

## ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ КАК ИНДИКАТОР КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ В ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКЕ В XXI ВЕКЕ

В.В. Иванов<sup>1</sup>, В.С. Архипкин<sup>2</sup>, Е.М. Лемешко<sup>3</sup>, С.А. Мысленков<sup>4</sup>, А.В. Смирнов<sup>5</sup>,  
Г.В. Суркова<sup>6</sup>, Ф.К. Тузов<sup>7</sup>, Д.Г. Чечин<sup>8</sup>, А.А. Шестакова<sup>9</sup>

<sup>1,2,4,6,7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

<sup>1,5</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, отдел взаимодействия океана и атмосферы

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ФИЦ «Морской гидрофизический институт», лаборатория гидрофизических подспутниковых исследований

<sup>4</sup> Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, лаборатория экспериментальной физики океана; Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, отдел морских гидрологических прогнозов; океанолог

<sup>7</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (ВНИИ ГОЧС) (Федеральный центр науки и высоких технологий), семьдесят второй научно-исследовательский отдел

<sup>8,9</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН», лаборатория взаимодействия атмосферы и океана

<sup>1</sup> Кафедра океанологии, вед. науч. сотр.; гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru

<sup>2</sup> Кафедра океанологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

<sup>3</sup> Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

<sup>4</sup> Кафедра океанологии, ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: stasoccean@gmail.com

<sup>5</sup> Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alexander.vic.smirnov@gmail.com

<sup>6</sup> Кафедра метеорологии и климатологии, доц., д-р геогр. наук; e-mail: galina\_surkova@mail.ru

<sup>7</sup> Мл. науч. сотр. (МГУ); науч. сотр. (ВНИИ ГОЧС); e-mail: fedor-tuz@mail.ru

<sup>8</sup> Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: chechin@ifaran.ru

<sup>9</sup> Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: shestakova.aa.92@gmail.com

В настоящее время надежно установлено, что изменение климата в Арктике происходит значительно быстрее, чем в среднем по планете, вследствие так называемого эффекта «арктического усиления». Комплексный анализ современного состояния гидрометеорологических условий в Баренцевом море, результаты которого кратко обобщены в данной статье, позволил оценить генеральные направления происходящих изменений, которые в дальнейшем могут распространиться на лежащие восточнее окраинные моря Северного Ледовитого океана. На основе данных наблюдений, атмосферного и океанского реанализов и спутниковой информации исследованы гидрометеорологические условия в Баренцевом море при значительно сократившемся морском ледяном покрове. Фундаментальным выводом, полученным в результате выполненного анализа, является заключение о возможности активизации обратных связей в системе «океан – лед – атмосфера» вследствие генерального отступления ледовой кромки в Баренцевом море в северо-восточном направлении. Сокращение ледяного покрова в первую очередь влияет на характер энергообмена между океаном и атмосферой. Вследствие этого меняется режим формирования водных масс в направлении уменьшения роли ледяного покрова, возрастания роли горизонтальной адвекции и аккумуляции тепла в верхнем слое вод. Однако изменчивость потоков тепла модулируется комбинацией таких факторов, как атмосферная циркуляция и адвекция тепла в океане. Так как долгопериодные изменения в океане и атмосфере происходят не синхронно, прямой связи между изменением потоков тепла и площадью морского льда не наблюдается. Вследствие уменьшения площади морского льда с 2007 г. установлено значительное увеличение потоков скрытого тепла и, благодаря этому, суммарных потоков, тогда как потоки явного тепла, наоборот, уменьшились. Показано, что частота холодных вторжений над Баренцевым морем, также влияющих на потоки тепла, в основном определяется межгодовой изменчивостью повторяемости различных крупномасштабных мод циркуляции атмосферы и с площадью льда непосредственно не связана.

**Ключевые слова:** Северный Ледовитый океан, гидрометеорологические условия, изменение климата, взаимодействие океана и атмосферы, морские течения, волны, водные массы, уровень моря

### ВВЕДЕНИЕ

Если в конце 1990-х и даже начале 2000-х гг. климатические прогнозы сезонно безледного Се-

верного Ледовитого океана (СЛО) в конце XXI в. многими воспринимались со скепсисом, то после рекордного сокращения площади ледяного покро-

ва в 2007 г. отношение к таким сценариям заметно изменилось. Более того, устойчивое сохранение аномально низкой летней площади льда в период с 2007 г. по настоящее время заставило ученых-климатологов пересмотреть ожидаемые сроки перехода к сезонно безледному СЛО на существенно более ранние (в среднем к середине XXI в.) или даже раньше [Guarino et al., 2020]. С учетом этого, понимание и обоснованный прогноз изменений гидрометеорологического режима СЛО и его окраинных морей вследствие меняющихся ледовых условий является актуальным и важным. В таком контексте Баренцево море занимает особое место, поскольку в силу своего географического положения оно может рассматриваться как своего рода «ворота» Арктики, изменения в которых могут служить предвестником изменений, которые в дальнейшем охватят лежащие к востоку и северу регионы.

Результаты недавних отечественных и зарубежных исследований свидетельствуют о том, что наиболее резкие изменения в 2010-е гг. произошли в северной и северо-восточной частях Баренцева моря. Постепенное повышение температуры и солености в этом районе отмечается с середины 2000-х гг. [Schlichtholz, 2019]. Подобную тенденцию гипотетически связывают с общим сокращением объема морского льда в СЛО, следствием чего является снижение импорта льда на акваторию Баренцева моря и вызванного этим осолонения, что ведет к ослаблению плотностной стратификации, интенсификации вертикального перемешивания и возрастанию поступления тепла и соли из глубин к поверхности моря [Lind et al., 2018]. Результатом подобных изменений является дальнейшее сокращение морского льда, т. е. реализация положительной обратной связи [Ivanov et al., 2016], которую в современной научной литературе принято определять термином «атлантификация» [Polyakov et al., 2017]. Поскольку Баренцево море является сравнительно мелководным бассейном (средняя глубина составляет 230 м), процесс атлантификации развивается здесь значительно быстрее, чем в расположенном к северу глубоководном Арктическом бассейне. В силу этого гидрологический режим в северо-восточной части Баренцева моря может в ближайшие годы полностью трансформироваться к квазиатлантическому типу, характерной чертой которого является круглогодичное отсутствие ледяного покрова с дискуссионными последствиями для климата и экосистемы моря и прилегающих районов суши.

В рамках проекта РФФИ-Арктика № 18-05-60083 был выполнен комплексный анализ современных гидрометеорологических условий в Баренцевом море, включавший рассмотрение влияния атмосферной циркуляции на метеорологические параметры и

