

## Влияние климатических изменений уровня режима Баренцева моря на портовое гидротехническое строительство

Долгушев Т. В.<sup>1</sup>, аспирант (НИУ МГСУ)

Рассматривается эксплуатация морских портовых гидротехнических сооружений в Арктическом регионе РФ. В настоящее время активно развивается морская транспортная инфраструктура Арктического региона, в котором, по данным IPCC, наиболее сильно проявляются последствия глобального изменения климата, которые на данный момент не учитываются при проектировании ПГТС. Анализ результатов моделирования климатических изменений для глобального среднего уровня моря и региональных моделей Баренцева моря показал существенное изменение уровня отметок для ПГТС Арктического региона к 2100 г. Уровень Баренцева моря для прогнозов по сценарию SSP5-8.5 изменится от 68 см для Мурманска до 112 см для Индиги, что ведёт к росту гидростатической и волновой нагрузок, а также увеличивает риск аварийных ситуаций. Учёт прогнозных климатических изменений при проектировании ПГТС позволит снизить риск аварий в период жизненного цикла объекта, а также сократит эксплуатационные издержки благодаря отсутствию необходимости в капитальной реконструкции, вызванной необходимостью восприятия запроектированных нагрузок.

**Ключевые слова:** изменения климата, повышение уровня моря, гидротехническое строительство, портовые сооружения.

## The influence of climatic changes in the Barents Sea level regime on port hydraulic engineering

Dolgushev T. V.<sup>1</sup>, PhD student (NRU MGSU)

The article discusses the operation of seaport hydraulic structures in the Arctic region of the Russian Federation. Currently, the maritime transport infrastructure of the Arctic region is actively developing, in which, according to the IPCC, the effects of global climate change are most strongly manifested, which, at the moment, are not taken into account when designing the PGTS. The analysis of the results of climate change modeling for the global mean sea level and regional models of the Barents Sea showed a significant change in the level marks for the Arctic region by 2100. The level of the Barents Sea for forecasts under the SSP5 – 8.5 scenario varies from 68 cm for Murmansk to 112 cm for Indiga, which leads to an increase in hydrostatic and wave loads, and also increases the risk of emergencies. Taking into account the forecast climatic changes in the design of PGTS will reduce the risk of accidents during the life cycle of the facility, as well as reduce operating costs, due to the absence of the need for major reconstruction caused by the need to perceive beyond design loads.

**Keywords:** climate change, sea level rise, hydraulic engineering, port facilities.

В настоящее время идёт активное освоение ресурсного потенциала Арктической зоны РФ (АЗРФ). Это связано с добычей как углеводородного сырья, так и минеральных ресурсов, таких, как апатиты, уголь, кобальт, золото, редкоземельные металлы и т.д. [1, 2]. Данный факт обуславливает необходимость развития морской транспортно-логистической инфраструктуры, а, следовательно, портовых гидротехнических сооружений (ПГТС) Северного морского пути (СМП). При этом средний темп изменений климата в Арктике превышает глобальный средний уровень в 2,5 раза [3].

Учёт прогнозных климатических изменений при проектировании портовых гидротехнических сооружений становится необходимостью. В зависимости от класса капитальности жизненный цикл гидротехнических сооружений может достигать 100 лет [4]. Так как естественным причинам изме-

нения климата характерен большой временной масштаб, не сопоставимый с жизненным циклом ПГТС, то они оказывают незначительное влияние на эксплуатацию сооружений. В отличие от естественных причин, антропогенное воздействие на изменение климата приводит к увеличению скорости изменений, следовательно, появляется необходимость реагировать на новые вызовы, чтобы обеспечить нормальную эксплуатацию ПГТС. Внесение изменений в характеристики объекта на этапе эксплуатации связано с более значительными капитальными затратами, нежели при проектировании, в связи с этим более рациональным и экономичным решением будет учёт прогнозных изменений климата именно на этапе проектирования сооружений.

**Развитие транспортной инфраструктуры в Арктике.** Стратегия развития АЗРФ направлена на активное освоение этого региона, к которому, благодаря активной работе научного сообщества РФ, за последние десятилетия планируется присоеди-

---

<sup>1</sup> dolgushew@yandex.ru



Рис. 1. Объёмы грузоперевозок по СМП в период с 1933 по 2035 г. [8 – 14]

нить значительные территории [5]. Развитие региона, помимо прочего, включает в себя строительство транспортной инфраструктуры, связанной как с железнодорожными, так и с морскими грузоперевозками [6].

Наблюдаемые климатические изменения носят в АЗРФ повсеместный характер и проявляются наиболее интенсивно по сравнению с другими регионами планеты. Сокращение площади арктических льдов создаёт благоприятные условия для освоения ресурсного потенциала региона, однако наблюдаются и негативные процессы: деградация зоны вечномёрзлых грунтов, увеличение штормовой активности, рост числа айсбергов и т.д. [7]. Все эти факторы в совокупности позволили Правительству РФ подписать ряд документов [8, 9], определяющих значительное развитие АЗРФ и СМП. В результате реализации принятой стратегии [10 – 14] ожидается увеличение грузооборота по СМП к 2035 г. до 130 млн. т, что превышает уровень 2021 г. более чем в 3,5 раза (рис. 1).

Рост объёма грузоперевозок вызовет увеличение нагрузки на портовую инфраструктуру, вклю-

чая не только реконструкцию и модернизацию существующих сооружений, но и строительство новых. Например, проекты Арктик СПГ 1, 2, 3 и Обского СПГ в Ямало-Ненецком автономном округе и строительство Северного широтного хода, обеспечивающего железнодорожное соединение с портом Сабетта, строительство “Центра строительства крупнотоннажных морских сооружений” и “Морского перегрузочного комплекса сжиженного природного газа” в районе г. Мурманска.

Северный морской путь исторически является транспортной артерией, обслуживающей порты Арктики и крупных рек Сибири. Основными ввозимыми грузами являются топливо, оборудование и продовольствие, а основными вывозимыми – лес и природные ископаемые. Реализуемые сейчас проекты призваны изменить существующее распределение грузов в сторону увеличения доли транспортируемого СПГ (сжиженного природного газа) в связи с ростом объёма грузоперевозок. По данным Росатома, за шесть лет с момента начала производства СПГ в 2014 г. его доля в общем объёме грузоперевозок превысила 55 % (рис. 2).

