

Научная статья
УДК 614.841.42
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.61.60.025

Потепление термического режима Гренландии и повышение пожароопасности по условиям погоды в лесной и арктической зоне европейской территории России

*Александр Вадимович Холопцев
Роман Геннадьевич Шубкин
Александр Сергеевич Симоненко*

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Симоненко, simonfps@yandex.ru

Аннотация. Одними из причин повышения пожароопасности по условиям погоды на любом участке Европейской территории России, относящемся к ее Лесной или Арктической зоне, являются вариации соответствующих ему среднемесячных температур приземного воздуха, а также месячных сумм атмосферных осадков. К числу факторов, вызывающих эти вариации, относятся изменения состояния Атлантической Меридиональной Опрокидывающей циркуляции, в которых, начиная с середины XIX века преобладает тенденция к ее ослаблению. Последняя обусловлена потеплением климата Гренландии, следствием которого является увеличение объемов холодной пресной воды, поступающей в Северную Атлантику при таянии ледяного покрова этого острова. Поэтому выдвинута гипотеза о существовании на Европейской территории России участков, для которых связи упомянутых факторов пожароопасности, с изменениями средних температур воздуха над всей поверхностью Гренландии для летнего сезона, за период современного потепления ее климата усиливались, а в современном периоде они являются значимыми. Ее проверка показала, что для месяцев с марта по июнь на территориях некоторых регионов Европейской части России, относящихся к Лесной и Арктической зоне, такие участки существуют. Полученные результаты позволяют предположить, что при дальнейшем потеплении термического режима Гренландии, повышение пожароопасности по условиям погоды в некоторые весенне-летние месяцы на севере Европейской территории России продолжится. Указанный прогноз в будущем может осуществиться в период, в течение которого на территории Гренландии будет сохраняться ледяной покров, а также при условии, что современная «мягкая» стадия ослабления рассматриваемой циркуляции не перейдет в «катастрофическую». Поскольку сохранение современного сценария развития рассматриваемых процессов в ближайшие десятилетия весьма вероятно, предложенный прогноз целесообразно учитывать при планировании дальнейшего развития Государственной противопожарной службы МЧС России.

Ключевые слова: территория Европы, Гренландия, Атлантическая Меридиональная Опрокидывающая циркуляция, потепление термического режима, пожароопасность по условиям погоды

Для цитирования: Холопцев А.В., Шубкин Р.Г., Симоненко А.С. Потепление термического режима Гренландии и повышение пожароопасности по условиям погоды в лесной и арктической зоне европейской территории России // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 291-313.
<https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.61.60.025>. Original article.

Warming of the thermal regime in Greenland and increased fire danger due to weather conditions in the forest and Arctic zones of European Russia

Alexander V. Kholoptsev

Roman G. Shubkin

Alexander S. Simonenko

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Alexander S. Simonenko, simonfps@yandex.ru

Abstract. Some of the reasons for the increased fire hazard due to weather conditions in any area of European Russia belonging to its Forest or Arctic zone are variations in the corresponding average monthly surface air temperatures, as well as monthly precipitation amounts. The factors causing these variations include changes in the state of the Atlantic Meridional Overturning Circulation, which has tended to weaken since the mid-19th century. The latter is caused by the warming of Greenland's climate, which results in an increase in the volume of cold fresh water entering the North Atlantic as the island's ice sheet melts. Her verification showed that such areas exist for the months from March to June in the territories of some regions of the European part of Russia, which belong to the Forest and Arctic zones. The obtained results allow us to assume that with further warming of the thermal regime in Greenland, the increase in fire danger due to weather conditions in some spring-summer months in the north of the European territory of Russia will continue. This forecast may come true in the future during the period during which the ice cover will remain on the territory of Greenland, and also on the condition that the current “soft” stage of weakening of the circulation in question does not turn into a “catastrophic” one. Since it is highly probable that the current scenario for the development of the processes under consideration will continue in the coming decades, it is advisable to take the proposed forecast into account when planning the further development of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

Keywords: European territory, Greenland, Atlantic Meridional Overturning Circulation, warming of thermal regime, fire hazard depending on weather conditions

For citation: Kholoptsev A.V., Shubkin R.G., Simonenko A.S. Warming of the thermal regime in Greenland and increased fire hazard due to weather conditions in the forest and Arctic zones of European Russia // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 291-313. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.61.60.025>.

Введение

Межгодовые изменения среднемесячных температур приземного воздуха над тем или иным регионом мира, а также месячных сумм выпадающих в нем атмосферных осадков, (далее СТВ и МСО), которые соответствуют месяцам пожароопасного сезона, являются одними из основных факторов пожароопасности по условиям погоды и горимости лесов на его территории [1-3]. Указанные факторы существенно влияют также на изменения безопасности жизнедеятельности его населения, устойчивости развития экономики, а также рисков, обусловленных возникновением некоторых опасных природных явлений. Поэтому совершенствование методик долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования рассматриваемых процессов является актуальной проблемой не только метеорологии и климатологии, но также безопасности при чрезвычайных ситуациях.

Наибольший интерес решение рассматриваемой проблемы представляет для регионов, на территориях которых общее количество возникающих за год ландшафтных пожаров (далее КЛП) в последние годы возросло с максимальной скоростью.

В России к их числу относятся многие регионы ее Европейской территории (далее ЕТР), относящиеся к Лесной и Арктической зоне.

Как пример, на Рис.1 представлены зависимости от времени КЛП для всей территории России, для ее Европейской и Азиатской частей, для территорий Федеральных округов: Центрального (ЦФО), Северо-Западного (СЗФО), Приволжского (ПФО), относящихся к упомянутым зонам ЕТР, а также для некоторых их регионов (которые построены по данным [4]).

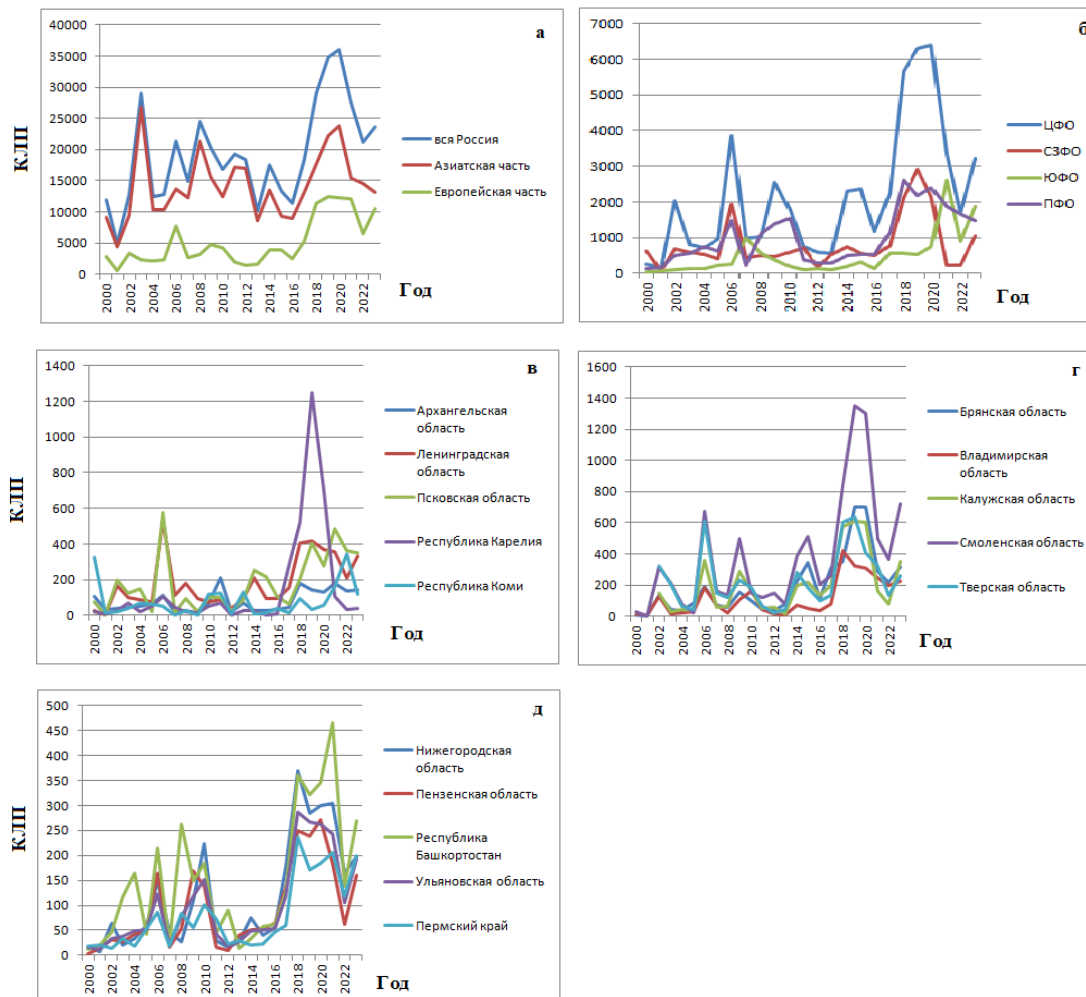


Рис.1. Изменения в XXI веке КЛП на следующих частях территории России:

- а) вся Россия, а также Азиатская и Европейская части ее территории; б) Федеральные округа ЕТР; в) регионы СЗФО; г) регионы ЦФО; д) регионы ПФО

Из Рис.1а видно, что в период 2000-2023 гг. как на всей территории России, так и на ее Азиатской и Европейской части, изменения КЛП представляли собой сложные колебания, которые с течением временем усиливались. Средние значения КЛП за 2018-2023 гг. превысили аналогичный показатель за 2000-2017 гг. для всей территории России в 1,78, для ее Азиатской части – в 1,37, а для ЕТР в 3,44 раза.

Причинами колебательного характера изменений рассматриваемого показателя могли являться не только цикличность изменений интенсивности действия на соответствующих территориях антропогенных факторов и накопления на них горючего материала [5]. Значимое влияние на них могли оказывать и соответствующие вариации пожароопасности по условиям погоды (в том числе СТВ, а также МСО [6; 7]).

Рис.1б показывает, что такой же характер в 2000-2024 гг. носили изменения КЛП и на территориях рассматриваемых Федеральных округов ЕТР.

