

**Научная статья**

УДК 551.583+551.3261

DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-21-33

**Для цитирования:**

К.В. Фильчук, В.Б. Коробов, А.В. Юлин, Т.В. Шевелева  
Влияние наблюдаемых изменений климатических условий на хозяйственную деятельность в морях Российской Арктики // Российская Арктика. 2022. № 17. С. 21–33

Получена: 09.06.2022

Принята: 05.07.2022

Опубликована: 08.07.2022

Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета проект 5.1 «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей» на 2020–2024 гг.



## ВЛИЯНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ХОЗЯЙСТВЕННУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

К.В. Фильчук<sup>1</sup>, В.Б. Коробов<sup>1,2</sup>, А.В. Юлин<sup>1</sup>, Т.В. Шевелева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт Арктики и Антарктики, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
kirill@aari.ru, szoioran@mail.ru, icefor@aari.ru, sheveleva@aari.ru

**Аннотация:** В статье рассмотрены природные факторы, влияющие на навигацию и освоение минеральных ресурсов евразийского арктического шельфа при наблюдающемся сокращении ледяного покрова в морях Северного Ледовитого океана. Проведен анализ потенциального влияния некоторых гидрометеорологических факторов на изменения условий хозяйственной деятельности в Арктике. Показано, что при определённых синоптических ситуациях ледовые условия на отдельных участках трассы СМП могут существенно ухудшаться, даже при общем уменьшении ледовитости в российских арктических морях.

Активизировались процессы, которые ранее протекали достаточно медленно. Например, наблюдаемое потепление привело к повышению ледопродуктивности выводных ледников арктических архипелагов ЗФИ, Новая Земля, Северная Земля. Это в свою очередь привело к увеличению айсбергов и их обломков на путях плавания судов и повышению айсберговой опасности. Увеличение площади открытой воды стало приводить к увеличению длины разгона, скорости течений, величины непериодических колебаний уровня и размеров высоты и длины ветровых волн в штормах.

Авторами сделан вывод о том, что при общем изменении ледового режима морей в лёгкую сторону по целому ряду показателей, таких как интенсивности очищения акваторий, ледовитости, увеличению продолжительности безледного периода, в отдельных районах арктических морей и на локальных участках плавания СМП может наблюдаться ухудшение навигационной обстановки. Увеличение повторяемости критических значений целого ряда ледово-гидрологических характеристик (айсберги, течения, волнение, колебания уровня) в целом привели к усложнению условий и возникновению новых рисков для хозяйственной деятельности в Арктике, увеличению нагрузок на гидротехнические сооружения. Вместе с тем рост объема перевозок по СМП одновременно с изменением ледово-гидрологических характеристик и появлением новых рисков создает условия, способствующие более быстрому распространению нефтяных загрязнений при аварийных разливах.

**Ключевые слова:** Арктический шельф, гидротехнические сооружения, навигация, потепление Арктики

## INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON NAVIGATION AND DEVELOPMENT OF THE CONTINENTAL SHELF IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS

K.V. Filchuk<sup>1</sup>, V.B. Korobov<sup>1,2</sup>, A.V. Yulin<sup>1</sup>, T.V. Sheveleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
kirill@aari.ru, szoioran@mail.ru, icefor@aari.ru, sheveleva@aari.ru

**Abstract:** This article considers factors that influencing navigation and mineral resources exploration on the Arctic shelf taking into account observed sea ice reduction. An analysis was made of the potential impact of some hydrometeorological factors on changes in the conditions of economic activity in the Arctic. It is shown that under certain synoptic situations, ice conditions for navigation in certain sections of the NSR route can significantly deteriorate, even with a decrease in the total ice cover in the Russian Arctic seas.

Processes that previously proceeded rather slowly were activated. For example, the observed warming has led to an increase in the ice productivity of the outlet glaciers of the Arctic archipelagos of the Franz Josef Land, Novaya Zemlya, and Severnaya Zemlya. This led to an increase in number of icebergs and their parts on the shipping routes and higher iceberg danger. The area of open water has increased. It caused an increase in the speed, wind, currents, magnitude of periodic fluctuations and the size of the wind waves during the storms.

The authors have concluded that the deterioration in the navigation situation can be observed despite of the increasing of the ice-free period duration in some areas of the Arctic seas and the Northern Sea Route. An increase in the frequency of critical values of icebergs, currents, waves and level fluctuations in general led to a more complicated environment for the economic development of the Arctic shelf and a growth in the load on hydraulic structures. At the same time, the growth in traffic along the Northern Sea Route with a change in the ice-hydrological characteristics creates conditions providing more rapid spread of oil pollution during accidental spills.

**Keywords:** Arctic shelf, Arctic warming, hydraulic structures, navigation

---

## Введение

Текущее глобальное изменение климата, в котором преобладает рост температуры воздуха, в наибольшей степени затронуло Арктику, в которой интенсивность этого процесса существенно выше по сравнению с умеренными широтами. Когда в такой сложной системе, как «океан-лед-атмосфера», происходит существенное и устойчивое изменение одного параметра, например, температуры воздуха, то это естественным образом влечёт за собой изменение других параметров системы. В наибольшей степени потепление воздуха, как и следовало ожидать, коснулось ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) и его морей. Коэффициент корреляции между суммарной летней температурой воздуха в широтной зоне 70–85°с.ш. и площадью льдов в СЛО в сентябре равен -0,93 [1], хотя сам механизм этого влияния ещё остаётся не исследованным и до конца понятным [2]. При этом также надо принимать во внимание наблюдаемое нарушение стационарности в межгодовой изменчивости площади ледяного покрова [3].