Перспективность развития СМП как транспортного маршрута обусловлена в первую очередь сокращением дальности возки грузов. Так, для транспортировки грузов из Мурманска в Йокагаму при использовании СМП расстояние по сравнению с маршрутом через Суэцкий канал будет более чем в 2 раза меньше. Однако, несмотря на значительное сокращение пути при транспортировке грузов из портов Балтийского и Баренцева морей, географическое расположение СМП накладывает существенные ограничения на грузоперевозки. Основными ограничивающими факторами являются требования к ледовому классу судов и относительно небольшой период навигации.

Активное развитие ледокольного флота в арктических морях, а также широкое распространение

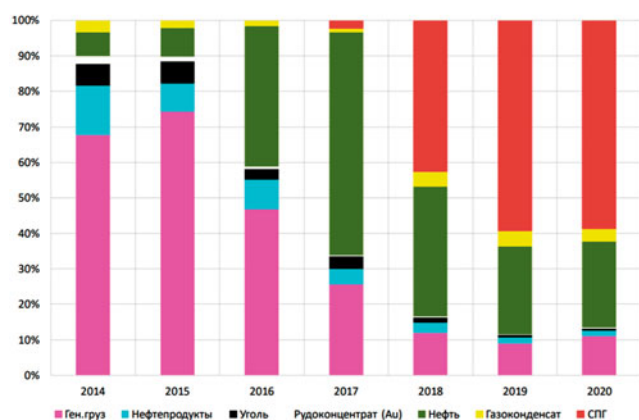


Рис. 2. Доли видов грузов в импортно-экспортных и каботажных перевозках [15]

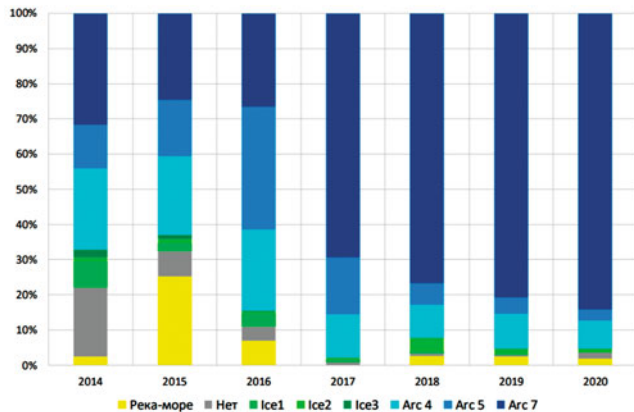


Рис. 3. Доли судов различных ледовых классов при осуществлении импортно-экспортных и каботажных перевозок [15]

судов повышенного ледового класса Arc7 (рис. 3), способных осуществлять самостоятельное плавание в зимне-весеннюю навигацию при толщине льда до 1,4 м, позволяют нивелировать значимость данной проблемы. Некоторые исследования говорят о возможности безледокольной навигации судов ледового класса Arc7 в ближайшее десятилетие в ряде районов восточной Арктики в зимне-весенний период [16].

**Климатические изменения площади арктического льда.** Арктический морской лёд достигает своего минимума каждый сентябрь. Сентябрьский арктический морской лёд в настоящее время сокращается со скоростью 13 % за десятилетие по сравнению со средним показателем за период с 1981 по 2010 г. На рис. 4 показано изменение площади морского льда в Арктике по данным наблюдений в период с 1 января 1979 г. по 2022 г. На рис. 5 показана ежемесячная апрельская ледовитость с 1979 по 2022 г. по данным NSIDC (The National Snow and Ice Data Center / Национальный центр обработки

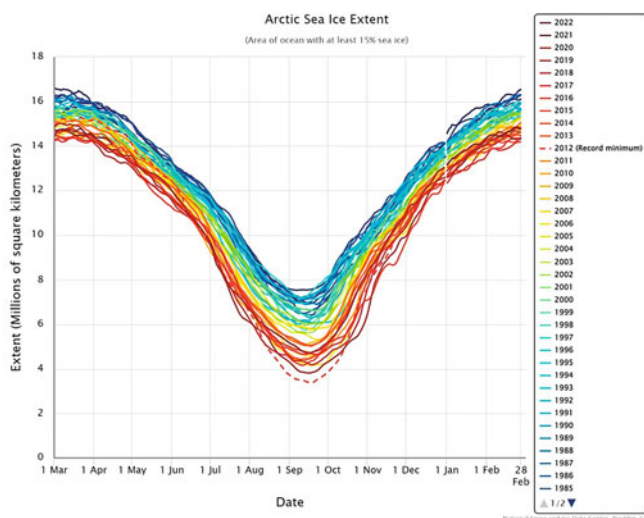


Рис. 4. Площадь морского льда в Арктике по данным наблюдений в период с 1979 по 2020 г., а также данные до 5 декабря 2021 г. [17]

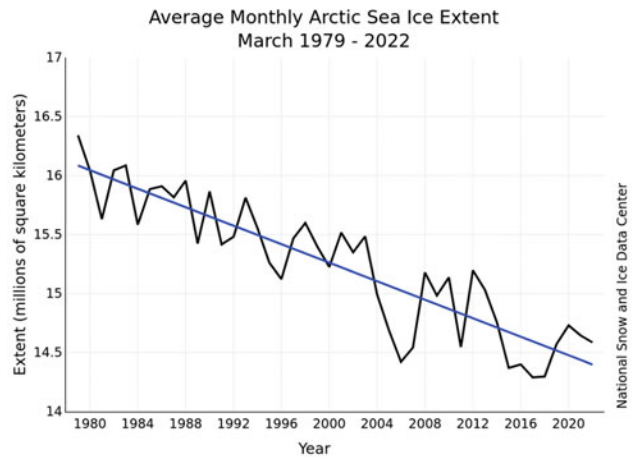


Рис. 5. Ежемесячная мартовская протяженность льда с 1979 по 2022 г. показывает снижение на 2,5 % за десятилетие. График подготовлен NSIDC [18]

данных о снеге и льде). Линейный тренд снижения площади морского льда в марте составляет 2,5 % за десятилетие по сравнению со средним показателем за период с 1981 по 2010 г. Таким образом, происходит уменьшение площади многолетнего льда в зимний период, что приведёт к снижению ледовой нагрузки в зимний период.