Как видим из Рис.1б, увеличение среднего значения КЛП на ЕТР для 2018-2023 гг., по сравнению с 2000-2017 гг., произошло в основном за счет увеличения горимости лесов на

территориях регионов ЦФО. Это подтверждает увеличение среднего за указанные годы значения КЛП для ЦФО, которое составило 3,2 раза.

Пик КЛП для ЦФО соответствовал 2020 году. К 2023 году значение этого показателя снизилось, тем не менее, оно превышало уровни, соответствующие СЗФО и ПФО, также относящихся к Арктической и Лесной зоне. Следует отметить, что значения рассматриваемого показателя в 2018-2023 гг. также возросли для ЮФО.

Из Рис.1в следует, что среди различных регионов России, относящихся к СЗФО, наиболее существенное увеличение среднего значения КЛП за те же годы, по сравнению с указанным периодом, выявлено для республики Карелия (в 9,44 раза), что больше, чем для любого другого региона России. Существенно повысились значения рассматриваемого показателя для Ленинградской, Псковской и Архангельской области, а также республики Коми.

Как видим из Рис.1г, наибольшее увеличение среднего КЛП за рассматриваемые годы выявлено на территории такого региона ЦФО, как Смоленская область (в 6,34 раза). Существенно возросли значения этого показателя также для Брянской, Владимирской, Калужской и Тверской области.

Рис.1д свидетельствует о том, что средние значения КЛП за 2018-2023 гг. по отношению к аналогичному показателю за 2000-2017 гг. наиболее существенно возросли для такого региона ПФО, как республика Башкортостан (в 4,12 раз).

Из Рис.1 понятно, что увеличение значений КЛП в 2018-2023 гг. являлось наиболее существенным для ЕТР. Произошло это в основном за счет активизации рассматриваемого процесса в регионах ЕТР, относящихся к Лесной и Арктической зоне. Увеличение горимости лесов на их территориях имело место, несмотря на то, что соответствующие противопожарные подразделения всеми имеющимися силами и средствами боролись с возникающими пожарами, а МЧС России делало все возможное для их поддержки и ускоренного развития.

Рассматриваемое явление было обусловлено действием как антропогенных, так и природных факторов, к которым могло относиться и увеличение пожароопасности на них по условиям погоды, вызванное повышением СТВ, либо снижением МСО [3; 8].

Согласно существующим представлениям о причинах изменений рассматриваемых характеристик [9-11], к числу важнейших принято относить вариации характеристик атмосферной циркуляции над всем Европейским макрорегионом, а также тепло и влагосодержания, приходящего в него воздуха, которые зависят от динамики состояния Атлантической Меридиональной Опрокидывающей циркуляции (Atlantic meridional overturning circulation, далее АМОЦ) [6; 12]. Последняя является важнейшим компонентом Глобального теплового океанического конвейера [13; 14], обеспечивающим обмен теплом и солью между тропической и субарктической зонами Северной Атлантики.

Поверхностным звеном АМОЦ, доставляющим теплую и соленую воду в высокоширотные регионы Северной Атлантики, являются Гольфстрим, Североатлантическое течение и течение Ирмингера, а его глубинным звеном служит течение, уносящее из этих регионов на юг холодную и плотную воду, образующуюся при глубокой конвекции, которая развивается в результате охлаждения их приповерхностных слоев.

Важную роль в рассматриваемых изменениях играет также уменьшение в месяцы пожароопасного сезона суммарной продолжительности периодов нахождения над изучаемыми территориями циклонов, приносящих на ЕТР облачность и атмосферные осадки.

Циклоны, проходящие над регионами ЕТР, относящимися к Лесной и Арктической зоне, в основном формируются над Северной Атлантикой [9; 10], а расположения их треков определяются состоянием Североатлантического колебания (далее САК) [15; 16].

В положительной фазе САК треки таких циклонов смещены к северу. В месяцы пожароопасного сезона это приводит к снижению СТВ и увеличению МСО на севере ЕТР, что вызывает на территориях Лесной и Арктической зоны снижение пожароопасности по условиям погоды.

В зимние месяцы, при положительных фазах САК, в Крыму, и на Кубани интенсивность атмосферных осадков увеличивается, так как к северу смещаются треки Средиземноморских циклонов, приносящих на эти территории основную часть выпадающих на них атмосферных осадков. При этом в горах Кавказа и на его Черноморском побережье осадки зимой выпадают реже.

В отрицательной фазе САК Атлантические и Средиземноморские циклоны смещаются к югу. В результате этого в месяцы с апреля по октябрь пожароопасность по условиям погоды повышается на территориях Арктической и Лесной зон России. Зимой на юге России осадков выпадает меньше, а на Кавказе больше, в результате чего повышается лавиноопасность в горах, а также активизируются оползни на его Черноморском побережье.

Одной из причин изменений состояния САК являются вариации поверхностных температур в районах Северной Атлантики, над которыми формируется Исландский минимум [17]. Упомянутые вариации обусловлены изменениями средних температур вод, приносимых в эти районы соответствующими струями Североатлантического течения [18].

Чем больше тепла отдают атмосфере воды, доставляемые поверхностным звеном АМОЦ, тем ниже давление в Исландском минимуме и существенней смещение к северу треков атлантических циклонов над Европой, тем больше тепло и влагосодержание воздушных масс, поступающих с запада на ЕТР.

Поэтому изменения состояния АМОЦ и САК – существенный фактор метеоусловий и пожароопасности по условиям погоды во многих регионах Европы, а также ЕТР [12; 19-21].

В период с середины XIX века и до наших дней в изменениях состояния АМОЦ преобладает тенденция к его ослаблению, вызванная потеплением глобального и регионального климата [6; 12].

Ослабление АМОЦ приводило к снижению средней температуры приповерхностного слоя вод на большей части Северной Атлантики, Норвежского моря и к увеличению этого показателя для многих районов Гренландского моря, а также районов Баренцева моря, находящихся к северу от Шпицбергена. Оно оказывало наибольшее влияние на динамику поверхностной температуры воды в центральной части моря Ирмингера, где амплитуда колебаний этого показателя в XXI веке достигала 1.5–2°C. [22].

Так как АМОЦ – океаническое течение, к его основным количественным характеристикам относятся расход и теплосодержание переносимых им вод. Упомянутые характеристики вычисляются за год, основываясь на результатах мониторинга изменчивости скоростей движения вод, переносимых АМОЦ и их температур.

Вопрос о том, где именно необходимо измерять эти характеристики, ныне является дискуссионным.

По мнению [23], интенсивность АМОЦ определяется изменчивостью интенсивности глубокой конвекции в Гренландском море, тогда как авторы [24-26] считают, что основную роль здесь играет аналогичный процесс в море Ирмингера.

В [25; 27; 28] высказывается предположение о том, что в изменчивости АМОЦ существенную роль играет глубокая конвекция в море Лабрадор, однако в [29; 30] утверждается, что этот процесс на АМОЦ практически не влияет.

Для оценки интенсивности АМОЦ таким способом, осуществляется мониторинг характеристик течений в районах Северной Атлантики, находящихся на 50–60° с.ш., а его результаты образуют массив OSNAP.

OSNAP — это международная программа, предназначенная для непрерывной регистрации трансбассейновых потоков тепла, массы и пресной воды в толще воды в субполярной части Северной Атлантики. Система наблюдений OSNAP состоит из двух участков: один простирается от южного Лабрадора до юго-западной оконечности Гренландии через устье Лабрадорского моря (OSNAP West), а второй — от юго-восточной оконечности Гренландии до Шотландии (OSNAP East). Наблюдения осуществляются с использованием

подводных буев (поплавков OSNAP), что позволяет отслеживать пути переноса вод в бассейне и оценивать характеристики течений, пересекающих линию OSNAP.

Иной способ оценки интенсивности АМОЦ применяется в [20; 31]. Учитывается, что главной причиной изменений теплосодержания вод, уносимых из тропической зоны Атлантики на север, являются вариации расхода соответствующего течения. Поэтому интенсивность АМОЦ определяется как интегральный расход течений, переносящих в верхнем 1000м слое воду из Тропической зоны Атлантики на север.

Значения расходов таких течений измеряются для зонального сечения, соответствующего участку параллели 26,5° с.ш. Интенсивность АМОЦ вычисляется в среднем за год, по результатам упомянутого мониторинга, который выполняется ежедневно, в период, начиная с 2004 года. Полученные оценки интегрального расхода АМОЦ образуют массив RAPID и представлены в [<https://www.rapid.ac.uk/rapidmoc/overview.php>].

При оценке состояний АМОЦ для более ранних периодов времени применяются различные реконструкции этого процесса, одна из которых описана в [19].

Как пример, на Рис.2 представлены изменения аномалии АМОЦ, относительно периода 1981-2010 гг., происходившие в период с 400 г. по 2024 г., которые построены по реконструкциям, выполненным Caesar et al. (2018) [19]. На нем показаны также результаты реконструкции изучаемого процесса, полученные Thornalley et al.(2018), Rahmstof et al.(2015), Sherwood et al. (2011), Smeed at al. (2018), Thibodeau et al.(2018), Zanna et al. (2019).

Из рис.2 видно, что за период от 400 до 2000 г. н.э. значения АМОС превышали уровень, соответствующий периоду 1981-2010 гг., в результате чего доставляемое ею тепло согревало северные регионы Европы. В XX и XXI веке происходит ослабление АМОС.

По мнению [6; 19], непосредственно после завершения Вюрмского оледенения, АМОС на некоторое время приостанавливалось. В это время возникло событие Хайнриха, которое привело к волне похолодания в средних и высоких широтах Северного полушария продолжительностью около 1000 лет (т.н. «Поздний Дриас»).

