратце сказано в разделе об остающихся нерешенных вопросах в области исследований климата Арктики.

При этом было отмечено, что как в целом изменения характеристик погодных режимов в средних широтах СП при ускоренном потеплении в Арктике, так и отклик атмосферной циркуляции на сокращение площади арктических морских льдов может быть существенно нелинейным, что не позволяет экстраполировать тенденции, наблюдающиеся в современный период, в будущее [82, 85, 86].

Важным прогрессом в исследованиях механизмов формирования аномалий климата в Арктике стало выявление важной роли процессов взаимодействия тропосферы и стратосферы в высоких широтах СП. В частности, изменения в генерации планетарных волн, вызванные аномальным нагревом в высоких широтах СП, воздействуют на полярный вихрь. Сигнал с некоторой задержкой распространяется обратно в тропосферу, влияя

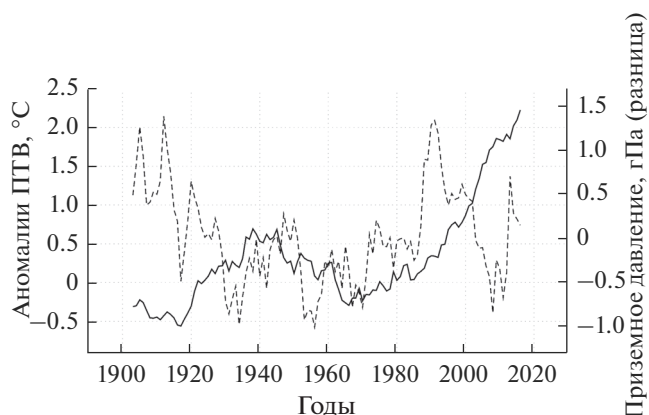


Рис. 3. Индекс Североатлантического колебания как аномалии разности приземного давления между Лиссабоном и Рейкьявиком (гПа, прерывистая кривая, ось справа) и аномалии среднегодовой температуры в Арктике (°С, сплошная кривая, ось слева). Ряды сглажены 5-летним скользящим осреднением.

на Североатлантическое колебание и погодные режимы (см. напр., [4]). Модельные эксперименты указывают на принципиально важную роль взаимодействия тропосферы и стратосферы в связях Североатлантического колебания и АДК [87] и в формировании отклика атмосферной циркуляции на аномалии ледяного покрова (напр., [88]).

ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕПЦИЙ

В начале XXI в. произошли принципиальные смены некоторых концепций изменений климата Арктики в последние десятилетия XX в. Выше уже говорилось, что роль положительной обратной связи “альbedo поверхности–температура” была признана не главной в современных ускоренных изменениях климата в Арктике. Предполагается, что основной вклад в АУ вносит ряд радиационных и динамических обратных связей, описанных в предыдущих разделах.

В контексте меняющихся концепций важно рассмотреть гипотезу о роли САК в ускоренном потеплении в Арктике в последние три десятилетия XX в. Поскольку в этот период индекс Североатлантического колебания (САК) и арктическая температура одновременно росли (рис. 3), предполагалось, что усиление адвекции теплого воздуха в полярные широты при переходе к положительной фазе САК (и в целом понижении давления над центральной Арктикой) увеличивает положительный тренд температуры в Арктике [89]. При этом положительный тренд САК с середины 1960-х гг. объяснялся внешним воздействием. Считалось, что это связано с радиационным выхолаживанием стратосферы и нижней тропосферы при росте концентрации углекислого газа в ат-

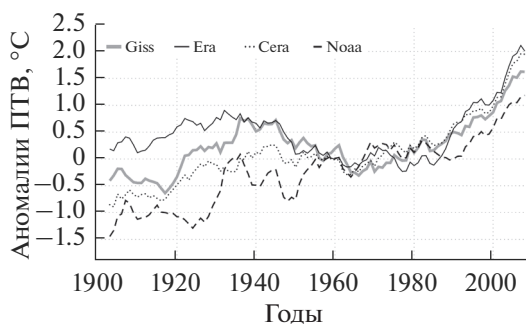


Рис. 4. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры ($^{\circ}\text{C}$, 5-летнее скользящее среднее) в высоких широтах (60° – 90° с.ш.) Северного полушария по данным наблюдений GISTEMP и реанализов XX века ERA20C, CERA20C и NOAA20C.