Площадь морского льда в Арктике по данным климатического моделирования, представленным в докладах IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change / Межправительственная группа экспертов по изменению климата), говорит о значительном сокращении площади арктических морских льдов. При этом некоторые сценарии показывают возможность полного освобождения региона от льда в летний период уже во второй половине XXI в. [19]. На рис. 6 и 7 показаны графики, представленные в отчётах IPCC за 2014 и 2019 гг. [20, 21], которые иллюстрируют тенденцию сокращения площади арктического льда по оптимистичному и реалистичному вариантам.

Однако всего за пять лет становится очевидным, как изменилось понимание процесса сокращения площади арктических льдов при одних и тех

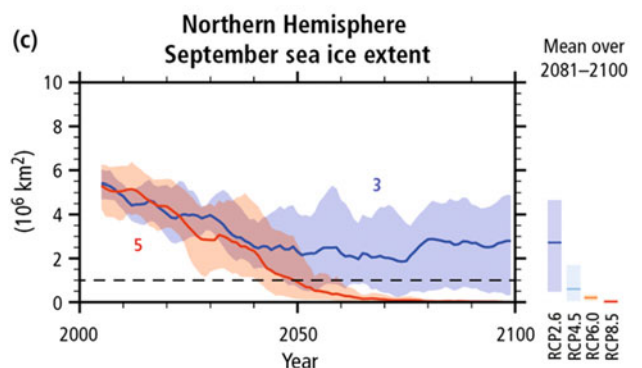


Рис. 6. Распространение арктических морских льдов в сентябре [20]



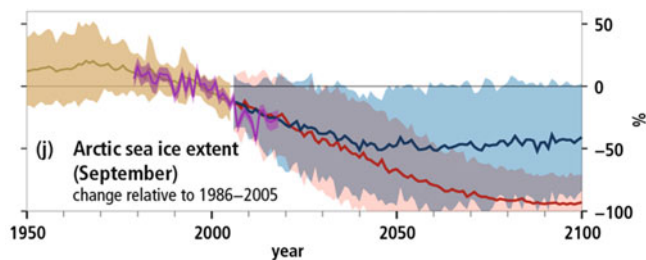


Рис. 7. Распространение арктических морских льдов в сентябре [21]

же сценариях. На рис. 6 дан достаточно агрессивный сценарий, медианная кривая сценария RCP8.5 которого показывает полное отсутствие в сентябре льда в 2070 – 2080 гг., с наиболее ранним, в рамках доверительного интервала (5 – 95 % повторяемости в распределении значений, полученных по отдельным моделям (затенение)), наступлением безледного сентября примерно в 2050 г. На рис. 7 при том же сценарии показана более оптимистичная медианная оценка, которая даже к концу века не прогнозирует полное освобождение ото льда. При этом, по данным 2019 г. (рис. 7), в рамках доверительного интервала срок наиболее раннего полного освобождения Арктики ото льда уменьшился примерно до 2040 г. Такие отличия обусловлены значительным развитием климатических моделей и появлением дополнительных пяти лет натурных наблюдений.

При моделировании прогнозных изменений климата для региона Баренцева моря в ИО им. Ширшова РАН получили результаты, которые подтверждают описанные выше тенденции (рис. 8 и 9). Согласно результатам проведённого моделирования, продолжительность ледового периода, рассматриваемого как количество суток в году, когда

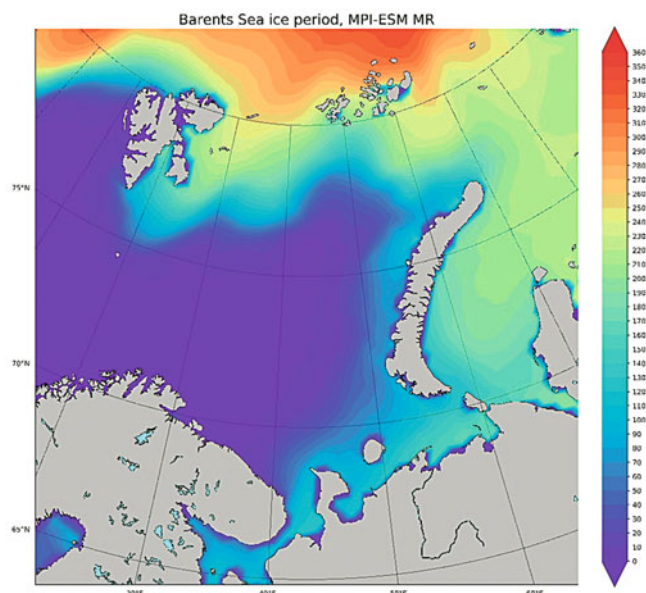


Рис. 8. Изополе продолжительности покрытия льдом Баренцева моря по сценарию RCP8.5 на 2039 г. [22]

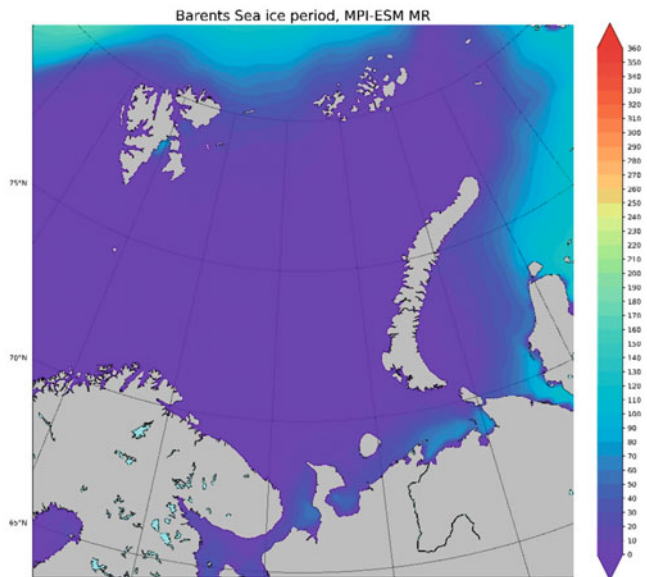


Рис. 9. Изополе продолжительности покрытия льдом Баренцева моря по сценарию RCP8.5 на 2099 г. [22]

концентрация льда в области составляла более 15 %, по сценарию RCP8.5 в 2039 г. большая часть судоходных районов Баренцева моря будет свободна ото льда круглогодично. К 2099 г. для данного сценария свободной ото льда в течение всего года будет вся территория Баренцева, Печорского и Белого морей, за исключением небольших участков образования припайного льда.