тепловые потоки на границе океана и атмосферы, пространственно-временную изменчивость энергообмена между океаном и атмосферой (включая оценку вклада холодных вторжений), штормовую активность, адвекцию тепла в океане и стерические колебания уровня. В статье представлены наиболее значимые результаты проекта. В заключительном разделе выполнен синтез результатов, полученных по отдельным направлениям исследований, с целью построения обобщенной картины наблюдаемых изменений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния атмосферной циркуляции на метеорологические параметры и тепловые потоки на границе океана и атмосферы основывалось на среднемесячных данных из реанализа ERA-Interim для Северного полушария в широтной зоне 60–90° с. ш. за период с 1979 по 2018 г. с разрешением по пространству 0,125° [Dee et al., 2011; ECMWF..., 2019]. Типизация барических полей производилась с помощью нелинейного метода самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) для нейронной сети, позволяющего выделить пространственно-временные структуры в последовательности скалярных полей [Applications..., 2012]. Для оценки связи общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и пространственно-временных особенностей энергообмена океана и атмосферы также были использованы индексы атмосферной циркуляции, наиболее значимые в этом регионе: индекс североатлантического колебания NAO, индекс арктического колебания AO, индекс скандинавского колебания SCAND. Использовались ежегодные среднемесячные индексы, размещаемые Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [Climate Prediction..., 2019]. Для исследования влияния внешних условий на турбулентные потоки тепла были проведены численные эксперименты с помощью алгоритма COARE [COARE-Met..., 2019] с применением набора параметризаций шероховатости для штормов различного типа и интенсивности. В качестве входных данных использовался реанализ CFSR [Climate Data, 2019]. Для выделения экстремальных холодных вторжений применялась разность среднесуточных потенциальных температур поверхности моря и воздуха на высоте 700 гПа ( $I_{CAO}$ ):

$$I_{CAO} = CAO + \sigma_I, \quad (1)$$

где CAO – многолетнее среднее, рассчитанное для каждого дня года в результате осреднения за 30-дневный период, центр которого приходится на конкретный день;  $\sigma_I$  – многолетнее среднее

стандартное отклонение за каждый 30-дневный период (СКО). Для выделения случаев холодных вторжений использовалось условие превышения  $I_{\text{CAO}}$  суммы многолетнего среднего индекса и СКО. Исследование штормовой активности было выполнено согласно методике POT (Peak Over Threshold), описанной в работе [Мысленков, 2019]. Для каждого года на акватории Баренцева моря было рассчитано количество случаев штормового волнения с различной высотой значительных волн от 5 до 10 м. Методика расчета заключалась в подсчете количества переходов исследуемой величины через заранее определенный критерий. Чтобы исключить возможные ошибки, между двумя случаями штормового волнения должно было пройти не менее девяти часов. Для дальнейших расчетов потоков тепла был составлен каталог штормов с высотой значительных волн более 5 м. Всего было выделено 2007 случаев штормов или 1964 штормовых дня за период с 1979 по 2017 г. Оценка влияния морских волн на турбулентные потоки тепла в Баренцевом море была выполнена при помощи алгоритма COARE и данных метеорологического реанализа NCEP/CFSR/CFSv2. Также был выполнен ряд численных экспериментов с разными параметризациями шероховатости морской поверхности. Для исследования влияния адвекции тепла в океане на термохалинную структуру и ледяной покров моря были использованы данные океанического реанализа GLORYS12V1 (MERKATOR) [Mercator..., 2019] и материалы натурных наблюдений в Баренцевом море в экспедиции «Трансарктика-2019» [Фролов и др., 2019]. Данные реанализа MERKATOR были подготовлены в формате числовых массивов, позволяющих осуществлять пространственно-временные выборки по заданным критериям поиска, включающим время и географические координаты. Основой для изучения многолетней изменчивости стерического уровня Баренцева моря послужили океанографические данные из базы World Ocean Database 2018 [World..., 2019]. Для исследования стерических колебаний уровня моря были выбраны две характерные области, в первой из которых термохалинная структура вод определяется адвекцией теплых атлантических вод, а вторая расположена в центральной части моря, где в холодное время года формируется собственная водная масса. Вычисления стерических отклонений уровня моря и их термической и соленостной составляющих проводились по формулам, приведенным в работе [Архипкин, Добролюбов, 2005]. Расчеты проводились относительно средней океанографической станции, рассчитанной для каждого квадрата за определенный месяц за все годы вычислений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Влияние атмосферной циркуляции на метеорологические параметры и энергообмен между океаном и атмосферой.** Для описания сезонной изменчивости типов атмосферной циркуляции был рассчитан индекс сезонной повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления за период с 1979 по 2018 г. В сезонном ходе с повторяемостью 25% наблюдается циклонический тип приземного давления, который доминирует в летние месяцы, достигая максимальной повторяемости 94% в июле и августе, в то время как в зимний период (декабрь–февраль) преобладают антициклонические или смешанные типы циркуляции. Весной преобладает антициклонический тип с максимальной повторяемостью в мае до 60%. Повторяемость каждого типа циркуляции в течение одного года количественно выражается соответствующим индексом. Он подвержен значительной межгодовой изменчивости, что характеризует два основных циркуляционных режима над Арктикой – циклонический и антициклонический – с переходными фазами между ними. В целом это соответствует межгодовой изменчивости Арктического колебания (АО), положительная фаза которого соответствует циклонической циркуляции, а отрицательная – антициклонической, но использованный подход дает более детальную картину типов циркуляции и позволяет связать с ними распределения метеорологических параметров.

Для каждого выделенного типа поля атмосферного давления рассчитывалось соответствующее ему поле метеорологического параметра, осредненного по тем же периодам времени, в пределах которых существовал данный тип циркуляции. Такой композитный анализ для каждого из шести типов циркуляции был проведен за период с 1979 по 2018 г. для следующих полей: температуры поверхности моря (ТПМ), фракции морского льда, приземной температуры воздуха (ПТВ), турбулентных потоков влаги и тепла. В поле ТПМ выделяются меридиональные градиенты температуры, которым соответствуют более слабые потоки тепла в юго-восточной части Баренцева моря по сравнению с его северо-западной и северо-восточной частями. Выявлены характерные типы изменчивости потоков тепла и влаги в Баренцевом море, модулирующиеся атмосферной циркуляцией и адвекцией тепла атлантическими водами, которые хорошо трассируются по картам температуры поверхности моря.

Были проанализированы пространственные и сезонные зависимости между потоками явного и скрытого тепла и индексами общей циркуляции атмосферы: АО, Северо-Атлантического колебания (NAO) и скандинавского колебания SCAND. Пока-

зано, что корреляция между потоками и индексами на акватории Баренцева моря имеет существенную неоднородность вследствие активной циклонической деятельности в этом регионе, а также сопоставимости территории моря с размерами синоптических вихрей, циклонов и антициклонов, в разных секторах которых происходит адвекция воздушных масс из других широт. В разных частях вихрей на фоне адвекции более теплого, чем ТПМ, воздуха вертикальный градиент температуры меняется. Установлено, что связь с индексом АО на протяжении года преимущественно отрицательная и наиболее выражена зимой, поскольку положительная фаза индекса соответствует вторжениям с севера, что способствует интенсификации потоков явного и скрытого тепла над открытой водой. Связь с индексом NAO имеет значительную пространственную неоднородность, в разных частях моря знак может быть различен. Индекс SCAND свидетельствует о наличии области повышенного давления над Скандинавским полуостровом. Подобная синоптическая ситуация наблюдается реже, несмотря на то что циклоническая деятельность в регионе довольно активна. В этом случае усиливается адвекция холодного воздуха с севера, что стимулирует энергообмен между морем и атмосферой. Поэтому значимые связи между SCAND и величиной потоков тепла имеют преимущественно положительный знак и более выражены в теплый период, а также осенью и в начале зимы. В целом можно заключить, что связь индексов общей циркуляции атмосферы и интенсивности теплообмена между морем и атмосферой характеризуется значительной годовой и пространственной изменчивостью, детально рассмотренной в следующем разделе.