мосфере и усилением полярного вихря [90]. Также предполагалось, на основе результатов модельных экспериментов, что положительный тренд САК является откликом на характерную картину (триполь) аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике [91] или в тропическом Индийском и Тихом океанах [92].

Но анализ взаимодействия атмосферы и океана с помощью концептуальной стохастической модели показал, что результаты вышеупомянутых модельных экспериментов могут интерпретироваться неверно и не являются свидетельством воздействия ТПО на САК [93]. Далее, на основе продолжительных экспериментов с моделью климата и статистического анализа функции распределения трендов САК было показано, что гипотеза о стохастической природе наблюдаемого 30-летнего положительного тренда САК не может быть опровергнута с использованием существующего относительно короткого ряда данных. Также было продемонстрировано, что выявленная ранее связь между структурами ТПО и САК с середины 1990-х гг. уже не соответствует наблюдаемой динамике индекса САК [94]. Сейчас, в 2020 г., уже видно, что 30-летний положительный тренд в конце XX в. сменился сравнимым по magnitude 20-летним отрицательным трендом на фоне более сильного роста концентрации парниковых газов. Таким образом, гипотеза о вынужденном росте САК в связи с глобальным потеплением оказалась несостоятельной, а отрицательный тренд объясняется, в том числе, ослаблением полярного вихря вследствие увеличения потока волновой активности в стратосфере.

Другая концепция, оказавшаяся пересмотренной в начале XXI в., также связана с САК и состояла в ведущей роли САК в формировании декадных колебаний климата в Арктике. Об этом, в частности, свидетельствовала высокая корреляция

индекса САК с океанографическими характеристиками в атлантическом секторе Арктики [95]. Однако оказалось, что связь САК с климатом Арктики нестационарна, и корреляция между САК и характеристиками климата Арктики в течение XX в. менялась не только количественно, но и качественно [66, 19].

ОСТАЮЩИЕСЯ НЕРЕШЕННЫМИ ПРОБЛЕМЫ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

В заключение нужно отметить некоторые важные нерешенные проблемы в понимании современных и прошлых, а также в прогнозировании будущих изменений климата Арктики. В начале работы отмечался прогресс в накоплении данных наблюдений, прежде всего за состоянием Северного ледовитого океана и криосферы. Вместе с тем, количества данных о состоянии арктической климатической системы до сих пор недостаточно для получения надежных эмпирических оценок происходящих изменений. Программа Argo по организации всемирной сети дрейфующих океанографических станций, начавшаяся в 2000 г. (<https://argo.ucsd.edu/>) и обеспечивающая практически полное покрытие океана с измерением температуры, солёности и скорости течений до глубины 2000 м, не охватывает Северный ледовитый океан. В настоящий момент развивается программа установки зондирующих буев на льду (Ice-Tethered Profilers, <https://www.whoi.edu/page.do?pid=20756>), что является арктическим аналогом программы Argo. Количество стационарных метеорологических станций в арктической зоне сократилось с начала 1990-х гг. [8]. Атмосферные реанализы в высоких широтах СП из-за отсутствия прямых измерений и проблем с однородностью спутниковых данных не всегда предоставляют достоверную информацию [38], что может приводить к большому разбросу оценок климатических изменений, в частности причин арктического усиления глобального потепления [96]. Недавно появившиеся реанализы всего XX в. также не решают проблемы редких данных наблюдений, особенно в первой половине XX в., что проиллюстрировано на рис. 4, где показаны аномалии среднегодовой температуры воздуха над сушей севернее 60° с.ш. по стационарным данным и данным нескольких реанализов XX в.

Несмотря на выявление важных радиационных и динамических процессов, приводящих к АУ, дебаты о его причинах, начавшиеся в 2006 г. [97], продолжаются до сих пор. В частности, можно выделить существенный вклад в АУ процессов, связанных с водяным паром и облачностью [98]. Помимо отсутствия надежных количественных оценок вклада разных факторов в современное АУ, существует и гипотеза, что именно процессы в Арктике могут быть причиной ускоренного потепления в конце XX в. в целом в СП, а не

являться усиленным региональным проявлением глобального потепления [17].

