

ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН В НАЧАЛЕ ХХI ВЕКА. ЧАСТЬ 1. КЛИМАТ, ОКЕАН И МОРСКОЙ ЛЁД

© 2025 г. У. В. Прохорова^{1,*}, Е. В. Блошкина¹, М. С. Махотин¹, А. В. Весман¹,
А. В. Терехов¹, А. Л. Борисик¹, К. В. Ромашова¹, Р. А. Чернов²,
И. И. Василевич¹, В. Э. Демидов¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: uvprokhorova@aari.ru

Поступила в редакцию 06.05.2025 г.

После доработки 07.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Дана актуальная оценка состояния природной среды арх. Шпицберген в первой четверти ХХI века. В последние десятилетия регион переживает значительные экологические изменения, обусловленные быстрым потеплением, связанным с арктическим усилением, при котором темпы роста температуры превышают среднемировые показатели в несколько раз. В результате различные компоненты локальной экосистемы претерпевают трансформации. В первой части статьи рассматриваются ключевые природные факторы: климат, океанология и морской лёд. В ней рассматриваются современные тренды приземной температуры воздуха и морского льда, динамика затока атлантических вод во фьорды архипелага. Несмотря на сравнительную изученность арх. Шпицберген, остаются значительные пробелы в знаниях, обусловленные техническими и методологическими трудностями. Проблемы включают разрозненные и неточные данные об атмосферных осадках, нехватку круглогодичных океанографических наблюдений и недостаточное понимание воздействия атлантических вод на фьорды. Эти аспекты открывают перспективы для будущих исследований, с особым акцентом на междисциплинарные подходы, которые помогут лучше понять механизмы экосистемных изменений на фоне климатических изменений.

Ключевые слова: Арктика, Шпицберген, изменения климата, полярное усиление, атлантификация, морской лёд

DOI: 10.7868/S2412376525040139

ВВЕДЕНИЕ

Архипелаг Шпицберген, расположенный в высоких широтах Арктики (76.5° – 81 с.ш., 10° – 32° в.д., площадь 61 тыс. km^2), находится на стыке различных по характеристикам воздушных и водных масс и испытывает сильное отепляющее влияние Атлантики (Nilsen et al., 2008; Merchel, Walczowski, 2020). Ввиду этого процессы, вызванные потеплением климата на Шпицбергене, чрезвычайно динамичны, что делает архипелаг важным объектом в изучении отклика компонентов природной среды Арктики на глобальное потепление.

Несмотря на расположение за полярным кругом, Шпицберген – один из наиболее изученных

архипелагов высокоширотной Арктики. Благодаря относительно мягким, по сравнению с более восточными островами, климатическим условиям и наличию полезных ископаемых, на протяжении ХХ–ХХI веков здесь существуют постоянные населённые пункты (в настоящее время связанные с материком регулярными авиарейсами), а также функционируют круглогодичные научные стационары. Регулярные наблюдения за природной средой арх. Шпицберген начались в 1970–80-х годах, а к концу 1990-х – началу 2000-х годов были зафиксированы первые признаки климатически обусловленных изменений в её ключевых компонентах (Nordli et al., 2014). На фоне значительно ускоряющихся темпов потепления (Isaksen et al., 2022), особенно

заметного в районе архипелага, возникла потребность сделать обобщение результатов исследований, полученных в последние 20 лет.

Цель работы – краткое обобщение современного состояния и динамики основных элементов природной среды архипелага, демонстрирующих наиболее отчётливый отклик на климатические изменения в первой четверти XXI века. В первой части статьи рассматриваются климат, океан и морской лёд.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Климат. Климат арх. Шпицберген определяется множеством факторов: расположением островов за северным полярным кругом в арктическом поясе, особенностями региональной атмосферной циркуляции, горным рельефом, наличием крупных заливов, влиянием тёплых и холодных океанических течений, динамикой морского льда. Все эти факторы в комплексе делают климат архипелага довольно неоднородным.