**Пространственно-временная изменчивость энергообмена между океаном и атмосферой.** Вопрос пространственно-временной изменчивости турбулентного энергообмена океана и атмосферы над Баренцевым морем рассматривался по двум направлениям. Первое – определение ежегодных суммарных

потоков явного и скрытого тепла над всей площадью моря. Второе – выявление районов, где режим теплообмена между морем и атмосферой наиболее чувствителен к изменению атмосферной циркуляции. Сопоставление режима теплообмена над Баренцевым и Карским морями выполнялось для каждой из задач, чтобы подчеркнуть роль наличия морского льда в интегральном теплообмене моря и атмосферы – контрастный ледовый режим этих двух морей определяется влиянием архипелага Новая Земля, который отрезает приток теплых атлантических вод в Карское море. Расчеты показали, что суммарные годовые потоки явного тепла со всей акватории Баренцева моря в среднем за исследуемый период больше, чем над Карским морем в три-четыре раза, а в отдельные годы превышают их в десятки раз (рис. 1). Поступление скрытого тепла в атмосферу за год с поверхности Баренцева моря в

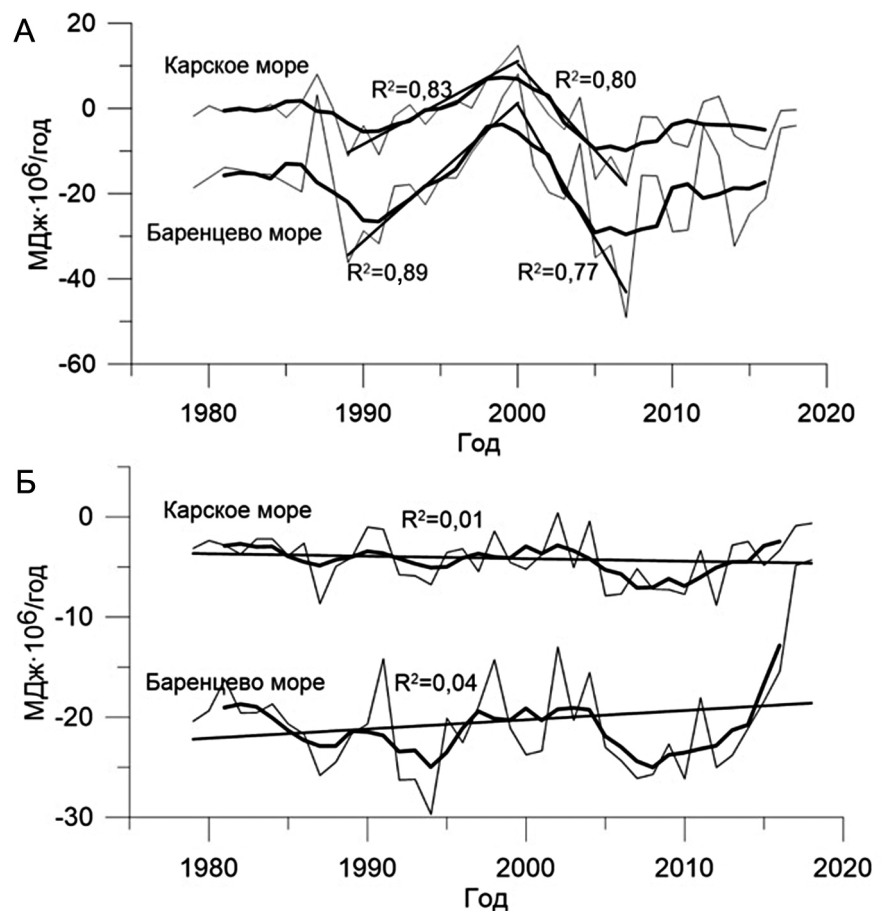


Рис. 1. Многолетние изменения суммарного годового потока явного (А) и скрытого (Б) тепла над акваториями Баренцева и Карского морей (тонкая линия), скользящая средняя – 5-летний интервал сглаживания (жирная линия), линии регрессии (прямые) и соответствующий им квадрат коэффициента линейной корреляции  $R^2$

Fig. 1. Long-term changes in the total annual flux of sensible (A) and latent (Б) heat over the Barents and Kara Seas (thin line), running average – 5-year smoothing interval (bold line), regression lines (straight lines) and the corresponding square of the linear correlation coefficient  $R^2$

пять-шесть раз больше, чем с Карского моря, а в некоторые годы величина интегральных потоков может отличаться на порядок величины. Как следует из рисунка 1, за период с 1979 по 2018 г. единый тренд интегральной по акватории годовой величины потоков явного и скрытого тепла статистически незначим. Тем не менее присутствуют более короткие направленные декадные изменения, в том числе выражено уменьшение потоков явного тепла на протяжении 1990-х гг. и их увеличение в первом десятилетии XXI в. и вновь уменьшение в 2010-е гг. Уменьшение турбулентных потоков происходит на фоне ослабления широтного переноса в атмосфере и увеличения площади морского льда. С 2007 г. в связи с уменьшением площади морского льда наблюдается значительное увеличение потоков скрытого тепла, а также суммарных потоков. Статистические оценки показали, что, несмотря на существенную разницу суммарных за год потоков тепла от поверхности Баренцева и Карского морей в атмосферу, межгодовые изменения достаточно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов в этих морях, влияющих на турбулентный энергообмен между морями и атмосферой.

Были проведены численные эксперименты для оценки влияния морского волнения на коэффициент шероховатости и турбулентные потоки с использованием параметризаций Чарнока (без явного учета волнения) и параметризаций [Taylor, Yelland, 2001; Drenan et al., 2003; Oost et al., 2002], которые учитывают параметры волн в явном виде. Расчеты были проведены для 1979–2017 гг., а также отдельно для периодов, когда наблюдались холодные вторжения и штормовое волнение. Различия среднеголетних значений потоков тепла, рассчитанные с использованием различных параметризаций, малы и составляют в среднем 1–3%. Параметризации [Taylor, Yelland, 2001; Oost et al., 2002] в среднем приводят к увеличению потоков тепла, а параметризация [Drennan et al., 2003] – к уменьшению величины потоков по всему морю по сравнению с параметризацией Чарнока. Различия в потоках тепла во время штормов с высотой волн более 5 м превышают средние значения в два раза. В целом эффект от явного учета параметров волн небольшой. Можно заключить, что для климатических расчетов целесообразно пренебречь явным учетом параметров морских волн. Однако если шторма и холодные вторжения наблюдаются одновременно, то чувствительность расчетных значений потоков к используемым в параметризации существенно увеличивается. В некоторых случаях разница может достигать 700 Вт/м<sup>2</sup>.

Для более детального исследования зависимости межгодовой изменчивости потерь тепла с поверхности Баренцева моря от режима циркуляции атмосферы были выполнены оценки повторяемости экстремальных холодных вторжений (ХВ) над Баренцевым морем по данным атмосферного реанализа (рис. 2). Получена высокая корреляция между повторяемостью холодных вторжений и средней за холодный сезон потерей тепла со свободной ото льда поверхности Баренцева моря. Эта корреляция обнаружена как для турбулентных потоков явного и скрытого тепла, так и для суммарного потока длинноволновой радиации [Myslenkov et al., 2021]. На пространственно-временную изменчивость потерь тепла с поверхности моря влияет не только повторяемость холодных вторжений, но и положение прикромочной зоны. Так, в годы минимальной ледовитости моря в его восточную часть протягивается область максимальных значений потока явного тепла, а поток скрытого тепла и суммарный поток длинноволновой радиации также достигают больших абсолютных значений над свободной ото льда поверхностью моря. Это означает, что в такие годы восточная часть Баренцева моря подвержена сильному выхолаживанию, что может существенно влиять на процессы трансформации водных масс, стратификацию и перемешивание.