Результаты регионального моделирования и данные, представленные в отчётах IPCC, говорят об увеличении площади, свободной ото льда в Северном ледовитом океане, и уменьшении ледового сезона. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что среднегодовое альbedo поверхности Северного ледовитого океана сократится. В связи с этим неизбежен рост теплосодержания океана.

**Климатические изменения уровня моря.** Климатические изменения уровня моря, а именно повышение среднего уровня моря, вызваны преимущественно двумя основными факторами:

1) убылью массы ледникового покрова Гренландии, Антарктики и прочих ледников;

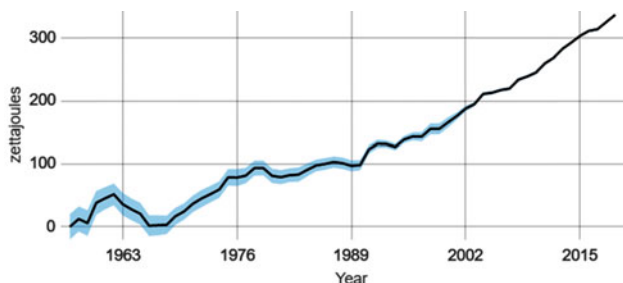


Рис. 10. Изменение теплосодержания океана с 1955 г. (NOAA) [23]

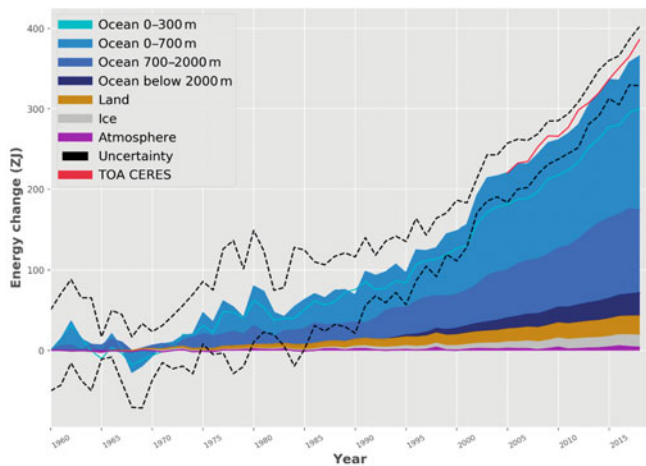


Рис. 11. Инвентаризация тепла Земли (накопление энергии) в ЗДж (1 Здж = 1021 Дж) для компонентов климатической системы Земли относительно 1960 г. [24]

2) стеродинамическими изменениями уровня, вызванными переменами циркуляции океана (течений) и его климата (температуры и солёности).

Именно влияние сокращения площади арктических льдов, в результате которого повышается количество поглощаемого океаном тепла (рис. 10), приводит к возникновению второго фактора. Около 90 % излишнего тепла, поступающего в результате радиационного дисбаланса, накапливаются океанические воды (рис. 11) благодаря тому, что океаническая теплоёмкость значительно превышает атмосферную и лишь небольшая часть, около 2 %, избыточного тепла затрачивается на нагрев атмосферы.

Аккумуляция энергии в глобальном океане влечёт за собой повышение температуры океанических вод, вследствие этого возникает температурное расширение.

Первый фактор повышения уровня моря представляет собой добавление воды в мировой океан в результате таяния ледяных щитов Гренландии, Антарктики и ледников. Более значительное уменьшение льдов наблюдается у ледяного щита Гренландии, для которого потеря массы с 2002 г. составила 5100 млрд. т, в то время как для ледяного щита Антарктиды эта величина составила 2700 млрд. т.

Совокупность двух основных и ряда менее значимых факторов определяет повышение глобального среднего уровня моря (ГСУМ) (рис. 12). В отчётах ИРСС говорится именно о ГСУМ, однако, как и со льдами, с дополнением имеющихся моделей новыми данными, полученными в результате исследований в различных направлениях и полученными данными натурных наблюдений, прогнозный рост уровня моря претерпевает изменения.

Уровень мирового океана представляет собой высоту свободной водной поверхности невзволнованных океанов и морей, близкой по форме к геоиду [25]. В связи с активным развитием систем мониторинга в последние десятилетия появилась возможность получать непрерывные ряды наблюдений не только за отметкой поверхности мирового океана, но и за температурой воды, солёностью и прочими. При этом для оценки, наблюдения и прогноза ГСУМ используются следующие методы.