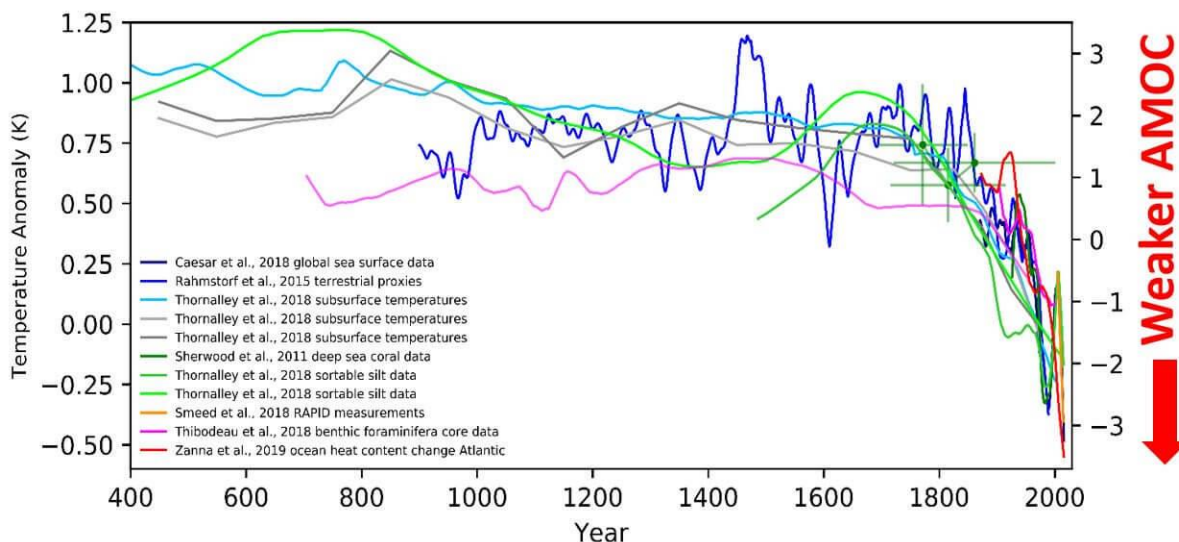


Рис.2. Изменения состояния АМОС в период 400-2019 гг., по данным различных авторов, отображенные согласно [33]

Упомянутое событие было вызвано снижением солёности поверхностных вод Северной Атлантике в результате поступления в них значительного количества пресных вод, образовавшихся при таянии Лаврентийского ледникового щита [32]. Оно привело к тому, что плотность вод, приносимых в район Большой Ньюфаундлендской банки Лабрадорским течением, стала меньше, чем плотность вод, приносимых в него Гольфстримом. В результате этого поверхностные температуры вод, переносимых Североатлантическим течением,

существенно снизились, что вызвало упомянутую волну похолодания в Европе, а также во всем Северном полушарии.

Опреснение поверхностных вод Северной Атлантики происходит и в современном периоде. Оно вызвано потеплением термического режима Гренландии, которое приводит к увеличению объема талых вод, образующихся в летние месяцы при таянии ее ледяного покрова.

Это явление приводит к ослаблению АМОЦ и может оказывать некоторое влияние на межгодовые изменения СТВ и МСО на ЕТР [6].

По мнению многих авторов [34-36] рассматриваемый процесс может привести не только к ослаблению АМОЦ, но также к резкому, нелинейному коллапсу этого течения, который возникнет после наступления "переломного момента" (tipping point).

Упомянутое явление может вызвать катастрофические последствия на территории Европы. Одним из них может стать существенное похолодание на ЕТР.

Как видно из Рис.2, процесс ослабления АМОЦ начался еще в XIX веке, а в XX и в особенности в XXI веке он существенно активизировался. Ныне ослабление АМОЦ продолжается, что может способствовать дальнейшему повышению пожароопасности по условиям погоды в некоторых регионах ЕТР. Следовательно, он мог явиться одной из причин увеличения КЛП на территориях некоторых регионов ЕТР, которое показано на Рис.1в-д.

Изложенные факты позволяют выдвинуть гипотезу:

- на территориях регионов ЕТР, относящихся к ее Лесной и Арктической зоне, существуют участки, для которых межгодовые изменения СТВ и МСО для какого-либо месяца пожароопасного сезона, значимо связаны с вариациями СТВ над Гренландией, опережающими их на единицы месяцев; при этом связи между указанными процессами за период современного потепления климата Гренландии усилились.

Выдвинутая гипотеза тривиальной не является, так как связи между изучаемыми процессами могут не являться значимыми, а вопрос о наличии их существенного усиления за период современного потепления климата Гренландии, ранее не изучался.

Подтверждение справедливости выдвинутой гипотезы позволило бы учесть выявленные связи между рассматриваемыми процессами, которые обладают указанными свойствами, при разработке долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов пожароопасности по условиям погоды на территориях соответствующих регионов России, для сценария, при котором потепление термического режима Гренландии продолжится [8; 37].

Так как подобные прогнозы необходимы при планировании деятельности, а также развития региональных подразделений ГПС МЧС России, проверка выдвинутой гипотезы представляет существенный теоретический и практический интерес.

Целью данной работы является осуществление такой проверки и выявление участков ЕТР, для которых статистические связи между рассматриваемыми процессами обладали требуемыми свойствами.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- выявление участков ЕТР, для которых связи межгодовых изменений средней за летний сезон СТВ над территорией Гренландии, с вариациями СТВ и МСО для этих участков и для какого-либо месяца пожароопасного сезона, запаздывающими по отношению к ним на единицы месяцев, являются значимыми;
- оценка тенденций изменчивости силы связи между изучаемыми процессами для выявленных участков ЕТР за период современного потепления климата Гренландии;
- разработка качественных прогнозов изменений пожароопасности по условиям погоды на территориях Арктической и Лесной зон России для сценария, при котором потепление термического режима Гренландии для летних месяцев в будущем продолжится, а ее ледяной покров сохранится.

Фактический материал и методика исследования

При решении первой и второй задачи, как фактический материал использована информация реанализа ERA 5 [38; 39], описывающая изменения среднечасовых температур воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью и часовых сумм атмосферных осадков, для всех пунктов нашей планеты, соответствующих узлам координатной сетки Меркатора, с шагом $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, а также каждому часу в период с 00 часов 1.01.1940 г по 31.12.2024 г.

С применением указанных сведений, для каждого пункта, относящегося к области земной поверхности, ограниченной меридианами 0° в.д. и 60° в.д., а также параллелями 40° с.ш. и 80° с.ш., включающей всю ЕТР и территории многих стран Европы, для каждого месяца пожароопасного сезона 1950-2024 гг. вычислены значения СТВ и МСО. Из этих значений сформированы изучаемые временные ряды.

Также, с использованием информации о среднечасовых значениях температур воздуха на высоте 2 м над всеми пунктами территории Гренландии, соответствующими узлам той же координатной сетки, сформированы временные ряды усредненных по всей поверхности этого острова значений СТВ, (далее СТВ_Г), для летних сезонов 1951-2024 гг.

Полученная таким образом зависимость от времени СТВ_Г, для летних сезонов, которые вычислены по информации реанализа ERA 5, представлена на Рис.3.

Из Рис.3 следует, что устойчивая тенденция к увеличению СТВ_Г, для летних сезонов отмечается в период 1979-2024 гг. Поэтому именно этот период далее рассматривался как период современного потепления климата Гренландии.

Как характеристика силы связи между отрезками изучаемых временных рядов рассматривалось значение коэффициента их парной корреляции (далее – К).

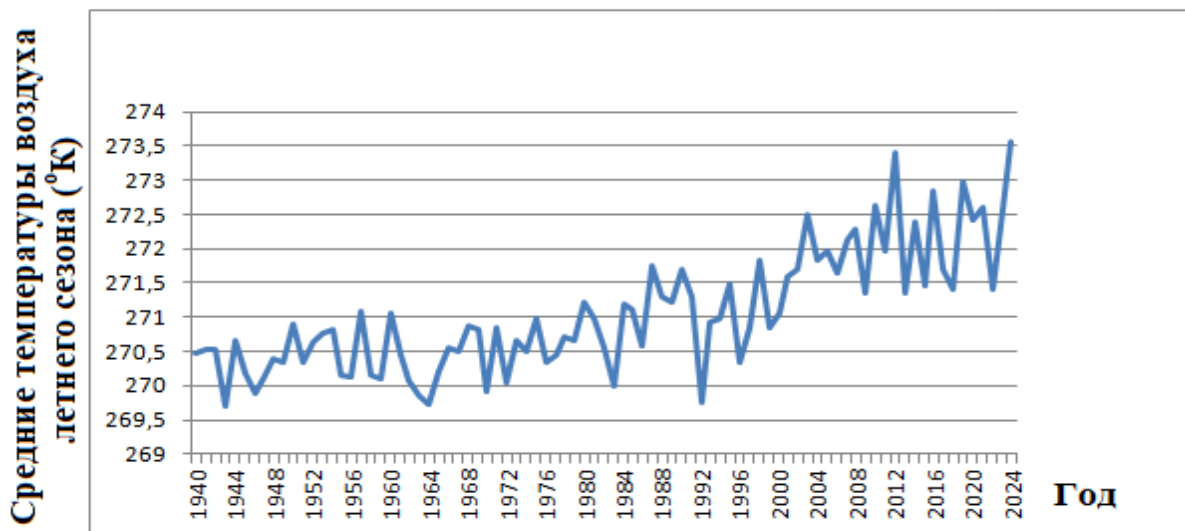


Рис.3. Изменения СТВ_Г, для летних сезонов 1951-2024 гг., которые вычислены по информации реанализа ERA 5 [39]

Как это было оценено (How was it assessed)?

Решение о значимости выявленной связи принималось, если достоверность такого статистического вывода превышала 0,9. Поэтому при решении первой задачи применен метод корреляционного анализа и критерию Стьюдента.

Изучались связи между отрезками временных рядов СТВ_Г для летних сезонов 2009-2023 гг., а также запаздывающими по отношению к ним отрезками изучаемых временных рядов СТВ и МСО для месяцев с марта по август. Во всех сопоставляемых отрезках скомпенсирован линейный тренд. По автокорреляционным функциям сопоставляемых отрезков временных рядов установлено, что соответствующие им количества степеней свободы равны 15. Поэтому решение о значимости изучаемых связей принималось если значение модуля К превышало 0,4.

Достоверности такого же вывода, не ниже 0,95, соответствует пороговый уровень 0,52, а его достоверности 0,99 – уровень 0,62.

Какая методология была использована для решения второй проблемы (what methodology was used to solve the second problem)?

При решении второй задачи применялась методика, предполагающая вычисление значений K , соответствующих аналогичным по продолжительности отрезкам временных рядов СТВ и МСО для пунктов Европы и СТВ_Г, которые начинались в другие годы изучаемого периода. Такие вычисления производились для каждого рассматриваемого пункта земной поверхности Европейского региона и каждого месяца с марта по август.

Из установленных таким образом значений K , были сформированы временные ряды длиной 32 члена, соответствующих тому или иному году начала отрезка ряда СТВ, либо МСО, использованного при его вычислении.