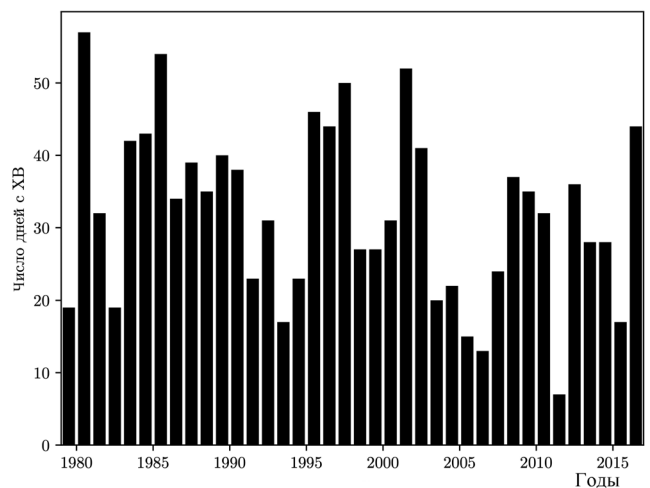


Рис. 2. Число дней с холодными вторжениями (ХВ) над Баренцевым морем по данным атмосферного реанализа ERA-Interim

Fig. 2. Number of days with cold invasions over the Barents Sea according to atmospheric reanalysis ERA-Interim

В среднем, холодные вторжения наблюдаются в 16,4% дней. Однако для их повторяемости характерна сильная межгодовая изменчивость – среднеквадратическое отклонение количества дней с холодными вторжениями составляет 12 дней. Следует отметить, что значимого тренда изменения повторяемости холодных вторжений и его связи с ледовитостью моря не прослеживается. Частота хо-

лодных вторжений над Баренцевым морем определяется межгодовой изменчивостью повторяемости различных крупномасштабных мод циркуляции атмосферы. В наибольшей степени повторяемость холодных вторжений коррелирует с индексом SCAND, характеризующим интенсивную адвекцию холода с севера и северо-востока. Кроме того, отмечается отрицательная корреляция индекса NAO с повторяемостью холодных вторжений над Баренцевым морем [Kolstad et al., 2009]. Особенно сильна отрицательная корреляция индекса NAO с повторяемостью восточных холодных вторжений над Баренцевым морем, что, очевидно, соответствует нарушению западного переноса. Доля восточных холодных вторжений над Баренцевым морем существенна (16% случаев). Наибольшую повторяемость имеют северное (30%) и северо-восточное (27%) направления ветра.

**Штормовая активность и новоземельская бора.** На основе результатов моделирования волнения была рассчитана повторяемость штормов в Баренцевом море с 1979 по 2019 г. для различных критериев от 6 до 9 м (рис. 3). В среднем повторя-

емость случаев с высотой волн более 6 м составляет около 30 случаев, а максимальные значения повторяемости наблюдаются в 1990–1993 гг. Для случаев с высотой волн более 6–9 м выделяются следующие тренды: с 1979 по 1991–1993 гг. наблюдалось увеличение повторяемости, с 1991–1993 по 1999–2000 гг. – уменьшение, а далее снова небольшое увеличение. В среднем за весь период с 1979 по 2019 г. тенденции на однозначное увеличение количества случаев штормового волнения не отмечается. Межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения очень велика (для разных годов количество случаев может меняться в два-три раза). При сопоставлении повторяемости штормового волнения и индекса АО обнаружено, что максимальный коэффициент корреляции наблюдается при осреднении индекса и повторяемости с декабря по март и составляет 0,6 для случаев с высотой волн более 7 м и 0,57 при высоте волн более 8 м. Генеральное направление штормовых волн (более 6 м) для Баренцева моря с запада, поэтому увеличение длины разгона с севера не влияет на повторяемость штормов.

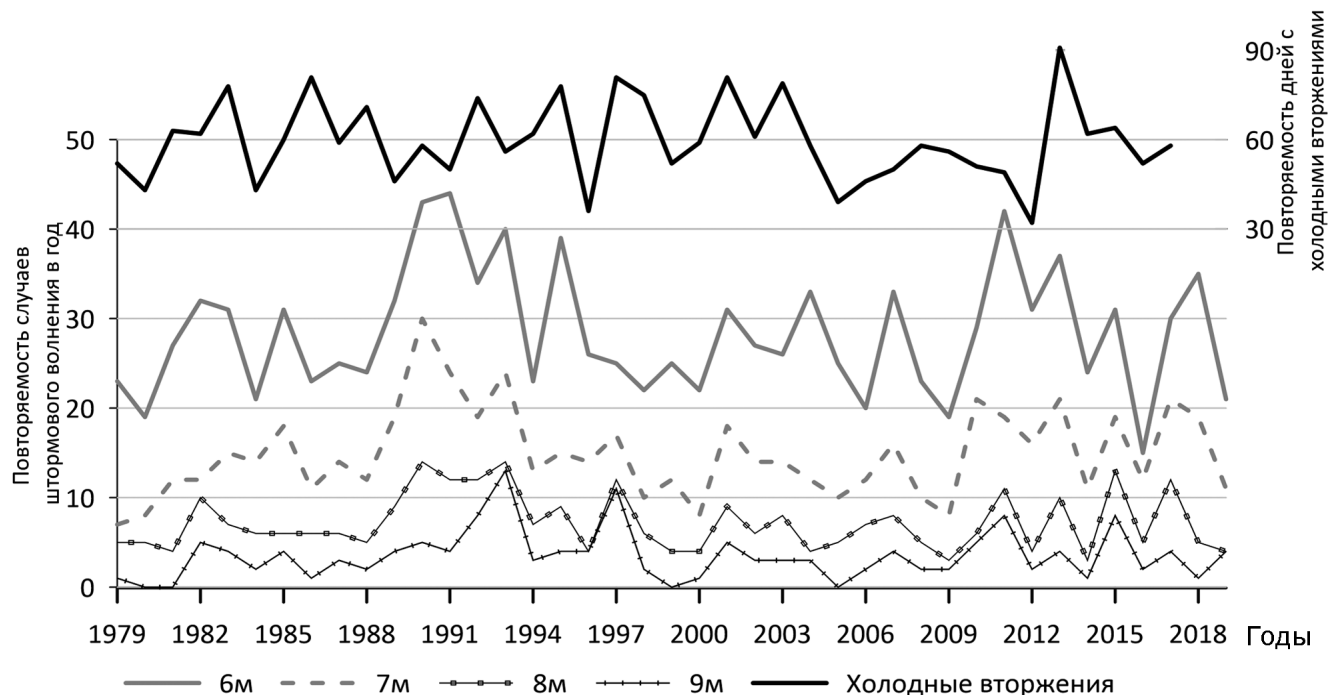


Рис. 3. Повторяемость случаев штормового волнения в Баренцевом море с различной максимальной высотой волн с 1979 по 2019 г.

Fig. 3. Frequency of storms with different maximal wave height in the Barents Sea during 1979–2019

Были проведены эксперименты с атмосферной моделью WRF и волновой моделью WW3 для нескольких эпизодов новоземельской боры [Shestakova et al., 2020]. Эксперименты показали, что аномалия высоты волн во время сильной

боры на востоке Баренцева моря достигает 2–3 м, а влияние боры распространяется на расстояние до 200 км от берега. Используя известные параметризации коэффициента шероховатости  $z_0$  с учетом волнения, была приближенно оценена ошибка в

определении шероховатости, вызванная недоучетом высоты волн, связанных с борой. Эта ошибка для рассмотренных эпизодов боры в среднем имеет порядок  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  м, т.е. сопоставима с самой величиной шероховатости над морской поверхностью при умеренном и сильном ветре [Китайгородский, Волков, 1965]. Из-за высокой повторяемости и интенсивности новоземельской боры ее влияние на волнение и связанные с ним процессы может приводить и к заметному климатическому отклику.