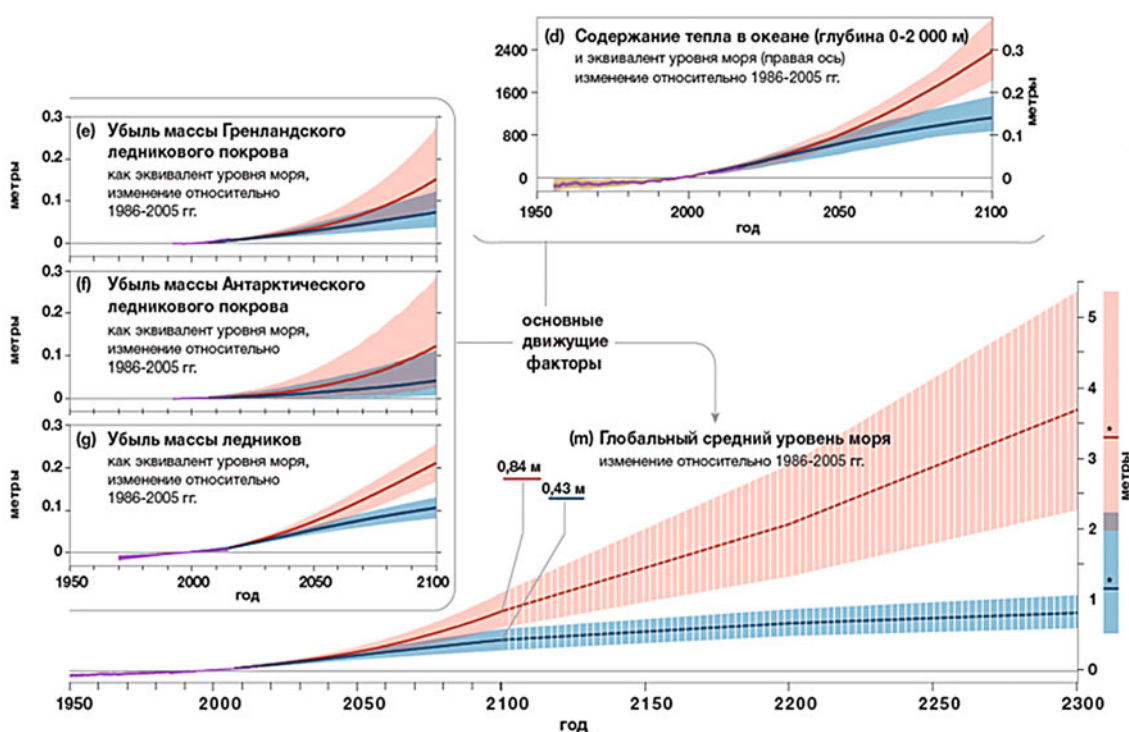


Рис. 12. Наблюдаемые и моделируемые исторические изменения в океане и криосфере с 1950 г., а также проекции будущих изменений в рамках сценариев низких (RSP2.6) и высоких (RSP8.5) выбросов парниковых газов [21]



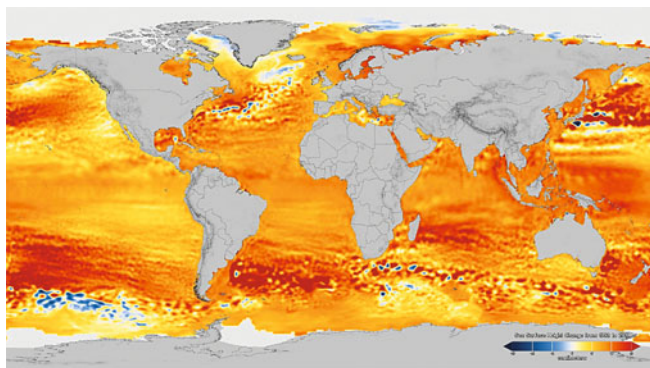


Рис. 13. Изменение высоты поверхности моря с 1993 по 2019 г. с помощью спутниковой альтиметрии по данным NASA [27]

- Оценка на основе косвенных данных, таких, как донные отложения морей, благодаря которым, с известной степенью достоверности, реконструируется ход уровня, близкий к глобальному на периоды сотен и тысяч лет назад [26].
- С конца XIX в. наблюдения ГСУМ ведутся с помощью мареографов, отличительной особенностью которых является получение данных в береговой зоне.
- В 70-х гг. XX в. появились методы спутниковой альтиметрии, которые, благодаря выведенным на околоземную изомаршрутную орбиту Земли спутникам, могут проводить постоянные измерения ГСУМ с помощью радиовысотометров. Изомаршрутная спутниковая съёмка подразумевает изменение положения спутника относительно поверхности земли с постоянной величиной, т.е. осуществление “витков” вокруг планеты с постоянным смещением, благодаря чему наблюдения ведутся над всей поверхностью планеты с продолжительностью одного цикла около 10 суток. Первые наблюдения с помощью данного метода датируются 1993 г., поскольку только в 1992 г. по программе TOPEX/Poseidon на орбиту был выведен первый подобный спутник, в 2001, 2008 и 2016 гг. — последующие спутники данной программы “Jason-1”, “Jason-2” и “Jason-3” соответственно.
- Прогнозирование будущих изменений климатической системы на основе уже имеющихся данных с помощью климатических моделей. Важной особенностью моделирования является отсутствие точных данных о будущем антропогенном воздействии, вследствие чего для моделирования используются сценарные подходы, отражающие различные траектории развития человечества.

Сопоставление сценариев Representative Concentration Pathway (RSP) и Shared Socioeconomic Pathways (SSP) показывает, что наблюдается устойчивая динамика к “утяжелению” сценариев в

части выбросов  $\text{CO}_2$  и последствий изменения климата. При сопоставлении прогнозных данных роста уровня моря в отчётах IPCC 2014 и 2019 гг. также наблюдается тенденция к изменению оценки в сторону ухудшения.

При выходе пятого оценочного доклада IPCC в 2013 – 2014 гг. были обозначены следующие средние значения повышения уровня моря относительно 1986 – 2005 гг.: в RSP2.6 – 40 см, в RSP8.5 – 63 см. В 2019 г. (через пять лет) в опубликованном специальном докладе IPCC об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата среднее значение роста глобального среднего уровня моря для сценария RCP2.6 составило 43 см, т.е. повысилось на 7,5 %, а вот для RCP8.5 – 84 см, т.е. на 33,3 % больше. Такое значительное изменение верхней границы прогнозного ГСУМ связано с переоценкой тренда его изменения.

Спутниковые данные показали, что средний уровень моря с 1993 г. изменялся со скоростью ~3 мм/год. Однако наблюдается ускорение на уровне 0,084 мм/год<sup>2</sup>. Это хорошо согласуется с прогнозами климатических моделей. Если уровень моря будет продолжать меняться такими темпами и с ускорением, повышение уровня моря к 2100 г. (~65 см) будет более чем в 2 раза больше по сравнению с постоянной скоростью 3 мм/год.