Для каждого временного ряда K определено значение углового коэффициента его линейного тренда (далее УКЛТ).

Принято допущение, согласно которому, отклонения членов каждого ряда K от соответствующего линейного тренда – случайные числа с гауссовым законом распределения вероятностей.

Справедливость этого допущения подтверждалась с применением критерия Пирсона.

Решение о значимости УКЛТ, с достоверностью не ниже 0,95, принималось если:

$$15 \times \text{ABS}(\text{УКЛТ}) > 1,65 \times \text{СКО},$$

где, ABS – оператор вычисления абсолютной величины своего аргумента;

СКО – среднеквадратическое отклонение членов изучаемого ряда от соответствующего линейного тренда.

Из допущения о нормальности закона распределения вероятностей отклонений K следует, что достоверность такого вывода составляет не менее 0,95.

Если $K \times \text{УКЛТ} > 0$, принималось решение об усилении связи между рассматриваемыми процессами. В противном случае делался вывод об ослаблении этой связи.

Сценарий развития изучаемого процесса и его факторов признавался близким к консервативному [37; 40], если знаки УКЛТ, которые вычислены для отрезков временных рядов K , включающих их члены с номерами 1-16 и 17-32 (т. соответствующие 1979-1994 гг. и 1995-2024 гг.) совпадали.

При решении третьей задачи анализировались современные представления о влиянии потепления климата Гренландии на ослабление АМОЦ. Предполагалось также, что тенденции изменений K , выявленные по предысториям изучаемых процессов, в дальнейшем не изменятся.

Учитывалось, что при потеплении климата Гренландии, объем талых вод, поступающих с ее ледников в Северную Атлантику, увеличивается, а плотность приповерхностного слоя вод, доставляемых Лабрадорским течением в район Большой Ньюфаундлендской банки, снижается, приближаясь к плотности аналогичного слоя вод Гольфстрима [41; 42].

Так как объем талых вод, образующихся на ледниковых покровах Гренландии, летом, значительно больше, чем в другие сезоны, соленость и плотность Лабрадорских вод, поступающих в район Большой Ньюфаундлендской банки, минимальны осенью, а уже в зимние месяцы эти показатели существенно повышаются [43; 44].

В любое время года в указанном районе Атлантики существуют слои, в которых плотность вод Гольфстрима равна плотности поверхностных вод Лабрадорского течения [19]. В таких слоях, при слиянии упомянутых вод, образуются многочисленные термохалинные интрузии [45-47].

Так как температуры Лабрадорских вод существенно ниже, чем у окружающих их вод Гольфстрима, на границах, сформировавшихся интрузий между ними происходит теплообмен. При этом опресненные Лабрадорские воды постепенно нагреваются, что приводит к снижению их плотности. В итоге они всплывают к поверхности, образуя многочисленные термики и субмезомасштабные вихри [48, 49].

Через некоторое время эти воды оказываются непосредственно на поверхности Северной Атлантики. В результате этого в приповерхностном слое вод Северной Атлантики образуется область охлажденной и опресненной воды, которая увлекается Североатлантическим течением к берегам Европы. Так как в структуре Североатлантического течения существуют многочисленные вихри [49], по мере продвижения упомянутой области на северо-восток, ее размеры увеличиваются, а поверхностные температуры изменяются. Над этой областью образуется (и перемещается вместе с ней) антициклон, в котором арктический воздух поступает в умеренные широты [50].

Так как всплывающие воды увлекаются Североатлантическим течением, участок акватории Северной Атлантики, где они впервые выходят непосредственно на ее поверхность, располагается к северо-востоку от района, в котором происходило слияние вод упомянутых течений.

Воды Гольфстрима являются более солеными. Охлаждаясь, они становятся плотнее и потому они погружаются в глубины моря Лабрадор, образуя глубокую конвекцию [51].

При прочих равных условиях, чем выше соленость и плотность Лабрадорских вод, поступивших в рассматриваемый район, тем выше температура и соленость всплывших опресненных вод, тем район, где эти воды впервые достигают поверхности, располагается северо-восточнее.

В результате потепления термического режима Гренландии, среднегодовая соленость вод, переносимых Североатлантическим течением, снижается, в основном за счет того, что снижается средняя соленость и плотность вод Лабрадорского течения [42; 52]. Такое снижение является максимальным в конце лета – начале осени [43]. В результате Арктического усиления, все более существенным является влияние на снижение указанных характеристик, процесса таяния ледяного покрова Северного Ледовитого океана.

В современном периоде плотность вод Лабрадорского течения уже практически сравнялась с плотностью вод, приносимых Гольфстримом [53; 54]. Последнее привело к более существенному снижению температуры и солености приповерхностных вод рассматриваемого района, формирующихся в соответствующие месяцы (до уровней указанных показателей для вод, приносимых Лабрадорским течением).

Осенью и зимой средняя соленость и плотность вод Лабрадорского течения повышаются, так как таяние ледников Гренландии становится менее интенсивным. В результате этого соленость и плотность вод, принесенных в рассматриваемый район Лабрадорским течением, также повышаются, а их выход на поверхность моря Лабрадор происходит в его районе, расположенном восточнее. Температура и соленость вод, уносимых на северо-восток Северо-Атлантическим течением, повышаются.

Как следует из изложенного, решения поставленных задач, которые могут быть найдены с применением такой методики, являются приближенными. Основной причиной этого является малая длина временных рядов K , при которой критерий Пирсона, как тест на нормальность, недостаточно надежен. Следовательно, полученные результаты носят качественный характер.

Результаты исследования и их анализ

С применением изложенной методики решены первая и вторая задачи. Определены участки ЕТР, а также других стран Европы, для которых статистические связи межгодовых изменений $СТВ_{г}$ в 2009-2023 гг. с вариациями $СТВ$ и $МСО$ для месяцев март-август 2010-2024 гг. являлись статистически значимыми с достоверностью не ниже 0,9. Также среди них

выявлены участки, для которых за период 1979-2024 гг. рассматриваемые связи значимо усиливались.

Как пример, на Рис.4 представлены участки территории Европы, где статистические связи межгодовых изменений $СТВ_{Г}$ в 2009-2023 гг. с вариациями $СТВ$ для месяцев март-июнь 2010-2024 гг. являлись статистически значимыми, а за 1979-2024 гг. они усиливались.

Из Рис.4а следует, что на территории Европы существуют участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций $СТВ$ для марта 2010-2024 гг., с изменениями $СТВ_{Г}$ в 2009-2023 гг. являлась значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливалась. Такие участки расположены на территории Донецкой Народной республики, а также Казахстана. Участков, где корреляция тех же процессов была значимой положительной и усиливалась, не обнаружено.

Из Рис.4б видно, что участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций $СТВ$ для апреля 2010-2024 гг., с изменениями $СТВ_{Г}$ в 2009-2023 гг. является значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливалась, существуют. Они расположены на акваториях Норвежского, Белого и западной части Баренцева моря, а также территориях Мурманской, Ленинградской, Архангельской области и республики Карелия. Суммарная площадь таких участков значительно больше, чем для предыдущего месяца.

Участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций $СТВ$ для апреля 2010-2024 гг., с изменениями $СТВ_{Г}$ в 2009-2023 гг. является значимой положительной, а за 1979-2024 гг. она усиливалась, выявлены на территории республики Дагестан. Суммарная площадь этих участков значительно меньше, чем участков, для которых корреляция тех же процессов отрицательна.

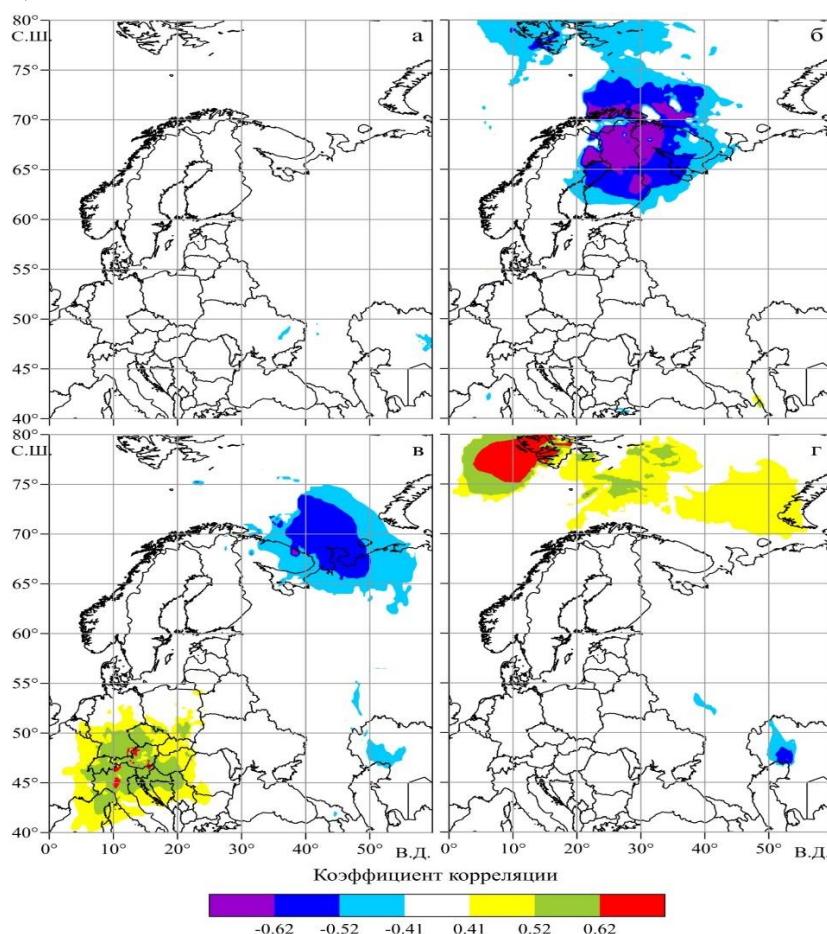


Рис.4. Участки ЕТР и территорий стран Европы, где статистические связи межгодовых изменений $СТВ_{Г}$ в 2009-2023 гг. с вариациями $СТВ$ для 2010-2024 гг. являлись статистически значимыми, а за 1979-2024 гг. они усиливались.