**Адвекция тепла в океане и ее влияние на термохалинную структуру вод.** Результаты анализа пространственной изменчивости данных гидрологических наблюдений на трех последовательных разрезах в Баренцевом море позволяют заключить, что существующая концепция о преобладающей трансформации поступающих из Норвежского моря Атлантических вод (АВ) вследствие зимней конвекции в открытом море требует пересмо-

тра. Новые данные наблюдений, согласованные с продуктами океанского реанализа, указывают на определяющую роль каскадинга с западного шельфа архипелага Новая Земля [Ivanov et al., 2004] как основного механизма, обеспечивающего интенсивное охлаждение АВ. Формирующиеся в результате халинной конвекции на мелководных шельфах холодные уплотненные воды стекают в виде придонных гравитационных течений в глубоководные котловины, перемешиваясь с АВ. Конечным продуктом такого взаимодействия водных масс является так называемая Баренцевоморская Атлантическая вода (БАВ), которая приобретает характерные термохалинные индексы (отрицательную температуру и пониженную соленость) в северо-восточной части Баренцева моря и в дальнейшем поступает в Арктический бассейн Северного Ледовитого океана через желоб Святой Анны [Фролов и др., 2019; Иванов и др., 2020].

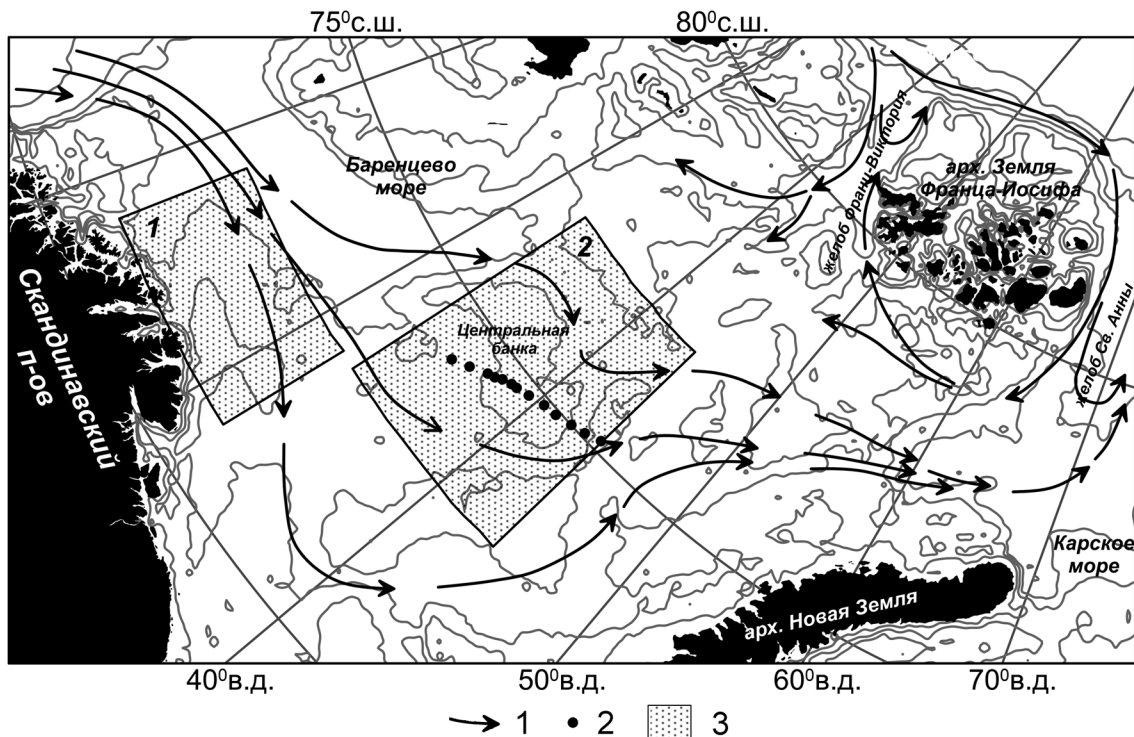


Рис. 4. Рельеф дна Баренцева моря: 1 – основные пути переноса Атлантических вод (АВ); 2 – положение вертикального разреза через Центральную банку (см. рис. 5); 3 – районы 1 и 2, для которых выполнялся анализ стерических колебаний уровня (см. следующий подраздел)

Fig. 4. Relief of the bottom of the Barents Sea: 1 – the main ways of transporting Atlantic waters (AB); 2 – the position of the vertical section through the Central Bank (see Fig. 5); 3 – regions 1 and 2, for which the analysis of steric level fluctuations was performed (see the next subsection)

Центральная банка является важным элементом донной топографии Баренцева моря, влияющим на его гидрологический режим через формирование холодных уплотненных вод в зимний сезон [Ivanov et al., 2004]. Эти воды стекают вдоль склонов бан-

ки в сопредельные глубоководные бассейны, что приводит к разделению изначально единого потока Нордкапского течения на две струи (рис. 4). Принципиально новым результатом, полученным в экспедиции «Трансарктика-2019» и подтвержден-

ным методами математического моделирования, является установление факта, что зимняя конвекция над Центральной банкой может быть чисто термической. То есть для формирования однородного «столба» уплотненной воды над банкой не обязательно требуется осолонение при ледообразовании, что предполагалось ранее в качестве необходимого условия [Quadfasel et al., 1992]. Этот тезис подтверждается тем, что в конце марта 2019 г. граница консолидированного однолетнего льда располагалась в 80–100 милях к северу от Центральной банки, тогда как появление дрейфующего льда над банкой датируется второй половиной апреля. На одномерной модели термохалинной конвекции была воспроизведена эволюция вертикальной термохалинной структуры в центре банки (точке с минимальной глубиной) [Ivanov et al., 2016]. Формирование однородного по плотности столба воды над центральной банкой датируется второй половиной января 2019 г. При этом температура воды не дости-

гает точки замерзания. Импорт льда в район банки в апреле 2019 г. привел к его таянию и образованию приповерхностного распресненного слоя, который остановил дальнейшее развитие конвекции. Иллюстрирует это утверждение распределение аномалии потенциальной плотности на разрезе через Центральную банку по данным наблюдений (рис. 5А) и реанализа МЕРКАТОР (рис. 5Б) в мае 2019 г. Таким образом, выявлена двойственная роль ледяного покрова над Центральной банкой. В случае холодных зим, наблюдавшихся во второй половине XX в., локальное ледообразование над банкой способствовало халинной конвекции и возбуждало каскадинг. В условиях современного сокращения ледяного покрова формирование однородного от поверхности до дна столба воды над банкой возможно в безледных условиях за счет термического уплотнения более теплой АВ, поступающей из Норвежского моря, тогда как импорт льда извне, наоборот, приводит к блокированию вертикальной конвекции.