Происходящее потепление, помимо ледяного покрова, оказывает влияние и на другие гидрометеорологические характеристики и процессы. Естественно, что все эти изменения, как верно отмечено в [4], носят разнонаправленный характер и оказывают заметное влияние на логистику морских операций, экономическую ситуацию в целом, причём не только в арктическом регионе, но и далеко за его пределами.

Оценки экономических перспектив арктического региона у разных авторов сильно различаются: от ожидаемой экономической эффективности,

порядок которой оценивается в миллиарды рублей, связанной с улучшением условий плавания и освоением природных ресурсов, до такого же рода расходов, связанных с необходимостью модернизации береговой инфраструктуры, укрепления фундаментов сооружений и ликвидации аварий из-за деградации многолетней мерзлоты и возможных негативных воздействий на экологию и биоразнообразие.

### **Цель исследований**

Общепринятой методики оценки экономических последствий от изменения климата в Арктике ещё не выработано, иначе трудно объяснить кардинальные расхождения оценок. Одной из причин этому является недостаточное понимание происходящих природных процессов, а значит и сложности в составлении долгосрочных прогнозов и применении математических моделей. Так, при моделировании логистических операций в Арктике на стандартные модели накладывается порядка десятка ограничений, вызванных спецификой региона, в том числе и влиянием природных факторов на социально-экономические характеристики [5]. Но, с другой стороны, это обстоятельство открывает широкие перспективы для совершенствования моделей и вычислительных алгоритмов [6]. Естественно, что для этого необходимо знание природных процессов и верное определение факторов, на них влияющих.

Исходя из этого, целью настоящей работы является исследование влияния природных факторов, оказывающих воздействие на навигацию, логистические операции и освоение континентального шельфа в морях Российской Арктики в условиях текущего изменения климата. Поскольку такие исследования весьма объёмны, на первом этапе авторы ограничились качественным анализом, чтобы получить общее представление о характере этого влияния.

### **Факторы, влияющие на морской транспорт и гидротехнические сооружения на континентальном шельфе**

Все природные факторы, влияющие на судоходство, логистические операции, проектирование, строительство и функционирование гидротехнических сооружений на континентальном шельфе, можно разбить на несколько групп. Применительно к условиям рассматриваемой нами задачи, наиболее важными являются метеорологические, океанологические и ледовые факторы, которые в таком порядке и будут рассмотрены.

**Метеорологические факторы** оказывают влияние на суда, плавсредства и сооружения как непосредственно, так и опосредованно. Наиболее значимым метеорологическим фактором является направление и скорость *ветра*. Штормовой ветер с определенных направлений оказывает интенсивные нагрузки на сооружения и маневренность судов, вызывает высокие волны и сильные дрейфовые течения и нагоны.

**Температуру воздуха** необходимо рассматривать в двух временных масштабах: синоптическом, когда отрицательные температуры влияют на обледенение судов и сооружений, и сезонном, когда длительные положительные температуры способствуют интенсивному таянию льда, а отрицательные температуры, наоборот, быстрому нарастанию.

**Опасные природные гидрометеорологические явления** – явления, воздействие которых может привести к гибели людей и нанести значительный ущерб отраслям экономики [7]. Перечень этих характеристик

и их критерии специфичны для каждой отрасли и региона. Существуют еще и так называемые Перечни опасных погодных явлений (ОПЯ), которые также составляются в региональных УГМС для отдельных районов.

**Океанологические** характеристики, как правило, непосредственно влияют на суда, плавсредства и сооружения. Наиболее значимым из океанологических факторов принято считать **волнение**. При контакте с сооружениями и судами штормовые волны могут сдвинуть с места или даже разрушить сооружения и их части, стать причиной смещения грузов и даже опрокидывания судов. Волны активно участвуют в процессе размыва дна и берегов.

В качестве примера ошибочных решений без должного учета гидрометеорологических явлений можно привести эксперимент по строительству каменного причального сооружения для разгрузки судов на мысе Шмидта в Чукотском море. Все результаты дорогостоящих и трудозатратных работ по созданию каменного отсыпного причала были уничтожены первым же штормом, пришедшим с северо-восточного направления на мыс Шмидта.

**Течения** сильно осложняют операции швартовки и перешвартовки у пирсов, терминалов и платформ. Как и волны, течения в ещё большей степени размывают дно и берега. В арктических морях течения переносят ледяные поля и айсберги, столкновения с которыми чреваты серьёзными последствиями и для судов, и для сооружений.

**Колебания уровня** способствуют термоабразии дна и берегов за счёт увеличения контакта слагающих дно и берега пород с более тёплой водой, что приводит их к разрушению [8]. Расположенные на таких берегах сооружения разрушаются вместе с ними. Также следует принимать в расчёт, что повышение уровня может привести к отрыву от дна таких ледяных образований как стамухи и гряды торосов, которые, придя в движение, пропахивают морское дно и могут повредить проложенные на дне трубопроводы и кабели, а наваливаясь на сооружения, могут их серьёзно повредить.

**Ледовые условия** играют ключевую роль во всех процессах в арктических морях. Большие нагрузки на сооружения оказывают дрейфующие ледяные поля. Дрейфуя под действием ветра и течений и взаимодействуя друг с другом, они могут привести к повреждению судов и вывести из строя любое береговое сооружение. Движение во льдах требует наличия судов ледового класса и ледокольной проводки. Но и ледоколы далеко не всегда могут преодолевать торосистые ледяные поля в условиях приливного и ветрового сжатия.