Нет консенсуса и об относительной роли внешних радиационных факторов, главным образом антропогенного роста концентрации парниковых газов в атмосфере и внутренней изменчивости климата в Арктике в формировании современных тенденций изменений. С одной стороны, данные наблюдений указывают на устойчивые квазициклические колебания климата в северных полярных широтах [99, 43, 100, 101], что подразумевает существенный вклад естественных колебаний климата в современное потепление. С другой стороны, некоторые климатические модели практически идеально воспроизводят изменения практической температуры в современный период как отклик на внешнее радиационное воздействие [102, 103]. Сокращение площади морских льдов в моделях в целом также все лучше и лучше соответствует данным наблюдений [1]. Такие результаты подразумевают определяющую роль внешних факторов и не оставляют места для естественных колебаний климата в современном потеплении. Этот вопрос принципиально важен, потому что при наличии таких естественных колебаний, потепление в Арктике должно смениться похолоданием или существенно замедлиться в ближайшем десятилетии. Но стоит учитывать, что современное состояние климата существенно отличается от доиндустриального, рассмотренные выше механизмы положительных обратных связей, концепция точек неустойчивости и выявление новых процессов, таких как атлантификация, позволяют предположить, что арктическая климатическая система может перейти в новый динамический режим без интенсивных квазициклических колебаний.

Ключевым моментом в понимании роли естественной изменчивости климата в современном потеплении и сокращении площади арктических льдов является потепление середины XX в., механизмы которого также до сих пор являются предметом дискуссии [17, 72].

Значительная неопределенность остается и в вопросе отклика атмосферной циркуляции на АУ и сокращения площади арктических льдов (см. напр., [84]). Большое число исследований указывает на то, что АУ приводит к росту частоты формирования атмосферных циркуляционных систем, способствующих экстремальным погодным явлениям (напр., [104, 105]), но эта точка зрения аргументированно оспаривается (напр., [106, 107]). С другой стороны, уменьшение меридионального температурного градиента в средних и высоких широтах СП из-за более быстрого потепления в Арктике приводит к уменьшению интенсивности холодных (и теплых) вторжений и, соответственно, изменчивости температурных аномалий в це-

лом [108]. Это подтверждается и анализом вариаций суточных температур в разных спектральных диапазонах по стационарным наблюдениям на территории России [109]. Таким образом, вопрос о том, становится ли погода в средних и высоких широтах при глобальном потеплении более экстремальной остается открытым.

Важнейшей проблемой для реалистичного моделирования атмосферных процессов в Арктике является проблема параметризации турбулентных потоков тепла на границе океан—морской лед—атмосфера. Исследования показывают, что именно несовершенство используемых параметризаций в специфических условиях Арктики приводит к принципиальным ошибкам в воспроизведении потоков тепла на нижней границе атмосферы (напр., [19, 110]). Усовершенствование параметризаций турбулентных потоков и облачности в Арктике — одна из главных задач, требующих решения для улучшения результатов моделей атмосферы и климата.

Автор благодарен Т.А. Матвеевой и Д.Д. Бокучава за помощь в оформлении рисунков, Ю.А. Зюляевой и анонимному рецензенту за полезные замечания.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (в рамках проектов №18-05-60216 и №20-55-71003), а также с использованием результатов, полученных в рамках проекта РНФ 18-47-06203.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M.* Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change // *The Cryosphere Discuss.* 2015. V. 9. P. 1077–1131.
2. *Overpeck J., Hughen K., Hardy D., Bradley R., Case R., Douglas M., Finney B., Gajewski K., Jacoby G., Jennings A., Lamoureux S., Lasca A., MacDonald G., Moore J., Retelle M., Smith S., Wolfe A., Zielinski G.* Arctic environmental change of the last four centuries // *Science.* 1997. V. 278. № 5341. P. 1251–1256.
3. *Kinnard C., Zdanowicz C.M., Fisher D.A., Isaksson E., de Vernal A., Thompson L.G.* Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1450 years // *Nature.* 2011. V. 479. P. 509–512.
4. *Cohen J., Screen J. A., Furtado J. C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J.* Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 627–637.
5. *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.
6. *ACIA, 2005.* Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press, 1020 p.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории

- Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1535 с.
8. *Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A.* Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // *J. Climate*. 2010. V. 23. P. 3888–3906.
 9. *Budyko M.I.* The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth // *Tellus*. 1969. V. 21. P. 611–619.
 10. *Winton M.* Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. P. L03701.
 11. *Alexeev V.A., Langen P.L., Bates J.R.* Polar amplification of surface warming on an aquaplanet in ghost forcing experiments without sea ice feedbacks // *Clim. Dyn.* 2005. V. 24. P. 655–66.
 12. *Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. № 3. P. 181–184.
 13. *Lenssen N., Schmidt G., Hansen J., Menne M., Persin A., Ruedy R., Zyss D.* Improvements in the GISTEMP uncertainty model // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2019. V. 124. № 12. P. 6307–6326.
 14. *Бокучава Д.Д., Семенов В.А.* Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 28–51.
 15. *Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A.* The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // *Rev. Geophys.* 2013. V. 51. № 3. P. 415–449.
 16. *Walsh J.* The elusive Arctic warming // *Nature*. 1993. V. 361. P. 300–301.
 17. *Hegerl G.C., Brönnimann S., Schurer A., Cowan T.* The early 20th century warming: Anomalies, causes, and consequences // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2018. V. 9. № 4. P. e522.
 18. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An Oscillation in the Global Climate System of Period 65–70 Years // *Nature*. 1994. V. 367. P. 723–726.
 19. *Delworth T.L., Knutson T.R.* Simulation of early 20th century global warming // *Science*. 2000. V. 287. P. 2246–2250.
 20. *Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W.* The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature // *J. Climate*. 2010. V. 23. P. 5668–5677.
 21. *Van der Swaluw E., Drijfhout S.S., Hazeleger W.* Bjerknæs Compensation at High Northern Latitudes: The Ocean Forcing the Atmosphere // *J. Climate*. 2007. V. 20. P. 6023–6032.
 22. *Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R.L., Johnson M.A., Karklin V.P., Makstas A.P., Walsh D., Yulin V.* Observationally based assessment of polar amplification of global warming // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1878.
 23. *Мохов И.И.* Современные изменения климата в Арктике // *Вестн. РАН*. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.
 24. *Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.C., Hansen E., Hölemann Jens, Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R.* Fate of early 2000s arctic warm water pulse // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2011. V. 92. № 5. P. 561–566.
 25. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C. et al.* Greater role for Atlantic inflows on sea ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*. 2017. V. 356. № 6335. P. 285–291.
 26. *Ingvaldsen R.B., Asplin L., Loeng H.* Velocity field of the western entrance to the Barents Sea // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. C03021.
 27. *Behrendt A., Sumata H., Rabe B., Schauer U.* UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10. P. 1119–1138.
 28. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P. et al.* Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multi-sensor data sets // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 15803–15814.
 29. *Lindsay R., Schweiger A.* Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 269–283.
 30. *Нагурный А.П.* Климатические тенденции в изменении толщины многолетнего морского льда в Арктическом бассейне (1970–2005 гг.) // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 9. С. 72–78.
 31. *Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurniy A.P., Zakharov V.F., Bobylev L., Pettersson L., Hasselmann K., Cattle H.P.* Arctic climate change: observed and modeled temperature and sea-ice variability // *Tellus*. 2004. V. 56A. P. 328–341.
 32. *Holloway G., Sau T.* Has arctic sea ice rapidly thinned? // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 1691–1698.
 33. *Laxon S.W., Giles K.A., Ridout A.L., Wingham D.J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C., Hendricks S., Krishfield R., Kurtz N., Farrell S., Davidson M.* CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 732–737.
 34. *Zhang J.L., Rothrock D.A.* Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // *Mon. Weather Rev.* 2003. V. 131. P. 845–861.
 35. *Ferry N., Remy E., Brasseur P., Maes C.* The Mercator global ocean operational analysis forecast system: assessment and validation of an 11-year reanalysis // *J. Marine Systems*. 2007. V. 65. P. 540–560.
 36. *Schröder D., Feltham D.L., Tsamados M., Ridout A., Tilling R.* New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modeling // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 125–139.
 37. *Семенов В.А., Матвеева Т.А.* Изменения арктических морских льдов в первой половине XX века:

- пространственно-временная реконструкция на основе температурных данных // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 611–616.
38. *Graham R.M., Cohen L., Ritzhaupt N., Segger B., Graversen R.G., Rinke A., Walden V.P., Granskog M.A., Hudson S.R.* Evaluation of six atmospheric reanalyses over Arctic sea ice from winter to early summer // *J. Climate*. 2019. V. 32. № 14. P. 4121–4143.
 39. *Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Brönnimann S.* The twentieth century reanalysis project // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. № 654. P. 1–28.
 40. *Hersbach H., Peubey C., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Dee D.* ERA-20CM: a twentieth-century atmospheric model ensemble // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. № 691. P. 2350–2375.
 41. *Laloyaux P., Balmaseda M., Dee D., Mogensen K., Janssen P.* A coupled data assimilation system for climate reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2016. V. 142. № 694. P. 65–78.
 42. *Schweiger A.J., Wood K.R., Zhang J.* Arctic Sea Ice Volume Variability over 1901–2010: A Model-Based Reconstruction // *J. Climate*. 2019. V. 32. P. 4731–4752.
 43. *Алексеев Г.В., Данилов А.И., Катцов В.М., Кузьмина С.И., Иванов Н.Е.* Изменения площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 723–735.
 44. *Semenov V.A., Latif M.* The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 1231–1237.
 45. *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.* 2016. V. 36. № 9. P. 3407–3412.
 46. *Walsh J.E., Fetterer F., Stewart S.J., Chapman W.L.* A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850 // *Geogr. Rev.* 2017. V. 107. № 1. P. 89–107.
 47. *Brennan M.K., Hakim G.J., Blanchard-Wrigglesworth E.* Arctic sea-ice variability during the instrumental era // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. GL086843.
 48. *Chernokulsky A.V., Esau I., Bulygina O.N., Davy R., Mokhov I.I., Outten S., Semenov V.A.* Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late nineteenth century // *J. Climate*. 2017. V. 30. № 6. P. 2103–2120.
 49. *Spielhagen R.F., Werner K., Sørensen S.A., Zamelczyk K., Kandiano E., Budeus G., Husum K., Marchitto T.M., Hald M.* Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water // *Science*. 2011. V. 331. № 6016. P. 450–453.
 50. *Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С.* Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // *Лед и Снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.
 51. *Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Matthes H., Semenov V.A., Adakudlu M., Cassano J., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Glisan J., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W.* Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX) // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. T. 123. № 5. С. 2537–2554.
 52. *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. P. 024009.
 53. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Rember R., Padman L., Carmack E.C., Jackson J.M.* Winter convection transports Atlantic water heat to the surface layer in the Eastern Arctic Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 2013. V. 43. P. 2142–2155.
 54. *Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // *Nat. Clim. Change*. 2018. V. 8. P. 634–639.
 55. *Ivanov V.V., Alexeev V.A., Repina I.A., Koldunov N.V., Smirnov A.V.* Tracing Atlantic Water signature in the Arctic sea ice cover east of Svalbard // *Advances in Meteorology*. 2012. V. 2012. P. 201818.
 56. *Ivanov V.V., Alexeev V.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandø A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A.V.* Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: A suggested positive feedback // *J. Physical Oceanography*. 2016. V. 46. № 5. P. 1437–1456.
 57. *Ivanov V., Smirnov A., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I., Semenov V.* Contribution of Convection-Induced Heat Flux to Winter Ice Decay in the Western Nansen Basin // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2018. V. 123. P. 6581–6597.
 58. *Alexeev V.A., Walsh J.E., Ivanov V.V., Semenov V.A., Smirnov A.V.* Warming in the Nordic Seas, North Atlantic storms and thinning Arctic sea ice // *Env. Res. Lett.* 2017. V. 12. P. 084011.
 59. *Schlichtholz P.* Observational evidence for oceanic forcing of atmospheric variability in the Nordic seas area // *J. Climate*. 2013. V. 26. P. 2957–2975.
 60. *Schlichtholz P.* Local wintertime tropospheric response to oceanic heat anomalies in the Nordic Seas area // *J. Climate*. 2014. V. 27. P. 8686–87.
 61. *Schlichtholz P.* Subsurface ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 13692
 62. *Onarheim I.H., Eldevik T., Årthun M., Ingvaldsen B.R., Smedsrud L.H.* Skillful prediction of Barents Sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 5364–5371.
 63. *Årthun M., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H. L., Keenlyside, N. S.* Skillful prediction of northern climate provided by the ocean // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. P. 15875.
 64. *Dellworth T.L., Manabe S., Stouffer R.J.* Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean–atmosphere model // *J. Climate*. 1993. V. 6. P. 1993–2011.
 65. *Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U.S., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh J.E.,*