Темпы повышения ГСУМ за 2006 – 2015 гг. — 3,5 мм/год являются беспрецедентными за последнее столетие и примерно в 2,5 раза превышают темпы роста за 1901 – 1990 гг. — 1,4 мм/г – 2015 гг. является доминирующим источником повышения уровня моря — 1,8 мм/год по сравнению с эффектом теплового расширения вод океанов — 1,4 мм/год.

Однако ГСУМ не позволяет достоверно оценить региональные особенности (рис. 13), которые столь важны для принятия решений в рамках проектирования конкретного порта. В связи с этим получило широкое распространение решение локальной задачи прогнозирования климата в рамках одного региона.

Рассмотрим региональные особенности роста уровня моря на примере данных, полученных Институтом океанологии им. Ширшова РАН [22]. Эти данные были получены при анализе климатических изменений Баренцева моря и являлись второстепенными по отношению к таким характеристикам, как температура, солёность, волнение и ветер в данном регионе. Эти данные были получены с использованием климатических моделей: MPI-ESM-MR (модель климатической системы Земли, созданная в Метеорологическом подразделении Института Макса Планка, Гамбург, Германия); HadGEM2-ES (модель климатической системы Земли, разработанная в Гидрометеорологической службе Соединенного Королевства, UK

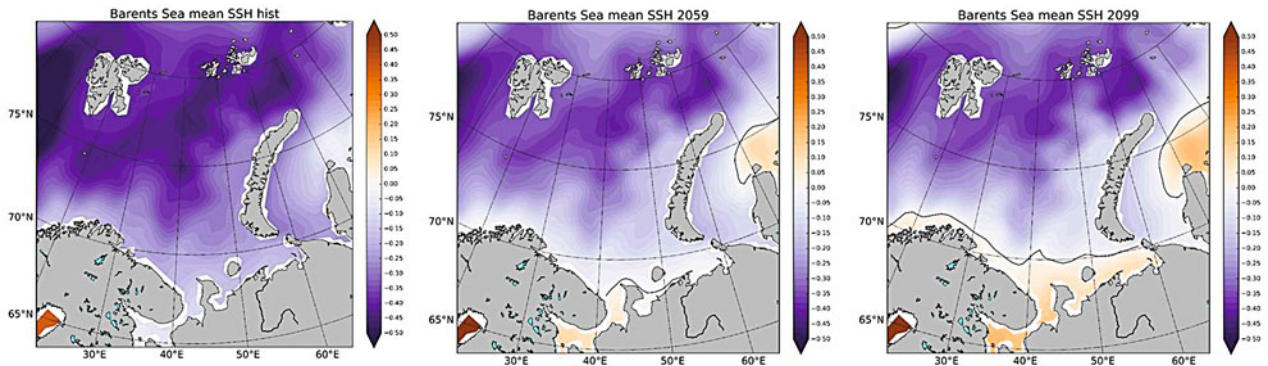


Рис. 14. Изополя, показывающие уровень моря в районе Баренцева моря: слева — исторический период с 1979 по 2005 г.; по центру — прогнозные значения на 2059 г. по сценарию RCP8.5; справа — прогнозные значения на 2099 г. по сценарию RCP8.5 [22]

MetOffice, Рединг, Великобритания); CCSM4 (глобальная климатическая модель, разработанная Университетской корпорацией атмосферных исследований, США). Модели отбирались по наиболее точному моделированию описанных выше параметров. В результате на рис.14 мы наблюдаем ярко выраженное изменение уровня в области Белого и Печорского морей, т.е. в зоне расположения транспортной инфраструктуры Северного морского пути.

В рамках сценариев низких (RSP2.6) и высоких (RSP8.5) выбросов парниковых газов уровень моря будет расти в данном регионе. Минимальный уровень, наблюдаемый в северной части БМ в базовом периоде, вырастет от  $-0,5$  до  $-0,3$  м по данным RCP8.5. Согласно сценарию RCP8.5, к концу XXI в. прогнозируется переход уровневой отметки через 0 в область положительных значений в южной части БМ, с максимальными значениями до  $+0,2$  м в Белом море и Чёшской губе. В районе Чёшской губы сейчас идёт активная фаза проектирования порта Индига с расчётным грузооборотом 80 млн. т и перспективой увеличения до 120 млн. т к 2035 г.

Однако, несмотря на то что данные глобальных и региональных модельных расчётов показывают тенденцию к росту уровня моря, их величина значительно отличается. На региональной модели для Баренцева моря прогноз изменения уровня моря составляет порядка 20 см к концу века при сценарии RCP8.5, хотя в отчёте IPCC указана величина 84 см. Данное расхождение полученных результатов может быть объяснено сопоставлением данных трёх моделей оптимальных не для данного параметра и ансамбля моделей.

С получением новых натуральных данных и улучшением климатических моделей в отчётах IPCC наблюдается тенденция к увеличению прогнозного приращения уровня моря. При этом в ряде исследований отмечается, что фактический рост уровня моря превышает даже самые пессимистичные прогнозы (максимальное значение для сценария RCP8.5  $\approx 110$  см) и может достичь 135 см [28]. В

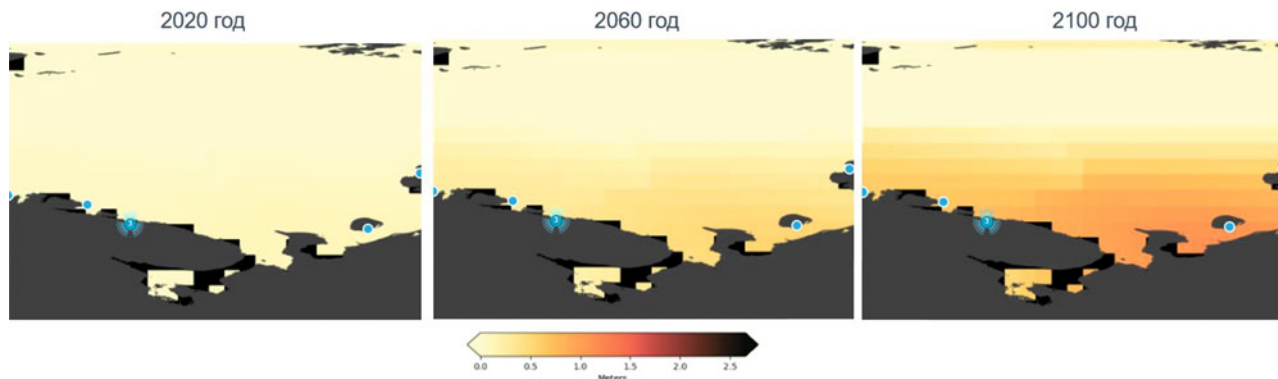
связи с этим также были рассмотрены данные шестого оценочного доклада IPCC, в котором в удобной форме представлены результаты по всей поверхности планеты [29].