Большую проблему для мореплавания и сооружений представляют **айсберги и их обломки**, столкновения с которыми являются причинами многих катастроф. Навалы айсбергов и их обломков, различных ледяных образований, таких как сильно восторошенные ледяные поля и несяки, могут нанести существенные повреждения различным гидротехническим сооружениям.

### **Анализ изменения природных условий и их влияние на навигацию и освоение континентального шельфа**

**Климатические** изменения определяются как естественными, так и в определённой степени планетарными процессами взаимодействия атмосферы с верхним слоем океана и его снежно-ледяным покровом.

Влияние **температуры** воздуха, среднегодовые значения которой за

последние тридцать лет в приземном слое повысились более, чем на 1 °С [9], а весной и осенью ещё больше, до полутора градусов, сказалось главным образом на ледяном покрове. Опосредованное влияние повышения температуры воздуха сказывается на различных объектах вследствие таяния мерзлотных пород, слагающих морское дно, в результате чего наблюдается переход газогидратов из твердого в газовое состояние. Резкие выбросы метана в воду значительно уменьшают плотность морской воды, и, если это произойдёт в месте нахождения судна или сооружения, может вызвать катастрофу [10].

Существенно выросла повторяемость штормов. По результатам моделирования установлено, что, в частности, в Карском море с 1979 по 2019 г. число штормов выросло в два раза, причём наибольшее их количество отмечается глубокой осенью [11]. А это означает, что в открытых частях моря на освобождающихся ото льда акваториях увеличилась средняя скорость **ветра** [9] и, соответственно, влияние ветра на вызываемые им динамические процессы – волнение, течения, сгонно-нагонные колебания уровня.

Такая же ситуация характерна и для других районов арктических морей, акватории которых стали в значительной степени очищаться ото льда. Однако, по данным береговых станций средняя годовая скорость ветра в последние годы несколько снизилась, что может говорить о снижении интенсивности атмосферной циркуляции в прибрежной зоне. Причиной этому может также быть и выравнивание в сторону уменьшения горизонтальных градиентов приземной температуры воздуха между сушей и морем. Этот вопрос заслуживает специального изучения.

Следствием увеличения площади свободной ото льда в осенний и весенний периоды поверхности морей, когда температура воды выше температуры воздуха, является увеличение турбулентного теплообмена в приземном слое атмосферы. Более тёплые и насыщенные влагой воздушные массы поднимаются вверх и образуют низкую облачность, препятствующую полётам малой авиации. Это явление также способствует более частому образованию плотных туманов, порывов ветра, шквалов и других опасных явлений. Однако количественные характеристики этих явлений получить достаточно трудно, поскольку они носят локальный характер, редко наблюдаются и чаще всего не фиксируются существующей системой наблюдений.

**Океанологические** характеристики существенно изменяются под воздействием влияния атмосферы, состояния ледяного покрова и взаимодействия между компонентами системы «океан-атмосфера».

В наибольшей степени большая открытость акватории сказалась на увеличении размеров волн. Увеличение разгонов, особенно при северных румбах, привело к увеличению высот и длин ветровых волн и зыби, в том числе и экстремальных, в полтора-два раза [9, 11]. Такой рост резко увеличивает нагрузку на гидротехнические сооружения и ухудшает условия плавания. Следует также отметить такое опасное явление, как ледовый шторм, во время которого лёд под действием волнения может выбрасываться на берег на десятки метров. При этом льдинами срезаются и перемещаются находящиеся на берегу различные предметы и даже отдельные строения. Это явление отмечается на Севере достаточно давно, и противостоять ему крайне сложно. Ледовому шторму благоприятствуют взломы и отрыв от берега припая, которые случаются всё чаще.

Отсутствие ледяного покрова приводит также к некоторому увеличению скорости приливных и дрейфовых течений. Происходит это из-за



прекращения трения перемещающихся в горизонтальной плоскости водных масс о нижнюю поверхность морского льда, которое, как это следует из теории движения жидкости и газа вблизи шероховатых поверхностей [12], в обычных условиях весьма значительно [13], но точные величины изменения скоростей течений пока установить непросто.

В условиях арктических морей увеличение скорости течений влияет на характеристики волнения, вследствие так называемых радиационных напряжений и в некоторых случаях — уровня, что приводит в ряде случаев к увеличению экзарации дна и берегов.

Взаимодействие волн и течений впервые было отмечено в Тихом океане [14], когда измеренные распространяющиеся на встречных течениях все характеристики волнения оказались заметно отличающимися — более, чем в два раза, от волн, образующихся на акваториях без течений. Изменение параметров ветровых волн является следствием обмена энергии между волнами и средними течениями в результате возникающих так называемых радиационных напряжений [15]. С их учётом были построены спектральные теории волнения на течениях [16,17], позволяющие рассчитывать характеристики ветровых волн на течениях. Оказалось, что на встречных течениях волны становятся не только более высокими, но и более крутыми, что значительно увеличивает качку, особенно маломерных судов, повышая тем самым вероятность аварийных ситуаций при распаузе (разгрузке судна-снабженца, стоящего на рейде необорудованного пункта разгрузки, маломерными грузовыми судами). Даже на экстремальные волны сильные течения оказывают влияние, увеличивая их высоту до 15–17 % [18], а эта величина достаточно значима и заметно удорожает строительство гидротехнических сооружений. Получается, что увеличение скоростей течений и разгонов ветровых волн приводит к ещё большему росту высот волн и увеличению крутизны волнения, что ухудшает условия для гидротехнического строительства и плавания судов.