а) Март; б) Апрель; в) Май; г) Июнь

Рис.4в позволяет заключить, что для мая участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций СТВ за 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_Г за 2009-2023 гг. является значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливались, также обнаружены. Такие участки находятся на акватории Баренцева и Белого моря, на территориях Мурманской, Архангельской области, республики Коми, Ненецкого Автономного округа, а также Казахстана.

Участки, где корреляция межгодовых вариаций СТВ для мая 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_Г в 2009-2023 гг. является значимой положительной, а за 1979-2024 гг. она усиливалась, выявлены над акваторией Средиземного моря и Адриатического моря, а также территориями многих зарубежных стран Центральной, Восточной и Южной Европы.

Как следует из Рис.4г, на ЕТР выявлены участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций СТВ для июня 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_Г в 2009-2023 гг. являлась значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливались. Такие участки расположены на территории Воронежской области и Казахстана.

Участки, где за 1979-2024 гг. происходило усиление положительной корреляции межгодовых вариаций СТВ для июня 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_Г, которая за 2009-2023 гг. являлась значимой, также существуют. Они выявлены на акваториях Норвежского и Баренцева моря, на территориях островов архипелагов Шпицберген и Новая Земля.

Как видим из Рис.4, участки ЕТР, для которых изучаемым связям присущи свойства, позволяющие их эффективно использовать в задачах долгосрочного прогнозирования, выявлены в основном для апреля и мая. Для месяцев, предшествующих марту, а также следующих за июнем, искомым участкам не обнаружено. Среди выявленных участков ЕТР, преобладают те, где значимая корреляция изучаемых процессов являлась отрицательной.

На Рис.5 отображены участки ЕТР, где статистические связи межгодовых изменений МСО для месяцев март-июнь 2010-2024 гг., с вариациями СТВ_Г в 2009-2023 гг. являлись статистически значимыми, а в период 1979-2024 гг. они усиливались.

Из Рис.5а понятно, что на акваториях Балтийского, Северного и Баренцева моря обнаружены участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций МСО для марта 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_Г в 2009-2023 гг. являлась значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливались. Аналогичные участки обнаружены на территории всех стран Европы, относящихся к Прибалтийскому региону, а также Великобритании, Франции, Бельгии, Нидерландов, Чехии и Люксембурга. Такие участки выявлены также на территориях Мурманской, Архангельской, Денинградской, Псковской области, республик Карелия, Коми, и Башкортостан, а также Ставропольского края и Казахстана.

Участки, где корреляция тех же процессов была значимой положительной и усиливалась, обнаружены на акваториях Норвежского, Средиземного и Черного моря, а также на территориях Южного берега Крыма Нижегородской области, Испании, Франции, Словакии, Румынии, Украины и Венгрии. Суммарная площадь участков, где корреляция рассматриваемых процессов значима и отрицательна, значительно больше, чем для участков, где она положительна.

Как следует из Рис.5б видно, что участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций МСО для апреля 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_Г за летние сезоны 2009-2023 гг., является значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усилились, обнаружены. Упомянутые участки находятся на восточной части акватории Баренцева, Северного и Каспийского моря, а также территориях Белгородской, Воронежской области, Швеции Германии, Нидерландов, Австрии, стран Южной Европы и Казахстана.

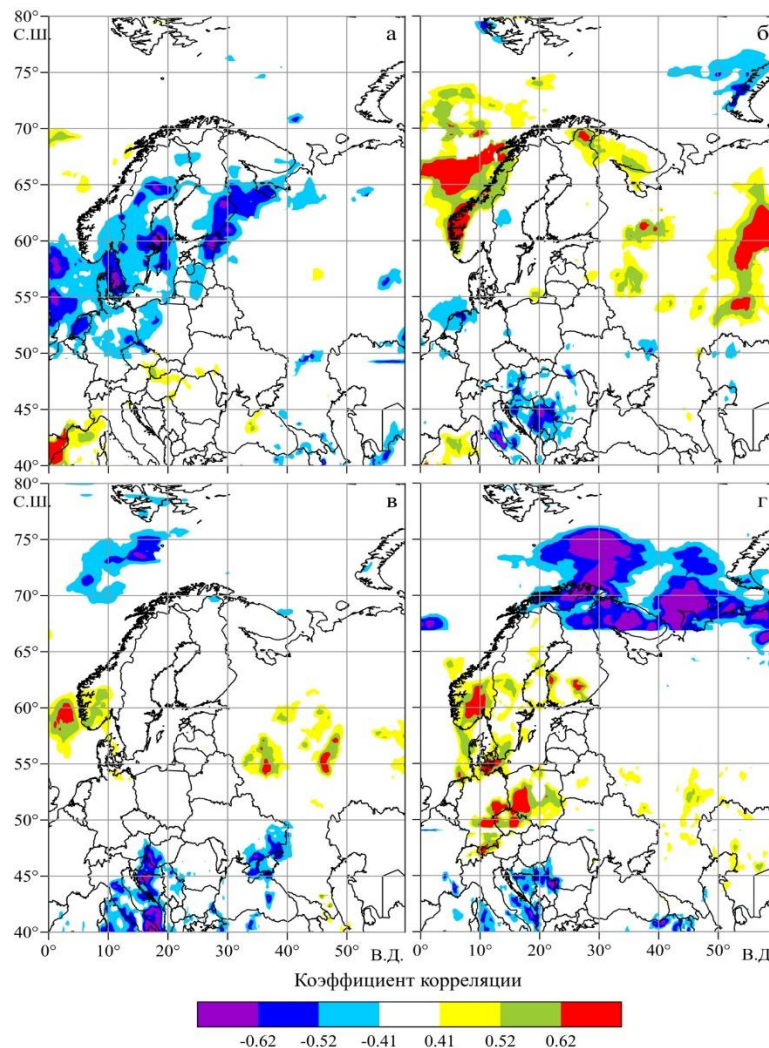


Рис.5. Участки ЕТР и территорий стран Европы, где статистические связи межгодовых изменений СТВГ в 2009-2023 гг. с вариациями МСО для 2010-2024 гг. являлись статистически значимыми, а за 1979-2024 гг. они усиливались.
а) Март; б) Апрель; в) Май; г) Июнь

Участки, где корреляция межгодовых вариаций МСО для апреля 2010-2024 гг, с изменениями СТВГ в 2009-2023 гг. является значимой положительной, а за 1979-2024 гг. она усиливалась, выявлены на акваториях Норвежского, Средиземного, Балтийского и Белого моря. Обнаружены они также на территориях Мурманской, Архангельской, Вологодской, Московской, Смоленской, Свердловской, Оренбургской, Владимирской и Кировской области, на территориях республики Карелия, Коми, Удмуртия, а также Пермского края. Суммарная площадь участков, где корреляция рассматриваемых процессов значима и положительна, значительно больше, чем для участков, где она отрицательна.

Рис.5в показывает, что для мая участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций МСО за 2010-2024 гг., с изменениями СТВГ в 2009-2023 гг. является значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливались, также обнаружены. Такие участки находятся на акватории Норвежского, Средиземного, Черного и Адриатического моря, а также территориях Воронежской, Ростовской области, Краснодарского края, республики Крым, Турции и многих стран Южной Европы.

Участки, где корреляция межгодовых вариаций МСО для мая 2010-2024 гг., с изменениями СТВГ в 2009-2023 гг. является значимой положительной, а за 1979-2024 гг. она усиливалась, выявлены на акватории Северного моря, а также на территории

Новгородской, Псковской, Вологодской, Кировской и Свердловской области, республик Удмуртия, Дагестан, Пермского края и Швеции.

Как следует из Рис.5г, участки, где корреляция соответствующих им межгодовых вариаций МСО для июня 2010-2024 гг., с изменениями СТВ_г в 2009-2023 гг. являлась значимой отрицательной, а за 1979-2024 гг. она усиливались выявлены на акватории Баренцева, Карского, Норвежского и Средиземного моря. Выявлены они также на ЕТР, где занимают практически всю Арктическую зону, а также на территориях Норвегии, Турции и некоторых стран Южной Европы.

Участки, где за 1979-2024 гг. происходило усиление положительной корреляции межгодовых вариаций МСО для июня, с изменениями СТВ_г, которая в 2010-2024 гг. являлась значимой, также существуют. Они выявлены территориях Белгородской, Воронежской, Пензенской, Саратовской и Волгоградской области, а также многих стран Центральной Европы, Прибалтийского региона, Казахстана и Скандинавии.

Как видно из Рис.5, участки ЕТР, для которых изучаемым связям присущи свойства, позволяющие их эффективно использовать в задачах долгосрочного прогнозирования, выявлены для всех месяцев с марта по июнь. Для месяцев, предшествующих марту, а также следующих за июнем, искомым участков не обнаружено. Среди выявленных участков ЕТР, преобладают те, где для 2010-2024 гг. значимая корреляция межгодовых изменений СТВ_г с вариациями МСО для марта и июня являлась отрицательной, а для апреля и мая положительной.

Анализ существующих представлений о влиянии потепления климата Гренландии на состояние АМОК, выполненный при решении третьей задачи, позволил установить следующее.

При дальнейшем потеплении термического режима Гренландии объем талых вод, образующихся в ней летом, будет возрастать. В результате этого средняя соленость и плотность вод, приносимых осенью Лабрадорским течением в район Большой Ньюфаундлендской банки, будет осенью на некоторое время снижаться. Раньше или позже наступит момент, когда плотность Лабрадорских вод окажется ниже, чем плотность вод Гольфстрима.

Судя по данным [42], этот момент уже давно наступил. В этот момент Лабрадорские воды впервые непосредственно поступили в поверхностный слой района, в котором образуется Североатлантическое течение, что вызвало снижение его температуры до уровня температуры Лабрадорского течения. Существенного влияния на погоду в Европе это не оказало, так как первоначально продолжительность рассматриваемого явления была небольшой (солёность и плотность вод Лабрадорского течения в скором времени вновь повысились, так как приходящийся на лето пик интенсивности сброса талых вод Гренландии в окружающие ее моря, не продолжителен).

При дальнейшем потеплении термического режима Гренландии, продолжительность отрезка времени, в течение которого плотность вод Лабрадорского течения будет становиться меньше плотности вод Гольфстрима, будет увеличиваться. Возрастать будут и размеры области экстремально охлажденной воды, формирующейся осенью в общем потоке Североатлантического течения, а влияние связанного с ней антициклона на погоду в Европе (после подхода этой области к ее берегам) будет усиливаться.