По распределению климатических параметров на территории Шпицбергена (Hanssen-Bauer и др., 2019) ранее было предложено выделить три основных физико-географических области (рис. 1): юго-западную, включающую часть о. Западный Шпицберген к югу от Истфьорда; северо-западную, включающую часть о. Западный Шпицберген к северу от Истфьорда и к западу от Вейдефьорда; восточную, включающую территории восточнее Вейдефьорда (Земля Улафа V, о. Эдж и о Северо-Восточная Земля). Юго-западная область характеризуется относительно мягким климатом и большим количеством осадков, в то время как наиболее суровая область архипелага – восточная, с наименьшими температурами воздуха и количеством осадков, а также наибольшими наблюдаемыми скоростями ветра. Получить представление о современной внутригодовой изменчивости метеорологических параметров по трём областям можно по данным действующих метеостанций, которые были взяты из архива European Climate Assessment & Dataset project. Осреднение за период 2000–2024 гг. показано на рис. 2 (осадки на графиках не показаны из-за малого количества наблюдений).

Не меньший интерес представляет межгодовая изменчивость основных метеорологических параметров на архипелаге. Шпицберген – район, где потепление идёт беспрецедентными темпами

(IPCC, 2023), в 2–3 раза превышающими среднемировые из-за эффекта “арктического усиления”, имеющего максимум в Баренцевоморском регионе, т.е. вблизи архипелага (Nordli et al., 2014; Алексеев, 2015; Gjelten et al., 2016; Isaksen et al., 2022). Так, на временному отрезке 1971–2017 гг. тренды в приземной температуре воздуха в летний сезон составляли 0.35 °C, а в зимний – 1.58 °C за десятилетие (Hanssen-Bauer et al., 2019). Подобное различие между величиной потепления в разные сезоны года привело к существенному снижению контраста между температурами тёплого и холодного сезонов.

Тренды в приземной температуре воздуха также различаются в пространстве. Для трёх выделенных ранее по климатическому районированию областей архипелага (см. рис. 1) тренды температуры воздуха, рассчитанные на основе реанализа Sval_Imp, составили 1.78 и 0.61 °C за десятилетие для восточной части (зима и лето соответственно), для северо-западной – 1.38 и 0.51 °C за десятилетие, и для юго-западной – 1.27 и 0.51 °C за десятилетие (Hanssen-Bauer et al., 2019). Таким образом, наибольшему потеплению в последние десятилетия была подвержена самая суровая в климатическом отношении часть архипелага с наибольшей долей оледенения.

Изменение температуры воздуха – не единственный климатический фактор, приводящий к изменениям природной среды Шпицбергена. По данным (Førland et al., 2020), количество осадков на Шпицбергене также росло, в среднем на 30–40 % за последние 50 лет. В долгосрочной же перспективе, согласно прогнозам (Hanssen-Bauer et al., 2019), общее количество осадков на архипелаге к концу XXI века может увеличиться на 65 %, причём зимой рост осадков будет особенно выраженным. Тем не менее такое увеличение не приводит к росту аккумуляции на ледниках архипелага из-за значимого снижения доли снега в общем количестве осадков, вызванного зимним потеплением (Førland et al., 2020). Исследования (Wickström et al., 2020) подтверждают, что также значительно возросло количество жидкого осадка в зимнее время.

Одним из драйверов наблюдаемых климатических изменений исследователи называют изменения в атмосферной циркуляции, которые приобретают всё более заметный характер. В частности, в период 1986–2015 гг. наблюдалось усиление юго-западных ветров, способствующее адвекции тёплых воздушных масс на Шпицберген (Pilgj et al., 2019). А согласно региональному моделированию в рамках проекта



Рис. 1. Физико-географическая карта арх. Шпицберген с основными топонимами, упоминаемыми в статье. Сокращения: ЗШТ – Западно-Шпицбергенское течение; ПТ – Прибрежное течение, ВШТ – Восточно-Шпицбергенское течение. Применены картографические данные Норвежского полярного института и батиметрические данные GEBCO

Fig. 1. Physical-geographical map of the Spitsbergen archipelago with the main toponyms mentioned in the article. Abbreviations: WSC – West Spitsbergen Current, PT – Coastal Current, ESC – East Spitsbergen Current. Cartographic data from the Norwegian Polar Institute and bathymetric data from GEBCO were used