На параметры волнения оказывает влияние и изменение уровня. При его повышении волны на мелководье становятся более высокими, поскольку диссипация энергии из-за трения о дно начинает сказываться позже. Следовательно, в таких районах воздействие волнения на суда и технические сооружения будет более интенсивным, а размыв дна начинаться дальше от берега. С другой стороны, понижение уровня сдвигает зону обрушения волн дальше от берега, что необходимо учитывать при инженерных изысканиях.

В целом же, как показывают исследования ААНИИ [9], в межгодовой изменчивости уровня сохраняется положительная тенденция на большинстве морских станций. В качестве примера приведём данные по станции Амдерма в Карском море (рис. 1), где средний уровень заметно вырос за последние годы.

**Ледовые** условия, а точнее их изменения, являются самыми исследуемыми и обсуждаемыми из всех природных характеристик СЛО и его морей. И это справедливо, поскольку изменение площади и состояния ледяного покрова оказывает влияние на все другие элементы гидрометеорологического режима, а также экологическую ситуацию.

Ледовитость морей российской Арктики в летний период, по которым проходит Северный Морской путь (СМП), начиная с конца 80-х — начала 90-х годов прошлого столетия начала устойчиво уменьшаться [19]. Повышенный фон ледовитости, который наблюдался в период с начала 50-х до конца 80-х годов прошлого столетия, сменился пониженным

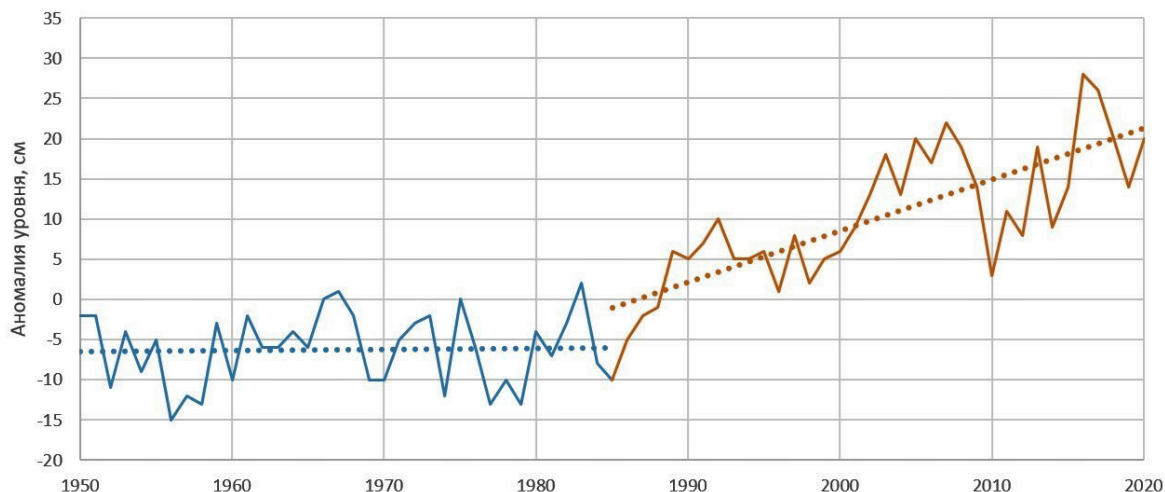


Рисунок 1 – Аномалии среднегодового уровня юго-западной части Карского моря на станции Амдерма.

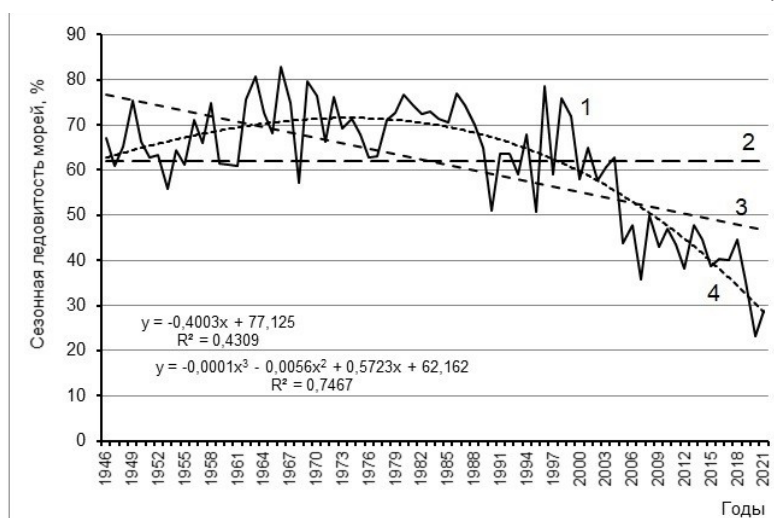


Рисунок 2 – Межгодовые изменения суммарной ледовитости в августе российских арктических морей, по которым проходит трасса СМП  
1 – ряд наблюдений за ледовитостью морей,  
2 – среднее многолетнее значение ледовитости за весь ряд наблюдений,  
3 – линейный тренд,  
4 – аппроксимация полиномом 3-ей степени.

фоном, который наблюдается в настоящее время и носит прогрессирующий характер. На рисунке 2 приведен межгодовой ход суммарной среднемесячной ледовитости четырех арктических морей трассы СМП (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) за август. Изменение суммарной среднемесячной ледовитости хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени со значимым коэффициентом детерминации, составляющим  $R^2=0,72$ . Есть все основания полагать, что в ближайшие годы, а может быть и десятилетия, в связи со значительной инерционностью климатической системы, пониженный фон ледовитости арктических морей сохранится [1, 19].