При приближении упомянутых вод к берегам Европы, поток арктического воздуха, увлекаемого этим антициклоном на ее территорию, будет возрастать, что на выявленных участках ЕТР вызовет дальнейшее снижение СТВ и МСО для весенних месяцев.

Летом рассматриваемые холодные и опресненные воды Североатлантического течения будут, как и ныне, доставляться соответствующими его струями в Норвежское, Гренландское море и море Ирмингера, а также уноситься на юг к берегам Северной Африки. В результате этого, связанный с упомянутыми водами антициклон будет частично разрушаться, а его влияние в указанном сезоне на погоду на ЕТР становится слабее.

С приходом рассматриваемых вод в район, над которым образуется Исландский минимум, средняя температура и соленость приповерхностного слоя его вод будут, как и в современном периоде, снижаться, вызывая повышение над ним атмосферного давления. Поэтому при дальнейшем потеплении термического режима Гренландии в предыдущем году, в летние месяцы текущего года повторяемость отрицательных фаз САК будет увеличиваться, а треки атлантических циклонов на территории Европой станут чаще смещаться к югу.

Следовательно, при дальнейшем развитии рассматриваемого процесса, повторяемость в летние месяцы атлантических циклонов над Арктической и Лесной зоной ЕТР, будет снижаться, а пожароопасность по условиям погоды на территориях соответствующих регионов России будет увеличиваться.

Как уже отмечалось выше, после завершения летнего сезона, таяние ледяного покрова Гренландии ныне практически прекращается. Соленость и плотность вод, приносимых в октябре-ноябре Лабрадорским течением в район Большой Ньюфаундлендской банки, вновь повышаются. Теплее становятся и воды, уносимые из этого района Североатлантическим течением. Повышается и их соленость. Следовательно, ощутимые на территории Европы последствия потепления термического режима Гренландии, при приближении к ней этих вод, будут нивелироваться, хотя ослабление АМОЦ и увеличение амплитуды внутригодовых изменений поверхностной температуры Североатлантического течения продолжатся.

Как следует из изложенного, на современной стадии ослабления АМОЦ, резких и катастрофических изменений метеоусловий на ЕТР не возникало (хотя амплитуда их изменчивости возрастала, что приводило к стихийным бедствиям, повторяющимся все чаще). При этом пожароопасность в выявленных регионах ЕТР из года в год повышалась плавно, в соответствии с происходящими изменениями СТВ_Г предыдущего года.

Изложенное позволяет прогнозировать, что при дальнейшем потеплении термического режима Гренландии, изменения пожароопасности по условиям погоды в таких регионах будут происходить по указанному «мягкому» сценарию.

Переход от «мягкого» сценария к катастрофическому (соответствующему коллапсу АМОЦ [34; 36]) возможен, если продолжительность отрезка времени, в течение которого плотность Лабрадорских вод, поступающих в район Большой Ньюфаундлендской банки, превышает плотность поверхностного слоя вод Гольфстрима, сократится до нуля. Такое произойдет не скоро (если он вообще когда-либо случится).

Упомянутая перемена сценария ослабления АМОЦ возможна лишь при увеличении объема талых вод, образующихся в Северном Ледовитом океане, до уровня, при котором максимальная за год плотность вод, доставляемых Лабрадорским течением в район Большой Ньюфаундлендской банки, будет оставаться меньше плотности соответствующих вод Гольфстрима. Вопрос о том, возможно ли это при современном состоянии ледяного покрова указанного океана, нуждается в дополнительном изучении (может не хватить пресной воды).

При дальнейшем увеличении СТВ_Г, изменения СТВ и МСО на ЕТР будут наиболее ощутимыми в месяцы с апреля по август, однако в осенние и зимние месяцы существенные вариации этих показателей, вызванные рассматриваемым процессом, маловероятны.

Кратковременные прорывы Лабрадорских вод на поверхность Североатлантического течения ныне уже происходят. Вероятно, они вызывают значимое снижение СТВ и МСО на многих участках ЕТР и некоторых стран Европы.

Связи между изменениями СТВ_Г, а также вариациями СТВ и МСО для выявленных участков ЕТР за период современного потепления климата Гренландии (1979-2024 гг.) устойчиво усиливались. Поэтому если сценарий развития изучаемых процессов не переменится, связи между ними будут и далее становиться сильнее, а суммарная площадь участков Лесной и Арктической зоны ЕТР, для которых они будут являться значимыми, будет возрастать до тех пор, пока на территории Гренландии будет сохраняться ледяной покров.

Так как при сохранении в будущем современного сценария развития изучаемых процессов, изменения СТВ и МСО, как и вариации СТВ_Г, будут происходить постепенно, у населения ЕТР, ее противопожарных подразделений и экономики есть возможность заблаговременно адаптироваться к ним.

Обсуждение полученных результатов

Как следует из полученных результатов, они в полной мере соответствуют существующим представлениям о влиянии изменений климата Гренландии на интенсивность глубокой конвекции в морях Лабрадор и Ирмингера [52; 55], а также на вариации состояния АМОЦ [6; 19; 42; 56]. Они также подтверждают справедливость выводов [47] о связи последних, а также других процессов, вызывающих Арктическое усиление, с динамикой СТВ и МСО на территориях Лесной и Арктической зоны ЕТР и Сибири. Вместе с тем некоторые из установленных фактов обладают существенной научной новизной. К ним относятся следующие положения:

Происходящее ослабление АМОЦ в период 2010-2024 гг. уже оказало значимое влияние на режимы испарения и увлажнения горючего материала, а также повышение пожароопасности по условиям погоды в некоторых регионах Лесной и Арктической зоны ЕТР. За 1979-2024 гг. это влияние устойчиво усиливалось. Значимая связь между рассматриваемыми этими процессами - в современном периоде уже не гипотеза, а наблюдаемая реальность (свершившийся факт).

Сценарий, по которому ныне происходит ослабление АМОЦ, по-видимому является «мягким», не предполагающим резкого и нелинейного коллапса этого течения (в отличие от представлений, изложенных в [48; 59]). Он допускает возможность своевременной адаптации деятельности противопожарных подразделений выявленных регионов и снижения ущерба, который может быть нанесен этим процессом. Такой сценарий, вероятно, соответствует ранней, начальной стадии перемены фазы АМОЦ.

Следует отметить, что полученные результаты не исключают возможности перехода в будущем этого процесса к острой, критической стадии, при которой могут проявиться угрозы не только регионального, но и национального, и глобального масштаба, хотя вероятность такого события не велика.

Гренландия – часть Арктики. Поэтому потепление ее климата – одна из составляющих более масштабного процесса в климатической системе нашей планеты – потепления климата всей Арктики (Арктического усиления), способного вызывать практически синхронное повышение пожароопасности по условиям погоды не только на ЕТР, но и в Сибири (которое видно Рис.1). Следовательно, аналогичные процессы могут развиваться также в Сибири.

Выводы

Таким образом, полученные результаты подтверждают справедливость выдвинутой гипотезы.

Установлено существование многочисленных участков Европейской территории России, которые относятся к ее Лесной и Арктической зоне, где потепление температурного режима Гренландии для летнего сезона в период 2010-2024 гг. оказало значимое влияние на межгодовую изменчивость пожароопасности по условиям погоды для месяцев с марта по июнь.

Связи между рассматриваемыми процессами за период современного потепления климата Гренландии (1979-2024 гг.) усиливались. Произошло это потому, что потепление температурного режима Гренландии вызывало соответствующее ослабление Атлантической Меридиональной Опрокидывающей циркуляции. В результате связи этого процесса с вариациями месячных сумм атмосферных осадков, а также среднемесячных температур воздуха, запаздывающими по отношению к нему на единицы месяцев, усилились.

При дальнейшем потеплении термического режима Гренландии месячные суммы атмосферных осадков, выпадающих в месяцы с марта по июнь на территориях упомянутых зон, будут снижаться. На некоторых из них изучаемый процесс вызовет также значимые изменения термического режима (на одних будет происходить его потепление, а на других похолодание). Все это вызовет на выявленных участках территории России повышение пожароопасности по условиям погоды, что целесообразно учитывать при разработке для них противопожарных мероприятий и планировании деятельности соответствующих противопожарных подразделений.

Вызванное рассматриваемым процессом повышение пожароопасности по условиям погоды на выявленных участках в ближайшие десятилетия будет происходить по «мягкому» сценарию, который фактически уже реализуется с 1979 года и предполагает отсутствие резких и нелинейных ее перемен. При этом пространственно–временная изменчивость поверхностных температур в зоне Североатлантического течения будет увеличиваться, что вызовет дальнейшее увеличение повторяемости над Европейской территорией России и другими территориями Европы опасных метеорологических явлений.

Список источников

1. Нестеров, В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.: Гослесбумиздат, 1949. - 76 с.
2. Профилактика и меры предупреждения лесных пожаров в системе лесопользования Российской Федерации / Д.Ф. Ефремов, А.С. Захаренков, М.А. Копейкин, Е.П. Кузьмичев, М.И. Сметанина, В.В. Солдатов; под общ ред. Е.П. Кузьмичева. – М.: Всемирный банк, 2012. – 104 с.
3. Сверлова, Л.И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Хабаровск. - 2000. – 46 с.
4. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт. – Москва. URL [Электронный текст]. Режим доступа: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml.
5. Шубкин, Р.Г. Результаты долгосрочного прогнозирования крупномасштабных лесных пожаров в Байкальском регионе / Шубкин Р.Г., Ширинкин П.В. // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник», 2016, № 3. - С. 35 – 38. - Режим доступа: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v3/N3_9-12.pdf, свободный.
6. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
7. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научно-технологические исследования, 2022. – 124 с.
8. Холопцев А.В. Физические основы теории долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования рисков возникновения ландшафтных пожаров: монография./ А.В. Холопцев, Р.Г. Шубкин, И.Ю. Сергеев, А.Н. Батуро, Н.Ю. Проскова//— Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. — 337 с. — Текст: электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО ПРОФобразование: [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/140586> (дата обращения: 16.06.2025).
9. Акперов М.Г., Мохов И.И., Изменения циклонической активности и осадков в атмосфере внетропических широт Северного полушария в последние десятилетия по данным реанализа ERA5//Оптика атмосферы и океана. 36.- №5 (2023). –С.377-380.
10. Hurrell J.W., Deser C. 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. – Journal of Marine Systems, vol. 79(3-4), pp. 231-244, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.11.002>.
11. Salby, M.L. Fundamentals of Atmospheric Physics/ M.L. Salby- New York: Academic Press/ - 1996. – 560 p.