- Zakharov V.F.* Variability of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years // *J. Climate*. 2004. V. 17. P. 4485–4497.
66. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Докл. РАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.
67. *Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I.* Barents Sea multidecadal variability // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 19. P. L19604.
68. *Kosaka Y., Xie S.* Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling // *Nature*. 2013. V. 501. P. 403–407.
69. *Tokinaga H., Xie S.P., Mukougawa H.* Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2017. V. 114. № 24. P. 6227–6232.
70. *Wegmann M., Brönnimann S., Compo G.P.* Tropospheric circulation during the early twentieth century Arctic warming // *Climate dynamics*. 2017. V.48. № 7–8. P. 2405–2418.
71. *Svendsen L., Keenlyside N., Bethke I., Gao Y., Omrani N.E.* Pacific contribution to the early twentieth-century warming in the Arctic // *Nature Clim. Chan.* 2018. V. 8. P. 793–797.
72. Малинин В.Н., Вайновский П.А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 34–55.
73. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390.
74. *Bengtsson L., Semenov V. A., Johannessen O. M.* The early twentieth-century warming in the Arctic – a possible mechanism // *J. Climate*. 2004. V. 17. P. 4045–4057.
75. Калавиччи К.А., Башмачников И.Л. К механизму положительной обратной связи долгосрочной изменчивости конвергенции океанических и атмосферных потоков тепла и площади ледяного покрова в Баренцевом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 171–181.
76. *Semenov V.A., Park W., Latif M.* Barents Sea inflow shutdown: A new mechanism for rapid climate changes // *Geoph. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L14709.
77. *Lenton T.M.* Arctic climate tipping points // *Ambio*. 2012. V. 41. № 1. P. 10–22.
78. Золотокрылин А.Н., Михайлов А.Ю., Туткова Т.Б. Влияние притока теплых атлантических вод на аномалии климата в атлантическом секторе Арктики // Лед и Снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 73–82.
79. *Newson R.L.* Response of a general circulation model of the atmosphere to removal of the Arctic ice-cap // *Nature*. 1973. V. 241. P. 39–40.
80. *Herman G.T., Johnson W.T.* The sensitivity of the general circulation of Arctic sea ice boundaries: A numerical experiment // *Mon. Wea. Rev.* 1978. V. 106. P. 1649–1664.
81. *Honda M., Inoue J., Yamane S.* Influence of low Arctic sea-ice minima on wintertime Eurasian coldness // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L08707.
82. *Petoukhov V., Semenov V.A.* A link between reduced Barents–Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2010. V. 115. P. D21111.
83. *Vihma T.* Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review // *Surv. Geophys.* 2014. V. 35. P. 1175–214.
84. Мелешко В.П., Катцов В.М., Мурвис В.М., Байдин А.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А. Существует ли связь между сокращением морского льда в Арктике и ростом повторяемости аномально холодных зим в Евразии и Северной Америке? Синтез современных исследований // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 49–67.
85. *Semenov V.A., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10. P. 054020.
86. *Overland J. E., Dethloff K., Francis J.A., Hall R.J., Hanna E., Kim S.J., Screen J.A., Shepherd T.G., Vihma T.* Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic // *Nat. Clim. Change*. 2016. V. 6. № 11. P. 992.
87. *Omrani N., Keenlyside N.S., Bader J., Manzini E.* Stratosphere key for wintertime atmospheric response to warm Atlantic decadal conditions // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 649–663.
88. *Kim B.M., Son S.W., Min S.K., Jeong J.H., Kim S.J., Zhang X., Shim T., Yoon J.H.* Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
89. *Moritz R.E., Bitz C.M., Steig E.J.* Dynamics of recent climate change in the Arctic // *Science*. 2002. V. 297. P. 1497–1502.
90. *Shindell D.T., Miller R.L., Schmidt G.A., Pandolfo L.* Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing // *Nature*. 1999. V. 399. P. 452–455.
91. *Rodwell M.J., Rowell D.P., Folland C.K.* Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate // *Nature*. 1999. V. 398. P. 320–323.
92. *Hoerling M.P., Hurrell J.W., Xu T.* Tropical origins for recent North Atlantic climate change // *Science*. 2001. V. 292. P. 90–92.
93. *Bretherton C.S., Battisti D.S.* An interpretation of the results from atmospheric general circulation models forced by the time history of the observed sea surface temperature distribution // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 767–770.
94. *Semenov V.A., Latif M., Jungclauss J.H., Park W.* Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // *Geoph. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L11701.
95. *Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslowski W.* The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation // *J. Climate*. 2000. V. 13. P. 2671–2696.
96. *Alexeev V.A., Esau I., Polyakov I.V., Byam S.J., Sorokina S.* Vertical structure of recent arctic warming from