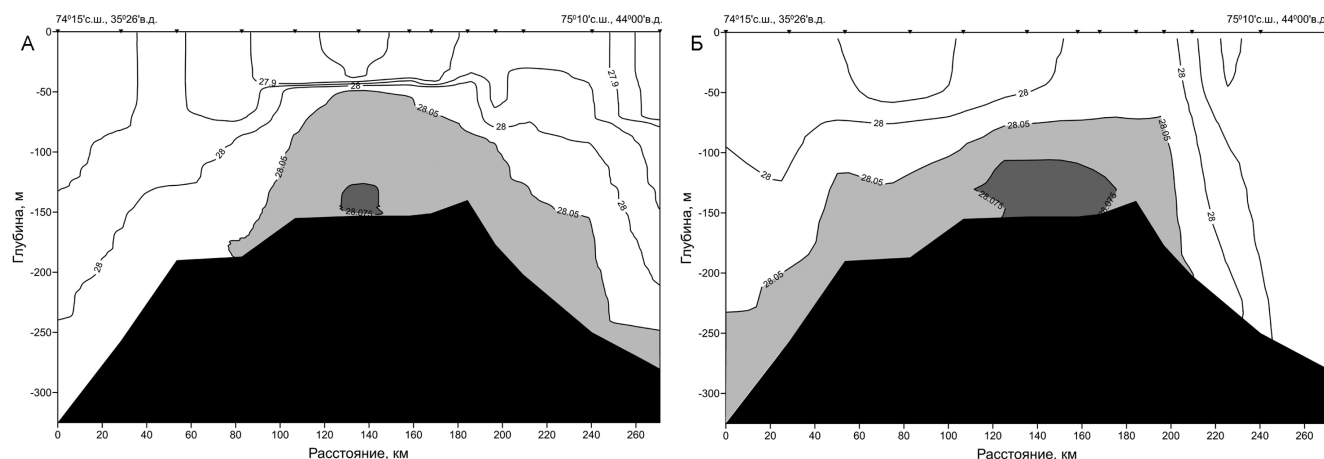


Рис. 5. Вертикальный разрез аномалии потенциальной плотности ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) через Центральную банку 15 мая 2019 г. по результатам CTD-измерений (А) и данным реанализа МЕРКАТОР (Б).

Положение разреза показано на рис. 4 черными кружками

Fig. 5. Vertical section of potential density anomaly ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) across the Central Bank on May, 15, 2019 on the basis of CTD-measurements (A) and MERKATOR reanalysis data (B). Location of the section is shown on Fig. 4 by black circles

**Стерические колебания уровня в условиях меняющейся термохалинной структуры вод.** В результате выполненных расчетов были выявлены особенности многолетних стерических колебаний уровня. В районе 1 в исследуемый период времени в августе суммарный стерический уровень моря повышался со скоростью около 0,3 мм/год (рис. 6А). Однако повышение было неоднородно по времени. Весь период исследования можно разделить по скорости изменения стерического уровня на два временных этапа: первый – с 1955 по 1997 г., второй – с 1997 по 2018 г. На первом этапе уровень понижался со скоростью 0,4 мм/год, на втором – повышался со скоростью 0,5 мм/год. Следует отметить, что смена

знака изменения уровня совпала с известным климатическим режимным сдвигом 1977–1978 гг. В последние двадцать лет скорость повышения стерического уровня возросла до 0,12 мм/год. При этом скорость подъема уровня в период с 1955 по 2018 г. в некоторые десятилетия была даже больше. Например, с 1995 по 2005 г. она достигала 0,28 мм/год. На фоне глобального повышения уровня отмечаются колебания с периодами 8–10 лет, что подтвердил спектральный анализ. В многолетних изменениях стерического уровня в районе 1 в феврале не выделяются этапы, обнаруженные в августе: на всем временном интервале с 1955 по 2018 г. стерический уровень повышался со средней скоростью



0,5 мм/год (рис. 6Б). Однако тенденция ускорения повышения стерического уровня с 1977 г. по настоящее время сохраняется – скорость подъема уровня в феврале на отрезке с 1977 по 2018 г. увеличивалась до 0,9 мм/год. В районе 2 средняя скорость повышения уровня такая же, как и в районе 1. Однако здесь влияние климатического режимного сдвига не выражено. Обобщенная оценка вклада температуры и солености в повышение стерического уровня в Баренцевом море показала, что оно обусловлено термической составляющей, тогда как соленостная имеет обратную тенденцию.

### ВЫВОДЫ

Значимость полученных в рамках проекта результатов определяется необходимостью непрерывного мониторинга состояния среды Арктики в условиях быстрых климатических изменений,

характеризующихся высокой степенью неопределенности. В настоящее время надежно установлено, что изменения климата в Арктике происходят значительно быстрее, чем в среднем по планете, вследствие так называемого эффекта «арктического усиления». Согласно оценкам Международной группы экспертов по изменению климата [Climate..., 2013], в зависимости от сценария эмиссии парниковых газов в атмосферу средняя приземная температура воздуха в арктическом регионе в 2081–2100 гг. возрастет на 4–8°C по сравнению с наблюдавшейся в 1986–2005 гг. Комплексный анализ современного состояния гидрометеорологических условий в Баренцевом море позволяет оценить генеральные направления происходящих изменений, которые в дальнейшем могут распространиться на лежащие восточнее окраинные моря СЛО.

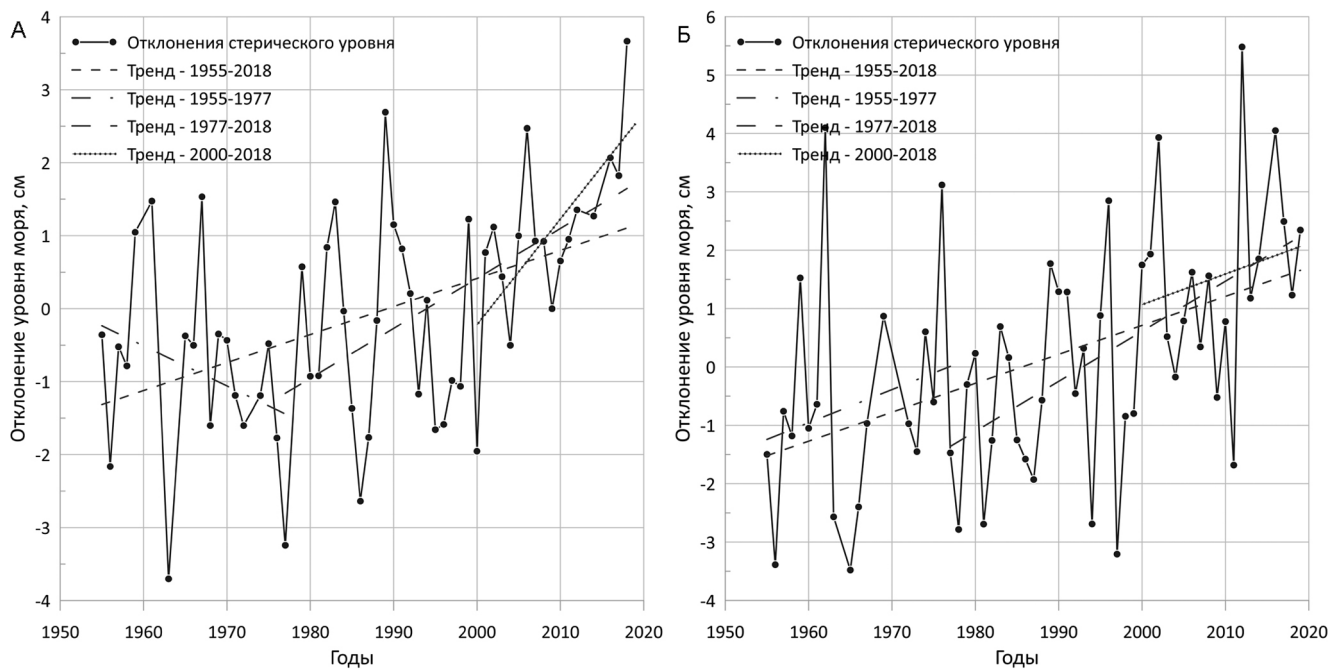


Рис. 6. Стерические колебания уровня в районе 1 в августе (А) и в феврале (Б).

Линии без точек – линейные тренды на разных временных отрезках (географическое положение районов представлено на рис. 4)

Fig. 6. Steric sea level oscillations in the region 1 in August (A), and in February (B).