12. Buckley, M.W., & Marshall, J. (2016). Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 5-63.
13. Лаппо С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. М.: Гидрометеоздат, 1984. С. 125–129.
14. Broecker, W. (1991). The great ocean conveyor (PDF). *Oceanography*. 4 (2): 79–89.
15. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М.: Триада, лтд, 2013. – 144 с.
16. Ueno K. Inter-annual variability of surface cyclone tracks, atmospheric circulation patterns, and precipitation patterns, in winter // *J. Meteor. Soc. Japan*. — 1993. — Vol. 71, № 6. — P. 655-671. DOI: 10.2151/jmsj1965.71.6_655.
17. Мохов И.И., Петухов В.К. Центры действия в атмосфере и тенденции их изменения // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 321-329.
18. Стоммел Г., Гольфстрим, пер. с англ., М., Издательство иностранной литературы. – 1963. – 227 с.
19. Caesar, L. et al. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*. Vol. 14. February 25, 2021. doi: 10.1038/s41561-021-00699-z.
20. Д. А. Кузнецова, И. Л. Башмачников, О механизмах изменчивости Атлантической Меридиональной Океанической циркуляции (АМОЦ)// *Океанология*, 2021, том 61, № 6, с. 1–13.
21. Cohen, J., et al. (2021). Linking Arctic variability and change with mid-latitude weather and climate. WMO-WWRP/WCRP-AREP.
22. Д. А. Яковлева, И. Л. Башмачников, Д. А. Кузнецова Влияние атлантической меридиональной океанической циркуляции на температуру верхнего слоя Северной Атлантики и атлантического сектора Северного Ледовитого океана.// *Океанология*, 2023, Т. 63, № 2, С. 173-181.
23. Chafik L., Rossby T. Volume, heat, and freshwater divergences in the Subpolar North Atlantic suggest the Nordic Seas as key to the state of the Meridional Overturning Circulation // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. № 9. P. 4799–4808.
24. Фалина А.С., Сарафанов А.А. О формировании нижнего звена меридиональной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики // *Доклады Академии Наук*. 2015. Т. 461. № 6. С. 710–714.
25. Lozier M.S., Li F., Bacon S. et al. A sea change in our view of overturning in the subpolar North Atlantic // *Science*. 2019.V. 363. № 6426. P. 516–521.
26. Petit T., Lozier M.S., Josey S.A. et al. Atlantic Deep Water formation occurs primarily in the Iceland Basin and Irminger Sea by local buoyancy forcing // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. № 22. P. 1–9.
27. Rhein M., Kieke D., Hüttl-Kabus S. et al. Deep water formation, the Subpolar Gyre, and the Meridional Overturning Circulation in the subpolar North Atlantic // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2011. V. 58. № 17–18. P. 1819–1832.
28. Talley L.D. Shallow, intermediate, and deep overturning components of the global heat budget // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. V. 33. № 3. P. 530–560.
29. Böning C.W., Bryan F.O., Holland W.R. et al. Deep-water formation and the meridional overturning in a high-resolution model of the North Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. V. 26. № 7. P. 1142–1164.
30. Pickart R.S., Spall M.A. Impact of Labrador Sea convection on the North Atlantic Meridional Overturning Circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 2007. V. 37. № 9. P. 2207–2227.
31. Kanzow T., Cunningham S.A., Johns W.E. et al. Seasonal variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5° N // *Journal of Climate*. 2010. V. 23. № 21. P. 5678–5698.
32. Монин А.С., Пашков Ю.А. История климата. Гидрометеоздат. 1979. -407с.
33. Flis A., Why is the Atlantic Ocean current collapsing, and can it cause global cooling? *Global Weather Drivers*. -2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.severe->

weather.eu/learnweather/global-weather-drivers/why-is-the-atlantic-ocean-current-collapsing-and-can-it-cause-global-cooling-fa/.

34. Ditlevsen, P., & Ditlevsen, S. (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications*, 14(1), 4254.

35. Boers, N. (2021). Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change*, 11(8), 680-688.

36. Lenton, T.M., et al. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793.

37. Холощев А.В., Никифорова М.П. Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов. – Saarbrücken, Deutschland.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 352 с.

38. Hólm E., Janisková M., Keeley S. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020. – Vol. 146. – P. 1999–2049.

39. База данных Результаты реанализа ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form>.

40. Холощев А.В., Шубкин Р.Г. Территории Западной и Средней Сибири, где априорные оценки оправдываемости долгосрочных прогнозов термического режима в XXI веке являлись несмещенными или заниженными. // Сборник материалов IX Международного Арктического Саммита «Арктика: перспективы, инновации и развитие регионов». Часть 2. 22-25 апреля 2025 г. Москва- Санкт Петербург. С.26-32.

41. Böning, C.W., Behrens, E., Biastoch, A., Getzlaff, K., & Bamber, J.L. (2016). Emerging impact of Greenland meltwater on deepwater formation in the North Atlantic Ocean. // *Nature Geoscience*, 9(7), 523–527.

42. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. (2019). [Chapter 6: Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks].

43. Bamber, J.L., Tedstone, A.J., King, M.D., Howat, I.M., Enderlin, E.M., van den Broeke, M. R., & Noel, B. (2018). Land ice freshwater budget of the Arctic and North Atlantic Oceans: 1. Data, methods, and results. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3), 1827-1837.

44. Yashayaev, I., & Loder, J.W. (2017). Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016. // *Geophysical Research Letters*, 44(3), 1429-1438.

45. Zhai, X., Johnson, H.L., Marshall, D.P., & Wunsch, C. (2015). On the wind-driven energy balance of the North Atlantic subpolar gyre. // *Journal of Physical Oceanography**, 45(6), 1533-1549.

46. Башмачников И.Л., Федоров А.М., Весман А.В. и др. Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 1: локализация областей конвекции // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 184–194.

47. Башмачников И.Л., Федоров А.М., Весман А.В. и др. Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть 2: индексы интенсивности конвекции // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 191–201.

48. Spall, M.A. (2010). Nonlocal topographic influences on deep convection: An idealized model for the Nordic Seas. // *Ocean Modelling*, 32(1-2), 72-85.

49. Gary, S.F., Lozier, M.S., Böning, C.W., & Biastoch, A. (2011). Deciphering the pathways for the deep limb of the Meridional Overturning Circulation. // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58(17-18), 1781-1797.

50. Gervais, M., Shaman, J., & Kushnir, Y. (2018). Impacts of the North Atlantic warming hole in future climate projections: mean atmospheric circulation and the North Atlantic jet. // *Journal of Climate*, 31(7), 2679-2695.

51. Pickart, R.S., & Spall, M.A. (2007). Impact of Labrador Sea convection on the North Atlantic Meridional Overturning Circulation. // *Journal of Physical Oceanography*, 37(9), 2207-2237.

52. Rahmstorf, S., Box, J.E., Feulner, G., Mann, M.E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernicht, E.J. (2015). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. // *Nature Climate Change*, 5(5), 475-480.

53. Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., & Saba, V. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. // *Nature*, 556(7700), 191-196.
54. Thornalley, D.J., Oppo, D.W., Ortega, P., Robson, J.I., Brierley, C. M., Davis, R.,... & Keigwin, L. D. (2018). Anomalously weak Labrador Sea convection and Atlantic overturning during the past 150 years.// *Nature*, 556(7700), 227-230.
55. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Golubkin P.A. et al. Mechanisms of interannual variability of deep convection in the Greenland Sea // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. V. 174. Art. 103557. P. 1–20.
56. Böning C.W., Bryan F.O., Holland W.R. et al. Deep-water formation and the meridional overturning in a high-resolution model of the North Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. V. 26. № 7. P. 1142– 1164.
57. Douglas, T.A., et al. (2020). Linkages between Arctic sea ice decline, atmospheric moisture transport, and summer forest fires in Siberia. *Science Advances*, 6(50), eabd3358.
58. Drijfhout S. Competition between global warming and an abrupt collapse of the AMOC in Earth's energy imbalance // *Scientific Reports*. 2015. V. 1. № 5. P. 1–12.
59. Lynch-Stieglitz J. (2017). «The Atlantic Meridional Overturning Circulation and Abrupt Climate Change». *Annual Review of Marine Science* 9: 83–104. DOI:10.1146/annurev-marine-010816-060415. PMID 27814029. Bibcode: 2017ARMS...9...83L.

References

1. Nesterov, V.G. *Forest Combustibility and Methods of Its Determination*. Moscow: Goslesbumizdat, 1949. P. 76.
2. *Prevention and Measures to Prevent Forest Fires in the Forestry Management System of the Russian Federation* / D.F. Efremov, A.S. Zakharenkov, M.A. Kopeikin, E.P. Kuzmichev, M.I. Smetanina, and V.V. Soldatov; edited by E.P. Kuzmichev. Moscow: World Bank, 2012. P. 104.
3. Sverlova, L.I. *Method of assessing fire hazard in forests by weather conditions, taking into account the zones of atmospheric aridity and seasons of the year*. Khabarovsk, 2000. – P. 46.
4. *Information system for remote monitoring of the Federal Forestry Agency: official website*. – Moscow. URL [Electronic text]. Access mode: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml.
5. Shubkin, R.G. Results of Long-Term Forecasting of Large-Scale Forest Fires in the Baikal Region / Shubkin R.G., Shirinkin P.V. // *Scientific and Analytical Journal "Siberian Fire and Rescue Bulletin"*, 2016, No. 3. - P. 35-38. - Access mode: http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2016/v3/N3_9-12.pdf, free.
6. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, P. 2391.
7. *Third Assessment Report on Climate Change and Its Impacts in the Russian Federation. General Summary*. – St. Petersburg: Science-Intensive Technologies, 2022. P. 124.
8. Kholoptsev, A.V. *Physical Foundations of the Theory of Long-Term and Ultra-Long-Term Forecasting of Landscape Fire Risks: Monograph*. / A.V. Kholoptsev, R.G. Shubkin, I.Yu. Sergeev, A.N. Baturo, and N.Yu. Proskova. — Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2024. — 337 p. — Text: electronic // Electronic resource of the PROFeducation digital educational environment: [website]. — URL: <https://profspo.ru/books/140586> (accessed on 16.06.2025).
9. Akperov M.G., Mokhov I.I., Changes in cyclonic activity and precipitation in the atmosphere of the extratropical latitudes of the Northern Hemisphere in recent decades according to ERA5 reanalysis data// *Atmospheric and Ocean Optics*. 36.- No. 5 (2023). P. 377-380.
10. Hurrell J.W., Deser C. 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. – *Journal of Marine Systems*, vol. 79(3-4), pp. 231-244, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.11.002>.
11. Salby, M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*/ M. L. Salby- New York: Academic Press/ - 1996. P. 560.