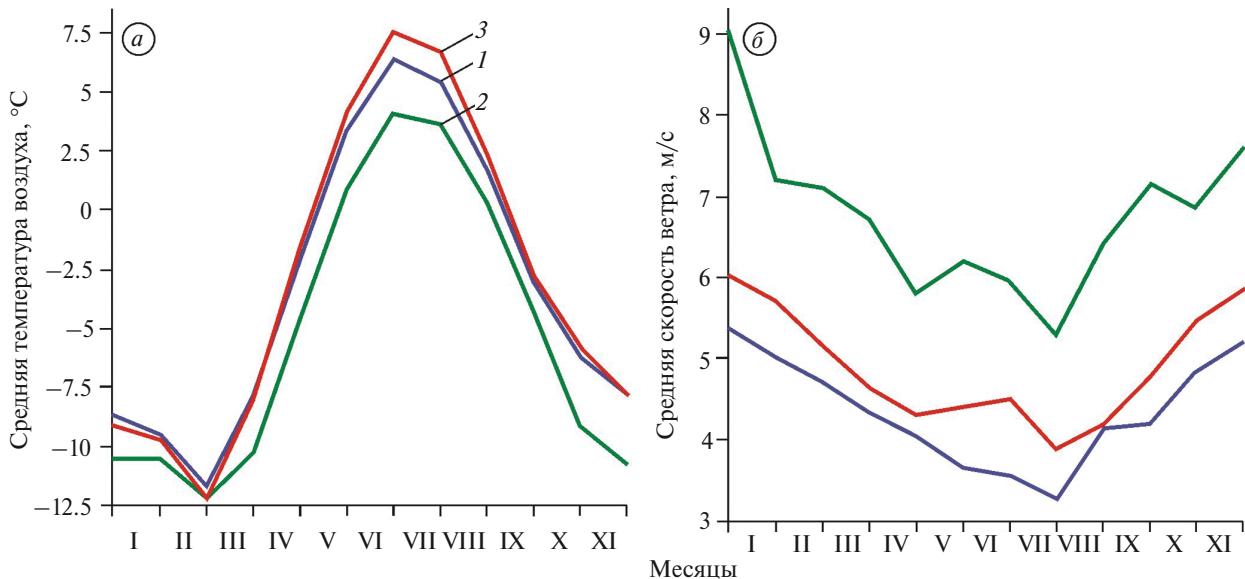


Рис. 2. Сезонный ход метеопараметров за период с 2000 по 2024 г.: температура воздуха на уровне 2 м (среднемесячная) (а); скорость ветра на высоте 10 м (средняя); по данным метеостанций архипелага Шпицберген (European Climate Assessment & Dataset project) (б).

1 – северо-запад, 2 – восток, 3 – юго-запад

Fig. 2. Seasonal variations in meteorological parameters for the period from 2000 to 2024: air temperature at 2 meters (a); wind speed at 10 meters; according to weather stations on the Svalbard archipelago (European Climate Assessment & Dataset project) (b).

1 – North-West, 2 – East, 3 – South-West

Arctic-CORDEX (Akperov et al., 2019), в XXI веке ожидается дальнейшее усиление циклонической активности в Арктике, особенно в осенне-зимний период, с ростом частоты и интенсивности циклонов, проникающих в Баренцевоморский регион. Это также ведёт к адвекции тёплого и влажного воздуха с Атлантики, особенно в холодное время года, и, как следствие, к интенсификации арктического усиления, росту температуры воздуха и увеличению количества осадков, в том числе в виде зимних дождей.

Современные изменения климата отражаются и на структуре теплового баланса архипелага. Поскольку тепловой баланс поверхности определяет таяние, наиболее изучены вопросы теплообмена в снежном покрове (Сосновский, Чернов, 2021), для сезонно-талого слоя (Grünberg et al., 2024) и для ледников. Так, для ледников западной части архипелага известно, что в среднем за сезон абляции (с мая по сентябрь) основным источником энергии для таяния служит поглощённая солнечная радиация (порядка 80–90 % вклада), а роль турбулентных потоков менее значима (10–20 %) (Zou et al., 2021; Prokhorova et al., 2023). Однако за последние несколько лет, ставших рекордными

по абляции, роль турбулентного теплообмена в структуре баланса возросла. Недавние исследования показывают, что существенный рост турбулентных потоков в отдельные периоды, вызываемый экстремальными погодными явлениями, приводит к рекордному поверхностному таянию ледников Шпицбергена и усилению талого стока (Aas et al., 2016; Prokhorova et al., 2025).