- observed data and reanalysis products // *Clim. Change*. 2012. V. 111. P. 215–239.
97. *Serreze M.C., Francis J.A.* The arctic amplification debate // *Clim. Change*. 2006. V. 76. P. 241–264.
98. *Yoshimori M., Watanabe M., Abe-Ouchi A., Shiogama H., Ogura T.* Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 1613–1630.
99. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
100. *Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F.* Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006 // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. C11005.
101. *Miles M.W., Divine D.V., Furevik T., Jansen E., Moros M., Ogilvie A.E.J.* A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 463–469.
102. *Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G.C., Wehner M.F., Jones P.D.* Attribution of polar warming to human influence // *Nat. Geosci.* 2008. V. 1. № 11. P. 750–754.
103. *Fyfe J.C., Von Salzen K., Gillett N.P., Arora V.K., Flato G.M., McConnell J.R.* One hundred years of Arctic surface temperature variation due to anthropogenic influence // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. P. 2645.
104. *Francis J.A., Vavrus S.J.* Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L06801.
105. *Crasemann B., Handorf D., Jaiser R., Dethloff K., Nakamura T., Ukita J., Yamazaki K.* Can preferred atmospheric circulation patterns over the North-Atlantic-Eurasian region be associated with arctic sea ice loss? // *Polar Sci.* 2017. V. 14. P. 9–20.
106. *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: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2016. V. 68. № 1. P. 32330.
107. *Perlwitz J., Hoerling M., Dole R.* Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes // *J. Climate*. 2015. V. 28. № 6. P. 2154–2167.
108. *Screen J.A.* Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid-to high-latitudes // *Nat. Clim. Change*. 2014. V. 4. № 7. P. 577.
109. *Бабина Е.Д., Семенов В.А.* Внутримесячная изменчивость среднесуточной приземной температуры на территории России в период 1970–2015 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 8. С. 21–33.
110. *Chaudhuri A.H., Ponte R.M., Nguyen A.T.* A comparison of atmospheric reanalysis products for the Arctic Ocean and implications for uncertainties in air–sea fluxes // *J. climate*. 2014. V. 27. № 14. P. 5411–5421.

Modern Studies of the Arctic Climate: Progress, Change of Concepts, Problems to Solve

V. A. Semenov^{1, 2, *}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences, Pyzhevskiy per., 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Staromonetnii per., 29-4, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: vasesmenov@ifaran.ru

A review of some major achievements in research on the Arctic climate change in the last decade is given. Mechanisms of positive feedbacks leading to accelerated climate changes in the northern high latitudes are considered. Some recently popular hypotheses of the rapid Arctic climate change that failed when confronted the observed climate changes are exemplified. Urgent problems on the Arctic climate change are formulated.

Keywords: Arctic climate change, feedbacks in climate system, natural climate variability