Прогнозы основаны на оценке результатов, полученных с использованием ансамбля климатических моделей, представленной в шестом оценочном докладе IPCC. В целом, представленные результаты 17 – 83-го перцентиля интерпретируются IPCC как диапазоны, отражающие использование термина “вероятно” для обозначения вероятности не менее 66 %. Прогнозы представлены относительно периода 1995 – 2014 гг. Результаты на рис. 15 показывают такую же динамику, как и региональные расчёты ИО Ширшова для Баренцева моря, т.е. более значительный рост в районе Белого моря и Чёшской губы.

Для сопоставления данных была выбрана точка  $70^\circ$  с.ш.  $45^\circ$  в.д., для которой были рассмотрены значения по данным ИО им. Ширшова, базирующимся на трёх моделях проекта CMIP5, и по данным IPCC 6th, базирующимся на ансамбле моделей CMIP6 (таблица). Очевидно, что цифры отличаются весьма значительно и данные по CMIP5, определённые для трёх моделей, не соответствуют даже наблюдаемым средним значениям, не говоря уже о прогнозом увеличении темпов роста уровня моря.

Для корректной оценки полученных значений сопоставим результаты регионального моделирования и ансамбля глобальных моделей с данными спутниковых наблюдений TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3 [30], полученными с 1992 по 2019 г. (рис. 16). В соответствии с полученными данными за период около 26 лет рост уровня моря составил  $\approx 140$  мм, т.е.  $\approx 5,32$  мм/год. Что подтверждает отчёт IPCC 6th, который прогнозирует увеличение темпов роста уровня моря к концу века до  $8,36 – 10,58$  мм/год.

Так, даже для самого “оптимистичного” сценария SSP1-1.9 прогнозируется повышение уровня на 66 см, а при наблюдаемом темпе к 2100 г. эта величина составит  $\approx 51$  см. Таким образом, становится



**Рис. 15.** Изополю, показывающие прогнозные значения уровня моря в районе Баренцева моря по сценарию SSP5 – 8.5: слева — прогнозные значения на 2020 г.; по центру — прогнозные значения на 2060 г.; справа — прогнозные значения на 2100 г. [29]

очевидна важность выбора климатических моделей, наиболее достоверно отражающих процесс изменения конкретного параметра, а учёт таких значительных изменений уровня режима является необходимым для рационального проектирования портовых гидротехнических сооружений.

### Выводы

По результатам анализа представленных выше данных из отчётов IPCC разных лет, по результатам регионального моделирования, а также спутниковых альтиметрических измерений можно сделать вывод о значительном росте уровня Баренцева моря в период жизненного цикла портовых гидротехнических сооружений. Наибольший рост по результатам моделирования отмечается в районе Белого моря и Чёшской губы. В данном районе располагается несколько портов и портовых пунктов. Величина среднего роста уровня моря в этом регионе различна и для сценария SSP5-8.5 изменяется от 68 см для Мурманска до 112 см для Индиги.

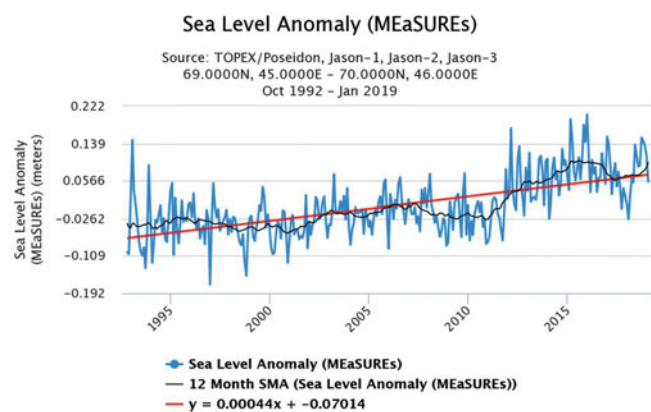
Для безопасной и эффективной эксплуатации морских гидротехнических сооружений требуется комплексный учёт всего многообразия последствий наблюдаемых и прогнозных изменений климата,

которые при неблагоприятном сценарии социально-экономического развития могут оказать значительное влияние на работу сооружений. В связи с этим задача дальнейших исследований влияния различных последствий изменения климата на морские гидротехнические сооружения приобретает всё большую актуальность и требует дальнейшего изучения.

Исследовательская работа, описанная в этой статье, выполнялась в рамках обучения в аспирантуре НИУ МГСУ, на кафедре гидравлики и гидротехнического строительства, под руководством профессора И. Г. Кантаржи. Выражается благодарность аспирантам Роману Гусарову и Евгению Рат-

### Изменение уровня моря для сценариев низких и высоких выбросов для точки 70° с.ш. 45° в.д.

Год	IO RAS (IPCC 5 <sup>th</sup> ) (Historical 1979 – 2005)	IPCC 6 <sup>th</sup> (Historical 1995 – 2014)
Изменения уровня моря относительно исторических значений, см		
<b>RSP4.5/SSP2-4.5</b>		
Исторический период	0,0	0,0
2039	+2,7	+26,0
2059	+5,7	+44,0
2099	+9,0	+79,0
Темп роста, мм/год	+0,85	+8,36
<b>RSP8.5/SSP5-8.5</b>		
Исторический период	0,0	0,0
2039	+7,1	+27,0
2059	+13,8	+48,0
2099	+20,1	+100,0
Темп роста, мм/год	+1,88	+10,58



**Рис. 16.** Аномалия уровня моря в точке 70° с.ш. 45° в.д. по данным спутниковых альтиметрических наблюдений NASA с 1992 по 2019 г. [30]



ковичу. Особая благодарность за консультации и предоставленные материалы регионального моделирования изменений климата в Баренцевом море выражается младшим научным сотрудникам ИО им. Ширшова РАН Полине Вереземской и Виталию Шармару.