В многочисленных статьях, анализирующих современное состояние летних ледовых условий на трассах СМП, отмечается ряд существенных изменений в основных чертах ледового режима, особенно проявившихся в период 2000–2020 гг. Например, отмечено более раннее начало таяния ледяного покрова [20], более интенсивное разрушение ледяного покрова в летний сезон, особенно проявляющееся в Карском и Чукотском морях [21], значительное сокращение ледовитости морей за летний сезон [21], увеличение повторяемости полного очищения морей ото льдов [22], значительное уменьшение количества остаточных льдов, сохранившихся после летнего таяния [23, 24], более позднее начало осеннего ледообразования [25].

Однако наметившееся улучшение ледовых условий в целом на трассе СМП вызвало появление целого ряда неблагоприятных локальных ледовых явлений. Под более интенсивным действием тепла, атмосферного, поступающего к верхней поверхности, и океанического, поступающего к нижней поверхности, лёд становится более тонким и менее прочным.

Такой лёд быстрее ломается, легче деформируется, образуя торосы и наслоения, и значительно быстрее переносится ветром и течениями во всех направлениях. При переносе морского льда в южных направлениях могут происходить локальные выносы льдов на судоходные трассы плавания, как правило, в районах проливов и на подходе к ним. Отдельные участки трасс при общем легком фоне ледовых условий в морях становятся непроходимыми для судов на многие сутки. Такие случаи были неоднократно зафиксированы, например, в проливах Карские Ворота и Югорский Шар, на подходах к проливу Вилькицкого и в самом проливе, в проливе Лонга. На рисунке 3 приведена фактическая ледовая обстановка, наблюдавшаяся в середине июля 2015 г., когда отмечались такие случаи.

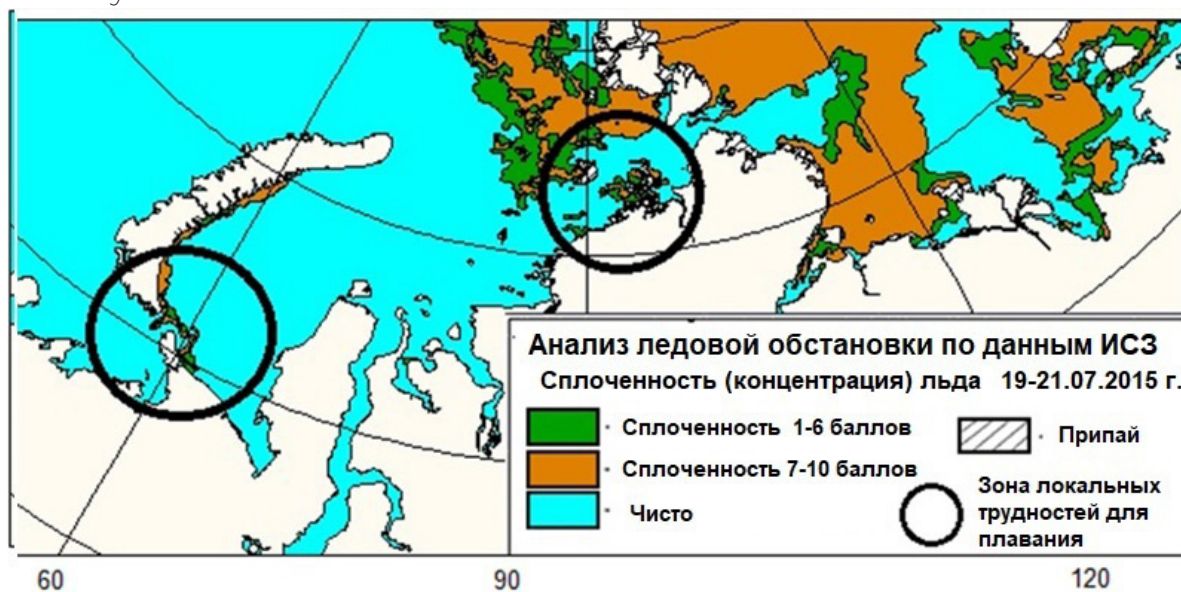


Рисунок 3 – Фактическая ледовая обстановка в Карском море на середину июля 2015 года ([http://old.aari.ru/odata/\\_d0015.php?mod=1](http://old.aari.ru/odata/_d0015.php?mod=1)).

Из приведенного рисунка хорошо видно, что при практически полном очищении юго-западной части Карского моря и очищении прибрежного района плавания в северо-восточной части моря, при переходе ветра к северным направлениям на трассе плавания возникло локальное ухудшение ледовых условий. Непосредственно в пролив Карские Ворота и в прибрежный район плавания в северо-восточной части были вынесены льды различной сплоченности, которые оказались непроходимыми для судов с низкими ледовыми классами.

При устойчивых и длительных изменениях синоптической ситуации на трассу плавания могут перемещаться не только отдельные скопления ледяных полей, но и целые ледяные массивы льда. В таких случаях перекрываются уже не отдельные участки, а акватории морей площадью в тысячи квадратных километров. В результате такого выноса льдов движение по трассе Северного морского пути становилось невозможным на несколько декад, до последующего изменения синоптической обстановки со сменой ветра, которая приводила к улучшению ледовой обстановки. В таблице 1 приведена статистика перекрытия локальных участков и целых районов трассы СМП в наиболее легкие по ледовым условиям годы. В качестве критерия для отнесения года к легким использовалась суммарная ледовитость морей трассы СМП в августе и ранг года по значению ледовитости.