Океан. Фьорды – связующее звено между океаном и сушей благодаря процессам кросс-шельфового обмена, перемешивания вод и их циркуляции внутри фьордов. Фьорды острова Западный Шпицберген, расположенные в зоне активного взаимодействия тёплых, солёных атлантических и холодных, более пресных арктических вод, являются чувствительными индикаторами изменений окружающей среды.

Океанографические условия фьордов Западного Шпицбергена определяются Прибрежным течением (далее – ПТ) и Западно-Шпицбергенским течением (далее – ЗШТ; см. рис. 1). ПТ – продолжение Восточного-Шпицбергенского течения (далее – ВШТ), переносящего холодные арктические воды (далее – АрВ) из Баренцева моря, в то время как ЗШТ переносит более тёплые и солёные атлантические воды (далее – АВ)

из Норвежского моря (см. рис. 1). Эти две водные массы разделены полярным фронтом (Nilsen et al., 2016).

В последние десятилетия АВ в ЗШТ имеют тенденцию к потеплению (Walczowski et al., 2017; Tverberg et al., 2019). По результатам круглогодичных наблюдений в проливе Фрама на разрезе вдоль 78.5° с.ш. с 1997 по 2010 г. рост средней температуры АВ составил 0.06°C в год (Beszczynska-Möller et al., 2012), а ежегодные измерения на разрезе вдоль 76.5° с.ш. в летние месяцы (июнь–июль) с 1997 по 2016 г. выявили увеличение температуры на 0.045°C в год в поверхностном слое (0–500 м) ЗШТ (Merchel, Walczowski, 2020). Было зафиксировано значительное увеличение присутствия АВ на шельфе к юго-западу от Шпицбергена в летние периоды между 1999 и 2020 гг., причём в последние десять лет этот процесс стал особенно заметным. За этот период была выявлена положительная тенденция в 8 % в год в присутствии АВ, с сопутствующим уменьшением АрВ (Strzelewicz et al., 2022) (рис. 3).

Подобные изменения оказывают влияние на рост температуры и солёности вод фьордов Западного Шпицбергена (Tverberg et al., 2019; Skogseth et al., 2020; Bleshkina et al., 2021; Strzelewicz et al., 2022). С точки зрения океанографических условий наиболее изучены (с юга на север, см. рис. 1): Хорнсунн (Prominska et al. 2018; Strzelewicz et al., 2022), Исфьорд (Nilsen et al., 2016, Skogseth et al., 2020, Bleshkina et al., 2021) и Конгсфьорд (Tverberg et al., 2019; De Rovere et al., 2022). Эти фьорды соединены

с континентальным шельфом глубоководными желобами, через которые при определённых условиях (отсутствие горизонтального градиента плотности между водами фьорда и шельфа Западного Шпицбергена, ветром форсинге) происходит адвекция АВ и других водных масс внутрь фьордов. Исходя из особенностей рельефа наиболее благоприятным для затока АВ с шельфа является Исфьорд (Nilsen et al., 2016). Менее всего, несмотря на своё южное расположение, подвержен влиянию АВ Хорнсунн, так как его впадина довольно узкая и мелкая; кроме того, полярный фронт здесь более выражен (Promińska et al., 2018).

Водные массы фьордов Западного Шпицбергена хорошо изучены (Svendsen et al., 2002; Tverberg et al., 2019). В весенне-летний период в результате таяния морского льда, солнечного нагрева и поступления пресной воды от ледников и рек образуется поверхностная вода (ПВ, $t > 1^{\circ}\text{C}$, $S < 34$). Осенью и зимой воды фьорда охлаждаются из-за отдачи тепла в атмосферу, что вызывает конвективные процессы и образование локальной воды (ЛВ, $t < 1^{\circ}\text{C}$) с солёностью, изменяющейся в широком диапазоне в зависимости от места её формирования. В этот же период в результате образования морского льда и выделения рассола формируется зимняя вода (ЗВ, $t < -0.5^{\circ}\text{C}$, $S > 34.4$), которая обычно опускается к донным впадинам, и её остатки можно найти даже летом. Промежуточные воды (ПрВ) и трансформированные атлантические воды (ТАВ, $1.0 < t < 3.0^{\circ}\text{C}$, $S > 34.7$) формируются как