Lines without symbols show linear trends over various time intervals (geographic location of regions is shown on Fig. 4)

Сокращение ледяного покрова в первую очередь влияет на интенсивность потоков тепла и влаги между океаном и атмосферой. В результате меняется режим формирования водных масс в направлении уменьшения роли ледяного покрова, возрастания роли горизонтальной адвекции и аккумуляции тепла в верхнем слое вод. Однако изменчивость потоков тепла модулируется комбинацией таких факторов, как атмосферная циркуляция и адвекция тепла в океане. Так как долгопериодные изменения в океане и атмосфере происходят не синхронно, пря-

мой связи между изменением потоков тепла и площадью морского льда не наблюдается. Вследствие уменьшения площади морского льда с 2007 г. наблюдается значительное увеличение потоков скрытого тепла, и, благодаря этому, суммарных потоков, тогда как потоки явного тепла уменьшаются. Частота холодных вторжений над Баренцевым морем, также влияющих на потоки тепла, определяется межгодовой изменчивостью повторяемости различных крупномасштабных мод циркуляции атмосферы и с площадью льда практически не связана.

Увеличение площади свободной ото льда поверхности должно приводить к усилению ветрового волнения. Однако, согласно выполненным расчетам, повторяемость количества штормов в Баренцевом море больше связана с повторяемостью циклонов и, соответственно, с изменчивостью крупномасштабных мод циркуляции атмосферы (индексы АІ или NAO). Поскольку генеральное направление распространения штормовых волн (более 6 м) в Баренцевом море – с запада на восток, увеличение длины разгона в меридиональном направлении не влияет на повторяемость штормов.

Фундаментальным выводом, полученным в рамках выполненного проекта, является заключение о возможности активизации обратных связей в системе «океан – лед – атмосфера» вследствие генераль-

ного отступления ледовой кромки в Баренцевом море в северо-восточном направлении. В атмосфере это ведет к возрастанию интенсивности энергообмена над свободной ото льда поверхностью, обеспечивающей усиление ветрового волнения и вертикального перемешивания, что в конечном итоге ведет к перестройке вертикальной структуры водных масс.

Вопрос об устойчивости выявленных трендов требует дополнительного изучения, поскольку в зависимости от преобладающего типа атмосферной циркуляции поступление теплых Атлантических вод в Баренцево море с соответствующим воздействием на морской лед и интенсификацией/блокированием обратных связей в системе может как возрастать, так и уменьшаться.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ-Арктика № 18-05-60083 и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипкин В.С., Добролюбов С.А. Океанология. Физические свойства морской воды: учеб. пособие. М.: МАКС Пресс, 2005. 216 с.
- Иванов В.В., Фролов И.Е., Фильчук К.В. Трансформация атлантической воды в северо-восточной части Баренцева моря в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66. № 3. С. 246–266. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266.
- Китайгородский С.А., Волков Ю.А. О параметре шероховатости морской поверхности и расчете турбулентных потоков количества движения в приводном слое атмосферы // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1965. № 1(9). С. 15–23.
- Мысленков С.А., Маркина М.Ю., Архипкин В.С., Тилинина Н.Д. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2019. № 2. С. 45–54.
- Фролов И.Е., Иванов В.В., Фильчук К.В., Макитас А.П., Кустов В.Ю., Махотина И.А., Иванов Б.В., Уразгильдеева А.В., Семин В.Л., Зимица О.Л., Крылов А.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Мальшев С.А., Гусев Е.А., Барышев П.Е., Пильгаев С.В., Ковалев С.М., Тюръяков А.Б. Трансарктика-2019: зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников» // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65. № 3. С. 255–274. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274.
- Applications of self-organizing maps, M. Johnsson (ed.), 2012, 289 p., DOI: 10.5772/3464.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Kobayashi P., Andrae S.U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.J., Park B.K., Peubey C., Rosnay de P., Tavolato C., Thépaut J.N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, p. 553–597.
- Drennan W.M., Graber H.C., Hauser D., Quentin C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, vol. 108, no. C3, p. 8062, DOI: 10.1029/2000JC000715.
- Guarino M., Sime L.C., Schröder D., Malmierca-Vallet I., Rosenblum E., Ringer M., Jeff Ridley J., Feltham D., Bitz C., Stei E.J., Wolff E., Stroeve J., Sellar A. Sea-ice-free Arctic during the Last Interglacial supports fast future loss, *Nat. Clim. Change*, 2020, vol. 10, p. 928–932, DOI: 10.1038/s41558-020-0865-2.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean Heat Impact on Regional Ice Decay: A Suggested Positive Feedback, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2016, vol. 46, p. 1437–1456, DOI: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.M., Golovin P.N. Cascades of dense water around the World Ocean, *Progress in Oceanography*, 2004, vol. 60, p. 47–98.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change (IPCC AR-5) 2013: The Physical Science Basis / Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker et al., 2013, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Seierstad I.A. Marine cold-air outbreaks in the North Atlantic: temporal distribution and associations with large-scale atmospheric circulation, *Clim. Dyn.*, 2009, vol. 33, p. 187–197, DOI: 10.1007/s00382-008-0431-5.
- 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, vol. 8, no 7, p. 634–639.

- Myslenkov S., Shestakova A., Chechin D.* The impact of sea waves on turbulent heat fluxes in the Barents Sea according to numerical modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, vol. 21, p. 5575–5595, DOI: 10.5194/acp-21-5575-2021.
- Oost W.A., Komen G.J., Jacobs C.M.J., Oort van C.* New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE, *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, no. 103(3), p. 409–438.
- Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Kwok K. R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean, *Science*, 2017, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Quadfasel D., Rudels B., Selchow S.* The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation, *ICES Marine Science Symposium*, 1992, vol. 195, p. 40–51.
- Schlichtholz P.* Subsurface Ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 13692.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.M.* Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling, *Atmosphere*, 2020, no. 11(7), p. 726.
- Taylor P.K., Yelland M.J.* The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2001, vol. 31, no. 2, p. 572–590.
- Электронные ресурсы*
- Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 203 p., URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf).
- Climate Data. Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr> (дата обращения 22.11.2019).
- Climate Prediction Center. National Weather Service. NOAA, URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teleodoc/teleindcalc.shtml> (дата обращения 22.11.2019).
- COARE-Met Flux Algorithm, URL: [https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux\\_algor/](https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/) (дата обращения 22.11.2019).
- ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды), реанализ ERA-Interim, URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (дата обращения 22.11.2019).
- Mercator Ocean International, URL: <https://www.mercator-ocean.fr/en/solutions-expertise/product-catalog/> (дата обращения 22.11.2019).
- World Ocean Database. NOAA, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (дата обращения 22.11.2019).