Из приведенных в таблице 1 данных следует, что даже в самые легкие по ледовым условиям годы, на одном-двух локальных участках трасс



сы СМП возникало перекрытие судоходных трасс плавания льдами различной сплоченности. Из 10 самых легких по ледовитости лет, в 9 случаях возникали определенные сложности в ледовой обстановке на локальных участках морей. Наиболее часто это происходит в проливе Вилькицкого и на подходах к нему, в западной части моря Лаптевых и в восточной части Восточно-Сибирского моря.

Среди неожиданно возникших негативных последствий изменения ледового режима арктических морей можно выделить резко возросшую интенсивность ледообразования в арктических морях при более позднем его начале. Позднее начало ледообразования, наблюдающееся в последнее время [25], приводит к тому, что оно начинается почти одновременно на северной границе морей среди остаточных льдов и в прибрежной материковой части, и среди арктических островов. Большая интенсивность ледообразования приводит к тому, что большие акватории морей одновременно покрываются молодыми льдами. Очень быстро начали замерзать проливы арктических морей. Для навигации этот аспект может иметь самые негативные последствия, так как любое судно с низким ледовым классом, ориентированное на плавание в легких ледовых условиях, может попасть в «ледовый плен». Именно такая ситуация возникла осенью 2021 года в восточной части Восточно-Сибирского моря и проливе Лонга. Около 20 различных транспортных судов попали в «ледовый плен» при осуществлении позднего плавания в этих районах. Интенсивное осеннее ледообразование и нарастание льда привело к «ледовому плену» судов, срыву плановых заданий и большим финансовым издержкам [26].

Таблица 1

Локальные районы возникновения обвалов и перекрытий трассы плавания по СМП в годы с наиболее легкими ледовыми условиями

Год	Суммарная ледовитость арктических морей, %	Номер по рангу легкости	Наличие районов, блокированных льдом	Район
2020	25	1	-	-
2019	35	2	1	Восточная часть Восточно-Сибирского моря
2007	36	3	2	Пролив Вилькицкого, Западная часть моря Лаптевых
2012	38	4	1	Восточная часть Восточно-Сибирского моря
2015	39	5	2	Пролив Вилькицкого, Западная часть моря Лаптевых
2017	40	6	1	Пролив Вилькицкого
2016	40	7	1	Море Лаптевых
2009	43	8	2	Пролив Вилькицкого Восточная часть Восточно-Сибирского моря
2011	44	9	1	Западная часть Восточно-Сибирского моря
2005	44	10	1	Пролив Вилькицкого

Ещё одним источником появления опасных плавучих льдов являются ледники на островах СЛО, которые в результате потепления стали более интенсивно разрушаться. В последнее десятилетие наблюдается существенный рост количества обломков и кусков айсбергов, наблюдающихся по трассе СМП, которые фиксируются не только по данным ИСЗ (наиболее крупные из них), но и по данным визуальных наблюдений с борта судов. Кроме этого, отмечается смещение южной границы распространения айсбергов и их обломков к югу, вплоть до береговой черты [27].

С увеличением числа айсбергов и их обломков выросла вероятность столкновения с ними судов и, особенно, стационарных гидротехнических сооружений (буровых платформ, отгрузочных терминалов), которые не могут оперативно переместиться с траектории их движения.

В прибрежной зоне и на мелководье отдельные ледяные образования (стамухи, несяки, торосистые ледяные поля) увеличивают экзарацию морского дна и берегов, что вместе с процессами термоабразии и размыва дна увеличивает риск аварий для судов, сооружений и проложенных по дну коммуникаций.

Несколько слов надо сказать о некоторых негативных сопутствующих явлениях, важных для авиации, и о распространении загрязнения. Более интенсивные турбулентные движения (турбулентный обмен и, что очень важно, «латентный», т.е. связанный с обменом влагой/массой, или попросту испарением) в приводном слое атмосферы часто становятся причиной низкой облачности и туманов, что напрямую ухудшает условия для полётов малой авиации и вертолётов. А это влияет на логистические операции и полёты санитарной авиации. Кроме того, плотные низкие облака играют роль стенки: в возникающем гидроаэродинамическом эффекте происходит резкое усиление ветра, который может стать равным геострофическому, следствием чего становится развитие штормового волнения.

С освоением шельфа тесно связаны экологические проблемы, без учёта которых невозможно проектирование гидротехнических сооружений – они входят в состав инженерных изысканий, и проведение логистических операций – их учёт требуется планами ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН). Отметим наиболее важные из них, только те, которые непосредственным образом влияют на природную среду.

Увеличение открытого водного пространства влечёт за собой существенно большее загрязнение морской поверхности нефтяными углеводородами при аварийных разливах на терминалах, трубопроводах и танкерах. Площадь загрязнения под влиянием ветра, течений и загрязнённых льдов может достигать сотен и даже тысяч квадратных километров морской акватории и побережья.

Сокращение площади ледяного покрова существенно осложняет существование и жизнедеятельность моржей и тюленей, которые теряют места лежбищ, и белых медведей, которым приходится испытывать трудности в привычных местах обитания и при миграциях. Эти явления вносят существенные ограничения в хозяйственную деятельность и заставляют принимать более жёсткие природоохранные меры, а также более тщательно подходить к выбору места размещения промышленных и транспортных объектов.