## Список литературы

1. *Кондратьев В. Б.* Минеральные ресурсы и будущее Арктики // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 87–96. — DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-87-96.
2. *Минерально-сырьевые ресурсы арктической континентальной окраины России и перспективы их освоения* / В. Д. Каминский, О. И. Супруненко, А. Н. Смирнов // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3(15). С. 52–61.
3. *Распоряжение правительства РФ “Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года”* от 25.12.2019 № 3183-р // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. 2019 г.
4. *СП 58.13330.2019.* Гидротехнические сооружения. Основные положения СНиП 33–01–2003 (с Изменением № 1) от 16.12.2019: Официальное издание. С изм. и допол. в ред. от 10.03.2022. — М.: Стандартинформ, 2020.
5. *Долгушев Т. В., Меньшикова А. В.* Перспективы реализации строительных проектов морских сооружений в Арктической зоне РФ // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля, 2021 год. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2021. С. 1107–1110.
6. *Серова Н. А., Серова В. А.* Основные тенденции развития транспортной инфраструктуры российской Арктики // Арктика и Север. 2019. № 36. С. 42–56.
7. *Воронина Е. П.* Транспортное освоение арктических территорий: стратегические задачи и анализ рисков // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3 (27). С. 61–68.
8. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 “О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года” от 26.10.2020 № 645 // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. 2020 г.
9. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 “О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года” от 07.05.2018 № 204 // Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации. 2018 г.
10. *Объём грузоперевозок по Севморпути в 2020 году составил около 33 млн тонн.* — gosatom.ru. — URL: <https://rosatom.ru/journalist/news/obem-gruzoperevozok-po-sevmorputi-v-2020-godu-sostavil-okolo-33-mln-tonn/>.
11. *Объём перевозок по Северному морскому пути в 2020 году составил 31 млн тонн.* — portnews.ru. — URL: <https://portnews.ru/news/306100/>.
12. *Объём перевозок по Севморпути в 2017 г. вырос на 42,6 %, до 10,7 млн тонн.* — mintrans.gov.ru. — URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/branch-news/176>.
13. *По Севморпути перевезли почти 20 млн тонн грузов в 2018 году.* — korabel.ru. — URL: [https://www.korabel.ru/news/comments/po\\_sevmorputi\\_perevezli\\_pochti\\_20 mln\\_tonn\\_gruzov\\_v\\_2018\\_godu.html](https://www.korabel.ru/news/comments/po_sevmorputi_perevezli_pochti_20 mln_tonn_gruzov_v_2018_godu.html).
14. *Грузооборот по СМП в 2021 г. достиг 34,85 млн. т.* — neftegaz.ru. — URL: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/720501-gruzooborot-po-smp-v-2021-g-dostig-34-85-mln-t/>.
15. *Северный Морской Путь* — Итоги 2020 года презентация Росатом. — arctic.gov.ru. — URL: <https://arctic.gov.ru/wp-content/uploads/2021/02/2020.pdf>.
16. *Холощев А. В., Подпорин С. А.* Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 5. С. 867–879.
17. *Charctic Interactive Sea Ice Graph.* — nsidc.org. — URL: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/charctic-interactive-sea-ice-graph/>.
18. *Springtime in the Arctic.* — nsidc.org. — URL: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>.
19. *Smith L., Stephenson S.* New Trans-Arctic shipping routes navigable by mid-century // PNAS. 2013. No. 110 (13). Pp. 4871–4872.
20. *Изменение климата. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата* / Т. Ф. Стоккер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер, М. Тигнор, С. К. Аллен, Дж. Бошунг, А. Науэлс, Ю. Ся, В. Бекс и П. М. Мидглей (редакторы). — Кембридж Университи Пресс, Кембридж, Соединенное Королевство, и Нью-Йорк, США. 2013.
21. *Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата* / Х.-О. Пёртнер, Д. К. Робертс, В. Массон-Дельмотт, П. Чжай, М. Тигнор, Э. Положанска, К. Минтенбек, М. Николаи, Э. Окем, Я. Петцольд, Б. Рама, Н. М. Вейер (ред.). — Кембридж Университи Пресс, Кембридж, Соединенное Королевство, и Нью-Йорк, США. 2019.
22. *Вереземская П. С., Гулев С. К., Селиванова Ю. В., Тилинина Н. Д., Маркина М. Ю., Круницкий М. А., Шармар В. Д.* Прогноз и анализ изменений климата в Российской части Баренцева моря. — М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2019. — 611 с.
23. *Ocean Heat Content.* — climate.nasa.gov. — URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/ocean-heat>.
24. *Von Shuckmann K. et al.* Heat stored in the Earth system: where does the energy go? // Earth Syst. Sci. Data, 12, 2013–2041. — <https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020>.
25. *Шановалов С. М.* Уровень мирового океана // Большая российская энциклопедия. 2017. Т. 33. С. 84–85.
26. *Вопросы геоморфологии и палеогеографии морских побережий и шельфа* // Материалы научной конференции памяти Павла Алексеевича Каплина (Москва, 2–3 февраля 2017 г.) / Под ред. Т. А. Яниной, Т. С. Ключиткиной. — М.: Географический факультет МГУ, 2017. — 211 с.
27. *Understanding Sea Level.* — climate.nasa.gov. — URL: <https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/key-indicators/global-mean-sea-level>.
28. *Grinsted A. and Christensen J. H.* The transient sensitivity of sea level rise // Ocean Sci. № 17. Pp. 181–186. — <https://doi.org/10.5194/os-17-181-2021>.
29. *IPCC 6th Assessment Report Sea Level Projections.* — climate.nasa.gov. — URL: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool/>.
30. *Data Analysis Tool.* — climate.nasa.gov. — URL: <https://sealevel.nasa.gov/data-analysis-tool>.