12. Buckley, M.W., & Marshall, J. (2016). Observations, inferences, and mechanisms of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A review. *Reviews of Geophysics*, 54(1), P. 5-63.
13. Lappo S.S. On the Causes of Heat Advection Northward Across the Equator in the Atlantic Ocean // *Research on the Interaction of the Ocean and the Atmosphere*. Moscow: Gidrometeoizdat, 1984, P. 125–129.
14. Broecker, W. (1991). The great ocean conveyor (PDF). *Oceanography*. 4 (2): 79–89 p.
15. Nesterov, E.S. The North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean. Moscow: Triada, Ltd., 2013. 144 p.
16. Ueno K. Inter-annual variability of surface cyclone tracks, atmospheric circulation patterns, and precipitation patterns, in winter // *J. Meteor. Soc. Japan*. — 1993. — Vol. 71, № 6. — P. 655-671. DOI: 10.2151/jmsj1965.71.6_655.
17. Mokhov I.I., Petukhov V.K. Centers of Action in the Atmosphere and Trends in Their Changes // *Izv. RAS. Physics of the Atmosphere and Ocean*. — 2000. — Vol. 36, No. 3. — P. 321-329.
18. Stommel G., *The Gulf Stream*, translated from English, Moscow, Foreign Literature Publishing House. — 1963. — 227 p.
19. Caesar, L. et al. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*. Vol. 14. February 25, 2021. doi: 10.1038/s41561-021-00699-z.
20. D.A. Kuznetsova, I. L. Bashmachnikov, On the Mechanisms of Variability of the Atlantic Meridional Oceanic Circulation (AMOC).// *Oceanology*, 2021, vol. 61, no. 6, pp. 1–13.
21. Cohen, J., et al. (2021). Linking Arctic variability and change with mid-latitude weather and climate. WMO-WWRP/WCRP-AREP.
22. D.A. Yakovleva, I. L. Bashmachnikov, and D.A. Kuznetsova. The Influence of the Atlantic Meridional Oceanic Circulation on the Upper Layer Temperature of the North Atlantic and the Atlantic Sector of the Arctic Ocean.// *Oceanology*, 2023, Vol. 63, No. 2, P. 173-181.
23. Chafik L., Rossby T. Volume, heat, and freshwater divergences in the Subpolar North Atlantic suggest the Nordic Seas as key to the state of the Meridional Overturning Circulation // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. № 9. P. 4799–4808.
24. Falina A.S., Sarafanov A.A. On the Formation of the Lower Link of the Meridional Thermohaline Circulation of the North Atlantic Waters // *Reports of the Academy of Sciences*. 2015. Vol. 461. No. 6. P. 710–714
25. Lozier M.S., Li F., Bacon S. et al. A sea change in our view of overturning in the subpolar North Atlantic // *Science*. 2019.V. 363. № 6426. P. 516–521.
26. Petit T., Lozier M.S., Josey S.A. et al. Atlantic Deep Water formation occurs primarily in the Iceland Basin and Irminger Sea by local buoyancy forcing // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. № 22. P. 1–9.
27. Rhein M., Kieke D., Hüttl-Kabus S. et al. Deep water formation, the Subpolar Gyre, and the Meridional Overturning Circulation in the subpolar North Atlantic // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2011. V. 58. № 17–18. P. 1819–1832.
28. Talley L.D. Shallow, intermediate, and deep overturning components of the global heat budget // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. V. 33. № 3. P. 530–560.
29. Böning C.W., Bryan F.O., Holland W.R. et al. Deep-water formation and the meridional overturning in a high-resolution model of the North Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. V. 26. № 7. P. 1142– 1164.
30. Pickart R.S., Spall M.A. Impact of Labrador Sea convection on the North Atlantic Meridional Overturning Circulation // *Journal of Physical Oceanography*. 2007. V. 37. № 9. P. 2207–2227.
31. Kanzow T., Cunningham S.A., Johns W.E. et al. Seasonal variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5 N // *Journal of Climate*. 2010. V. 23. № 21. P. 5678–5698.
32. Monin A. S. Shashkov Yu. A. Climate history. Hydrometeoizdat. 1979. P. 407.
33. Flis A. Why is the Atlantic Ocean current collapsing, and can it cause global cooling? *Global Weather Drivers*. -2024. [Electronic resource]. Access mode:<https://www.severe-weather.eu/learnweather/global-weather-drivers/why-is-the-atlantic-ocean-current-collapsing-and-can-it-cause-global-cooling-fa/>.

34. Ditlevsen, P., & Ditlevsen, S. (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications*, 14(1), 4254.
35. Boers, N. (2021). Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change*, 11(8), 680-688.
36. Lenton, T.M., et al. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793.
37. Холощев А.В., Никифорова М.П. Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов. – Saarbrücken, Deutschland.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 352 с.
38. Hólm E., Janisková M., Keeley S. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020. – Vol. 146. – P. 1999–2049.
39. Database of ERA5 reanalysis results of hourly data on pressure levels from 1979 to the present. [Electronic resource]. Access mode: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form>.
40. Kholoptsev A.V., Shubkin R.G. Territories of Western and Central Siberia where a priori estimates of the validity of long-term forecasts of the thermal regime in the 21st century were unbiased or underestimated. // *Collection of materials of the IX International Arctic Summit "Arctic: Prospects, Innovations, and Regional Development"*. Part 2. April 22-25, 2025. Moscow-Saint Petersburg. P. 26-32.
41. Böning, C.W., Behrens, E., Biastoch, A., Getzlaff, K., & Bamber, J. L. (2016). Emerging impact of Greenland meltwater on deepwater formation in the North Atlantic Ocean. // *Nature Geoscience*, 9(7), 523–527.
42. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. (2019). [Chapter 6: Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks].
43. Bamber, J.L., Tedstone, A.J., King, M.D., Howat, I.M., Enderlin, E.M., van den Broeke, M. R., & Noel, B. (2018). Land ice freshwater budget of the Arctic and North Atlantic Oceans: 1. Data, methods, and results. // *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3), 1827-1837.
44. Yashayaev, I., & Loder, J. W. (2017). Further intensification of deep convection in the Labrador Sea in 2016. // *Geophysical Research Letters*, 44(3), 1429-1438.
45. Zhai, X., Johnson, H. L., Marshall, D. P., & Wunsch, C. (2015). On the wind-driven energy balance of the North Atlantic subpolar gyre. // *Journal of Physical Oceanography**, 45(6), 1533-1549.
46. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Vesman A.V., et al. Thermohaline Convection in the Subpolar Seas of the North Atlantic and the North European Basin of the Arctic Ocean Based on Satellite and Field Data. Part 1: Localization of Convection Areas // *Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space*. 2018. Vol. 15. No. 7. P. 184–194.
47. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Vesman A.V., et al. Thermohaline convection in the subpolar seas of the North Atlantic and the North European basin of the Arctic Ocean from satellite and field data. Part 2: indices of convection intensity // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2019. Vol. 16. No. 1. P. 191–201.
48. Spall, M.A. (2010). Nonlocal topographic influences on deep convection: An idealized model for the Nordic Seas. // *Ocean Modelling*, 32(1-2), 72-85.
49. Gary, S.F., Lozier, M.S., Böning, C.W., & Biastoch, A. (2011). Deciphering the pathways for the deep limb of the Meridional Overturning Circulation. // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58(17-18), 1781-1797.
50. Gervais, M., Shaman, J., & Kushnir, Y. (2018). Impacts of the North Atlantic warming hole in future climate projections: mean atmospheric circulation and the North Atlantic jet. // *Journal of Climate*, 31(7), 2679-2695.
51. Pickart, R.S., & Spall, M. A. (2007). Impact of Labrador Sea convection on the North Atlantic Meridional Overturning Circulation. // *Journal of Physical Oceanography*, 37(9), 2207-2237.
52. Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernicht, E. J. (2015). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. // *Nature Climate Change*, 5(5), 475-480.
53. Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., & Saba, V. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. // *Nature*, 556(7700), 191-196.

54. Thornalley, D. J., Oppo, D. W., Ortega, P., Robson, J. I., Brierley, C. M., Davis, R., ... & Keigwin, L. D. (2018). Anomalously weak Labrador Sea convection and Atlantic overturning during the past 150 years. // Nature, 556(7700), 227-230.

55. Bashmachnikov I.L., Fedorov A.M., Golubkin P.A. et al. Mechanisms of interannual variability of deep convection in the Greenland Sea // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. V. 174. Art. 103557. P. 1–20.

56. Böning C.W., Bryan F.O., Holland W.R. et al. Deep-water formation and the meridional overturning in a high-resolution model of the North Atlantic // Journal of Physical Oceanography. 1996. V. 26. № 7. P. 1142–1164.

57. Douglas, T. A., et al. (2020). Linkages between Arctic sea ice decline, atmospheric moisture transport, and summer forest fires in Siberia. Science Advances, 6(50), eabd3358.

58. Drijfhout S. Competition between global warming and an abrupt collapse of the AMOC in Earth's energy imbalance // Scientific Reports. 2015. V. 1. № 5. P. 1–12.

59. Lynch-Stieglitz J. (2017). «The Atlantic Meridional Overturning Circulation and Abrupt Climate Change». Annual Review of Marine Science 9: 83–104. DOI:10.1146/annurev-marine-010816-060415. PMID 27814029. Bibcode: 2017ARMS....9...83L.

Информация об авторах

А.В. Холопцев – доктор географических наук, профессор

Р.Г. Шубкин – кандидат технических наук, доцент

Information about authors

A.V. Kholoptsev – Grand PhD in Geography, professor

R.G. Shubkin – PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025, одобрена после рецензирования 10.12.2025, принята к публикации 16.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025, approved after reviewing 10.12.2025, accepted for publication 16.12.2025.