## Заключение

В целом условия для работ на арктическом шельфе и логистических операций в морях Российской Арктики за последние три десятилетия, несомненно, улучшились, что подтверждается устойчивым уменьшением ледовитости морей. Однако вместе с этим возникли новые риски и неожиданные осложнения, вопреки всем оптимистичным ожиданиям. Вызвано это в первую очередь возможным быстрым смещением сплошных льдов («обвалов» льдов) на отдельные участки судоходных трасс и проливы, интенсивным ледообразованием в осенний сезон и существенно увеличившимся ветровым волнением. Также увеличились нагрузки на надводные, подводные и зарытые гидротехнические сооружения от воздействия штормового ветра, течений и волнения. Количественные оценки этих явлений можно получить по соответствующим моделям, что позволит провести районирование трассы СМП по возможным опасным гидрометеорологическим явлениям, возникающим при наблюдаемом изменении климатических условий.

## Список литературы:

1. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т.1. С.11-26.
2. Байдин А.В., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Говоркова В.А. Изменяется ли усиление потепления в Арктике при сокращении ледяного покрова? // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2016. № 582. С. 214-229.
3. Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений. // Российская Арктика, 2019. № 7, С. 28–41.
4. Жилина И.Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски. // Экономические и социальные проблемы России. 2021, № 1 (45), с. 66-87.
5. Тутыгин А.Г., Антипов Е.О., Коробов В.Б. Проблемы моделирования логистических операций в Арктической зоне Российской Федерации. – Архангельск: КИРА, 2020. – 244 с.
6. Антипов Е.О., Григорян М.Г., Коробов В.Б., Фильчук К.В., Юлин А.В. Исследование влияния природных условий на оптимизацию северного завоза в морях Российской Арктики. // Логистика и управление цепями поставок, 2021, № 2-3 (103), с. 24-28.
7. Руководство по терминологии и оценке специализированных гидрометеорологических прогнозов. – М.: 2004, 56 с.
8. Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянов С.А., Никифоров Л.Г. Берега. – М.: Мысль, 1991, 479 с.
9. Моря российской Арктики в современных климатических условиях. – СПб.: ААНИИ, 2021, 360 с.
10. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л. Аномальная эмиссия метана на арктическом шельфе: проблемы потепления климата и безопасного освоения ресурсов в Арктике. // Арктические ведомости, 2013, № 3 (7), с. 94-98.
11. Мысленков С.А., Платонов В.С., Сильвестрова К.П., Добролюбов С.А. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования. // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2021, т. 498, № 2, с. 175-182.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987, 840 с.
13. Дебольская Е.И. Динамика водных потоков под ледяным покровом. – М.: Издательство Московского государственного университета природообустройства. 2003. 263 с.
14. Бигелу Г., Эдмондсон В. Морские ветровые волны и прибой. – М.: Издательство «Иностранная литература», 1951, 212 с.
15. Longuet-Higgins M., Stewart R. Changes in the form of short gravity waves on long wave and tidal currents. // J. Fluid Mech., 1960, № 8, p. 565-583.
16. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1998, 400 с.
17. Tolman H. L. A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents // J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. P. 782—797.

18. Коробов В.Б., Лавренев И.В. Оценка влияния приливных течений на функции распределения высот ветровых волн. // Метеорология и гидрология, 1989, № 11, с. 73-80.
19. Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова, Евразийских арктических морей и их возможные причины. // Метеорология и гидрология, 2005, № 6. – С. 5-14.
20. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.: Изд-во ИГ-СО-ЦИН, 2017, с. 640.
21. Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А., Шаратунова М.В., Хотченков С.В. Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических морей в современном климатическом периоде. // Труды ГОИН, М., 2019, № 220, С 44-60
22. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997-2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб, 2019, том 65, № 3, С. 328-340.
23. Виноградная Е.С., Егорова Е.С., Шевелева Т.В., Юлин А.В. Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде. // Российская Арктика, 2020. № 2 (9), С. 41–55.
24. Егоров А.Г. Пространственное положение кромки льдов в августе – сентябре в восточных морях России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2020, №1 (66), С. 38-55
25. Егоров А.Г. Летняя кромка льдов и осенние сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в период 1981-2018 гг. // Лёд и снег. 2021. № 61(1). С. 117-127. URL: <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075>
26. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Макаров Е.И., Юлин А.В., Афанасьева Е.В. Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых прогнозов // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 40-53. DOI:10.24412/2658-4255-2021-4-40-53
27. Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Миронов Е.У., Смоляницкий В.М. Особенности распределения айсбергов по данным судовых наблюдений в Карском море в 2004-2019 гг. // Российская Арктика, 2020. № 10, С. 30-36.