Поступила в редакцию 05.03.2021

После доработки 06.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

## CHANGES IN HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE BARENTS SEA AS AN INDICATOR OF CLIMATIC TRENDS IN THE EURASIAN ARCTIC IN THE 21<sup>ST</sup> CENTURY

V.V. Ivanov<sup>1</sup>, V.S. Arkhipkin<sup>2</sup>, Ye.M. Lemeshko<sup>3</sup>, S.A. Myslenkov<sup>4</sup>, A.V. Smirnov<sup>5</sup>, G.V. Surkova<sup>6</sup>, F.K. Tuzov<sup>7</sup>, D.G. Chechin<sup>8</sup>, A.A. Shestakova<sup>9</sup>

<sup>1,2,4,6,7</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

<sup>1,5</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, Ocean-Air Interaction Department

<sup>3</sup> Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute", Laboratory of Hydrophysical Subsatellite Research

<sup>4</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Laboratory of Experimental Ocean Physics; Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Department of Marine Hydrological Forecasts; oceanologist

<sup>7</sup> All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies EMERCOM of Russia (Federal Center for Science and High Technologies), Seventy-Second Research Department

<sup>8,9</sup> Federal State Budgetary Institution of Science "A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics" RAS, Laboratory of the Air-Ocean Interaction

<sup>1</sup> Oceanology Department, Leading Scientific Researcher; Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: [vladimir.ivanov@aari.ru](mailto:vladimir.ivanov@aari.ru)

<sup>2</sup> Oceanology Department, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: [victor.arkhipkin@gmail.com](mailto:victor.arkhipkin@gmail.com)

<sup>3</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: [evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru)

<sup>4</sup> Oceanology Department, Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Physics and Mathematics, e-mail: [stasoocean@gmail.com](mailto:stasoocean@gmail.com)

<sup>5</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: [alexander.vic.smirnov@gmail.com](mailto:alexander.vic.smirnov@gmail.com)

<sup>6</sup> Meteorology and Climatology Department, Associate Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: [galina\\_surkova@mail.ru](mailto:galina_surkova@mail.ru)

<sup>7</sup> Junior Scientific Researcher; Scientific Researcher; e-mail: [fedor-tuz@mail.ru](mailto:fedor-tuz@mail.ru)

<sup>8</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: chechin@ifaran.ru

<sup>9</sup> Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: shestakova.aa.92@gmail.com

It has now been reliably established that climate in the Arctic is changing much faster than the global average, due to the so-called “Arctic amplification” effect. The paper summarizes the results of the comprehensive analysis of the current state of hydrometeorological conditions in the Barents Sea. This made it possible to assess the general directions of the ongoing changes, which in the future may spread to the eastward marginal seas of the Arctic Ocean. Hydrometeorological conditions in the Barents Sea under significant reduction of the sea ice cover have been investigated on the basis of observational data, atmospheric and ocean reanalyses and satellite information. The fundamental conclusion obtained as a result of the analysis is possible activation of feedbacks in the “ocean-ice-atmosphere” system due to the general northeastward retreat of the ice edge in the Barents Sea. The reduction of ice cover primarily affects the nature of energy exchange between the ocean and the atmosphere. As a result, the regime of water masses formation changes towards a decreasing role of ice cover and increasing role of horizontal advection and heat accumulation in the upper water layer. However, the variability of heat fluxes is modulated by a combination of factors such as atmospheric circulation and heat advection in the ocean. Since long-term changes in the ocean and atmosphere are asynchronous, there is no direct relationship between changes in heat fluxes and the sea ice area. A significant increase in latent heat fluxes, and, consequently, total fluxes because of the sea ice area decrease since 2007 has been recorded while the sensible heat fluxes, on the contrary, have decreased. It is shown that the frequency of cold outbreaks over the Barents Sea, which also affect heat fluxes, is mainly determined by the interannual variability of the frequency of various large-scale atmospheric circulation modes and is not directly related to the ice area.

**Keywords:** Arctic Ocean, hydrometeorological conditions, climate change, ocean-atmosphere interaction, sea currents, waves, water masses, sea level

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Foundation of Basic Research (RF-BR-Arctic project no. 18-05-60083) and the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental changes”.

## REFERENCES

- Applications of self-organizing maps*, M. Johnsson (ed.), 2012, 289 p., DOI: 10.5772/3464.
- Arkhipkin V.S., Dobrolyubov S.A. *Okeanologiya. Fizicheskiye svoystva morskoy vody: Ucheb. Posobiye* [Physical properties of sea water: Textbook], Moscow, MAKS Press, 2005, 216 p. (In Russian)
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Kobayashi P., Andrae S.U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.J., Park B.K., Peubey C., Rosnay de P., Tavolato C., Thépaut J.N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, p. 553–597.
- Drennan W.M., Graber H.C., Hauser D., Quentin C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas, *J. of Geophysical Research: Oceans*, 2003, vol. 108, no. C3, p. 8062, DOI: 10.1029/2000JC000715.
- Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”, *Arctic and Antarctic Research*, 2019, vol. 65, no. 3, p. 255–274, DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274.
- Guarino M., Sime L.C., Schröder D., Malmierca-Vallet I., Rosenblum E., Ringer M., Jeff Ridley J., Feltham D., Bitz C., Stei E.J., Wolff E., Stroeve J., Sellar A. Sea-ice-free Arctic during the Last Interglacial supports fast future loss, *Nat. Clim. Change*, 2020, vol. 10, p. 928–932, DOI: 10.1038/s41558-020-0865-2.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change (IPCC AR-5) 2013: The Physical Science Basis / Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T. F. Stocker et al., 2013. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean Heat Impact on Regional Ice Decay: A Suggested Positive Feedback, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2016, vol. 46, p. 1437–1456, DOI: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
- Ivanov V.V., Frolov I.E., Filchuk K.V. Transformation of Atlantic water in the north-eastern Barents Sea in winter, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2020, vol. 66, no. 3, p. 246–266, DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.M., Golovin P.N. Cascades of dense water around the World Ocean, *Progress in Oceanography*, 2004, vol. 60, p. 47–98.
- Kitaygorodskiy S.A., Volkov Yu.A. O parametre sherokhovatosti morskoy poverkhnosti i raschete turbulentnykh potokov kolichestva dvizheniya v privodnom sloye atmosfery [About the parameter of roughness of the sea surface and the calculation of turbulent fluxes of momentum in

- the drive layer of the atmosphere], *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1965, no. 1(9), p. 15–23. (In Russian)
- Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Seierstad I.A. Marine cold-air outbreaks in the North Atlantic: temporal distribution and associations with large-scale atmospheric circulation, *Clim. Dyn.*, 2009, vol. 33, p. 187–197, DOI: 10.1007/s00382-008-0431-5.
- 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, vol. 8, no. 7, p. 634–639.
- Myslenkov S., Shestakova A., Chechin D. The impact of sea waves on turbulent heat fluxes in the Barents Sea according to numerical modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, vol. 21, p. 5575–5595, DOI: 10.5194/acp-21-5575-2021.
- Myslenkov S.A., Markina M.Yu., Arkhipkin V.S., Tilina N.D. Povtoryayemost' shtormovogo volneniya v Barentsevom more v usloviyakh sovremennogo klimata [Frequency of storms in the Barents Sea under modern climate conditions], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 2, p. 45–54. (In Russian)
- Oost W.A., Komen G.J., Jacobs C.M.J., Oort van C. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE, *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, no. 103(3), p. 409–438.
- Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Kwok K. R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean, *Science*, 2017, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Quadfasel D., Rudels B., Selchow S. The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation, *ICES Marine Science Symposium*, 1992, vol. 195, p. 40–51.
- Schlichtholz P. Subsurface Ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 13692.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.M. Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling, *Atmosphere*, 2020, no. 11(7), p. 726.
- Taylor P.K., Yelland M.J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2001, vol. 31, no. 2, p. 572–590.

#### Web sources

- Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 203 p., URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf).
- Climate Data. Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr> (access date 22.11.2019).
- Climate Prediction Center. National Weather Service. NOAA, URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/teleindcalc.shtml> (access date 22.11.2019).
- COARE-Met Flux Algorithm, URL: [https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux\\_algor/](https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/) (access date 22.11.2019).
- ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды), реанализ ERA-Interim, URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (access date 22.11.2019).
- Mercator Ocean International, URL: <https://www.mercator-ocean.fr/en/solutions-expertise/product-catalog/> (access date 22.11.2019).
- World Ocean Database. NOAA, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (access date 22.11.2019).

Received 05.03.2021

Revised 06.06.2021

Accepted 20.07.2021