## References:

1. Alekseev G.V. Development and amplification of global warming in the Arctic. // *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, 1: pp. 11-26 (In Russian)
2. Baydin A.V., Meleshko V.P., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Izmenyayetsya li obnaruzheniye potepeniya v Arktike pri sokrashchenii ledyanogo pokrova? // *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 2016, № 582. pp. 214-229. (In Russian).
3. Yulin A.V., Vyazigina N.A., Yegorova Ye.S. Mezhhodovaya i sezonnaya izmenchivost' ploshchadey v Severnom Ledovitom okeane po dannym sputnikovykh nablyudeniy. // *Rossiyskaya Arktika*, 2019, 7: pp. 28-41. (In Russian).
4. Zhilina I.YU. Potepeniye v Arktike: vozmozhnosti i riski. // *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye problemy Rossii*, 2021, 1 (45): pp. 66-87. (In Russian).
5. Tutygin A.G., Antipov Ye.O., Korobov V.B. Problemy modelirovaniya logisticheskikh operatsiy v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii. – Arkhangel'sk: KIRA, 2020, 244 p. (In Russian).
6. Antipov Ye.O., Grigoryan M.G., Korobov V.B., Fil'chuk K.V., Yulin A.V. Issledovaniye prirodnykh usloviy po optimizatsii severnogo zavoza v moryakh Rossiyskoy Arktiki. // *Logistika i upravleniye tsepyami predlozheniy*, 2021, 2-3 (103): pp. 24-28. (In Russian).
7. *Rukovodstvo po terminologii i spetsializirovannym gidrometeorologicheskim prognozam.* – Moskva, 2004, 56 p. (In Russian).
8. Kaplin P.A., Leont'yev O.K., Luk'yanov S.A., Nikiforov L.G. Berega. – Moskva: Mysl', 1991, 479 p. (In Russian).
9. *Morya rossiyskoy Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh.* – St.Petersbug: AARI, 2021, 360 p. (In Russian).
10. Lobkovskiy L.I., Nikiforov S.L. Anomal'naya emissiya metana na arkticheskom shel'fe: problemy potepeniya klimata i bezopasnogo osvoyeniya resursov v Arktike. // *Arkticheskiye vedomosti*. 2013, 3 (7): pp. 94-98. (In Russian).
11. Myslenkov S.A., Platonov V.S., Sil'vestrova K.P., Dobrolyubov S.A. Rost shtormovoy aktivnosti v Karskom more s 1979 po 2019 g. po dannym modelirovaniya. // *Doklady Rossiyskoy Akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2021, 498 (2): pp. 175-182. (In Russian).
12. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza, 1987, 840 p. (In Russian).
13. *Debol'skaya Ye.I. Dinamika vodnykh potokov pod ledyanym pokrovom.* – Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta prirodoobustroystva, 2003, 263 p. (In Russian).

14. Bigelou G., Edmondson V. Morskiye vetrovyye volny i priboy. – Moskva: Izdatel'stvo «Inostrannaya literatura», 1951, 212 p. (In Russian).
15. Longuet-Higgins M., Stewart R. Changes in the form of short gravity waves on long wave and tidal currents. // J. Fluid Mech., 1960, 8: pp. 565-583.
16. Lavrenov I.V. Matematicheskoye modelirovaniye vetrovogo volneniya v neodnorodnom okeane. – St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, 400 p. (In Russian).
17. Tolman H. L. A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents // J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. pp. 782-797.
18. Korobov V.B., Lavrenov I.V. Otsenka analiza prilivnykh techeniy po funktsii raspredeleniya vysot vetrovykh voln. // Meteorologiya i gidrologiya., 1989, 11: pp. 73-80. (In Russian).
19. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Frolov I.Ye. Vnutrivenkovyye izmeneniya klimata, ploschad' ledyanogo pokrova, Yevraziyskikh arkticheskikh morey i ikh vozmozhnyye prichiny. // Meteorologiya i gidrologiya., 2005, 6: pp. 5-14. (In Russian).
20. Dumanskaya I.O. Ledovyye usloviya morey aziatskoy chasti Rossii. Moskva: Izdatel'stvo IG-SOTSIN, 2017: 640 p. (In Russian).
21. Yulin A.V., Timofeyeva A.B., Pavlova Ye.A., Sharatunova M.V., Khotchenkov S.V. Mezhhodovaya i sezonnaya izmenchivost' ledovitosti rossiyskikh arkticheskikh morey v sezonnom klimaticheskom periode. // Trudy GOIN, 2019, 220: pp. 44-60 (In Russian).
22. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997-2018 гг. // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2019, 65 (3): pp. 328-340. (In Russian).
23. Vinogradnaya Ye.S., Yegorova Ye.S., Sheveleva T.V., Yulin A.V. Izmenchivost' polozheniya granits l'dov v vesenniy period i ostatochnykh l'dov v osenniy period v Severnom Ledovitom okeane v usloviyakh klimaticheskogo perioda. // Rossiyskaya.Arctica, 2020, 2 (9): pp. 41-55. (In Russian).
24. Yegorov A.G. Prostranstvennoye polozheniye kromki l'dov v avguste – sentyabrya v vostochnykh moryakh Rossii v nachale XXI v. // Problemy Arktiki i Antarktiki, 2020, 1 (66): pp. 38-55 (In Russian).
25. Egorov A.G. Positions of the summer ice edge and autumn dates of stable ice formation in the Laptev, East-Siberian and Chukchi seas in 1981-2018 // Ice and Snow., 2021, 61(1): pp. 117-127. (In Russian). Available at: <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075>
26. Mironov Ye.U., Klyachkin S.V., Makarov Ye.I., Yulin A.V., Afanasyeva E.V. Sea ice processes in the Russian Arctic seas in autumn of 2021 and estimation of ice forecasts accuracy. // Rossiyskaya.Arctica. 2021. № 15. С. 40-53. DOI:10.24412/2658-4255-2021-4-40-53
27. Pavlova Ye.A., Alekseyeva T.A., Mironov Ye.U., Smolyanitskiy V.M. Osobennosti raspredeleniya aysbergov po dannym sudovykh volokon v Karskom more v 2004–2019 gg. // Rossiyskaya Arktika, 2020, 10: pp. 30-36. (In Russian).