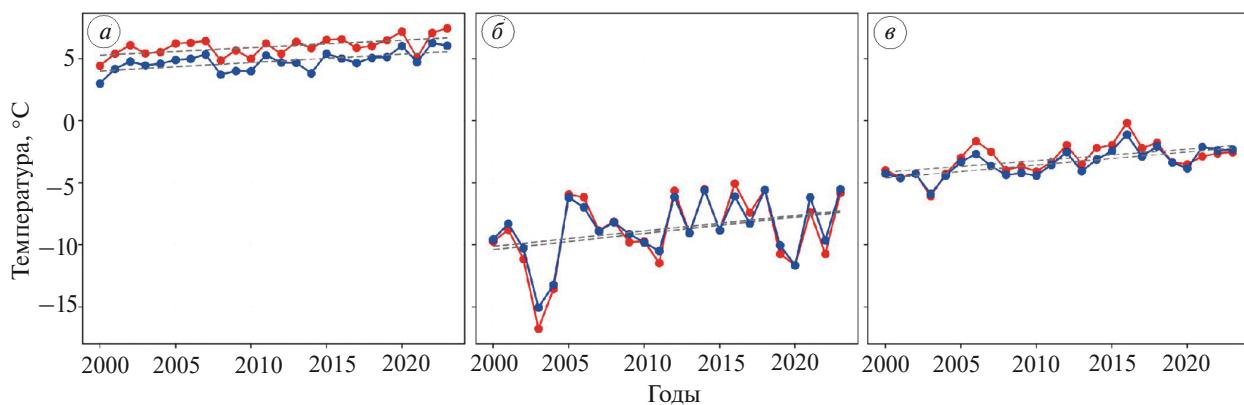


Рис. 3. Межгодовая изменчивость температуры воздуха в юго-западном (красная линия) и северо-западном (синяя линия) регионах за период с 2000 по 2024 г.: летняя (июнь–август) (а); зимняя (декабрь–февраль) (б); среднегодовая, по данным метеостанций архипелага Шпицберген (European Climate Assessment & Dataset project) (в)

Fig. 3. Interannual variability of air temperature in the southwestern (red line) and northwestern (blue line) regions for the period from 2000 to 2024: summer (June–August) (a); winter (December–February) (b); average annual, according to weather stations on the Svalbard archipelago (European Climate Assessment & Dataset project) (c)

во фьордах, так и на шельфе. ПрВ представляет собой смесь ПВ и воды, находящейся ниже, которая может быть АВ ($t > 3^{\circ}\text{C}$, $S > 34.9$), ТАВ или ЛВ во фьордах, АВ, ТАВ или АрВ – на шельфе.

Исследования в конце XX – начале XXI вв. (Svendsen et al., 2002; Cottier et al., 2005) в Конгсфьорде и Исфьорде указывали на то, что фьорды Шпицбергена имеют бимодальное распределение океанографических условий: АВ доминируют в конце лета, а локальные водные массы и АрВ – зимой. Отсутствие АВ в зимний период связано с тем, что зимняя конвекция в сочетании с образованием морского льда создавала плотные воды, препятствовавшие проникновению АВ (Nilsen et al., 2008). Однако дальнейшие наблюдения показали, что с 2006 г. затоки АВ на шельф и во фьорды начали происходить и в зимние месяцы (Tverberg et al., 2019; Skogseth et al., 2020). В Исфьорде произошёл сдвиг в летней вертикальной структуре вод: если до 2006 г. АВ обычно наблюдались в придонном слое, то затем их стали фиксировать на меньших глубинах, при этом толщина слоя АВ увеличилась (Skogseth et al., 2020).

Многолетние наблюдения с 1994 по 2016 г. в Конгсфьорде позволили выделить три характерных сценария формирования водных масс в зимний период, которые затем обусловливают особенности летних океанографических условий во фьорде (Tverberg et al., 2019): “Winter Deep” и “Winter Intermediate” и “Winter Open” (рис. 4). Первые два типа зим наблюдались до 2006 г., все зимы третьего типа были зафиксированы после 2006 г. (2007–2008 гг., 2012–2014 гг.). Во время зим типа “Winter Deep” глубокая конвекция в сочетании с образованием морского льда приводит к формированию плотных ЗВ, которые препятствуют проникновению АВ во фьорд. Летний заток АВ начинается, когда горизонтальный градиент плотности между водами фьорда и шельфа ослабевает, что приводит к адвекции АВ в промежуточных слоях. Во время зим типа “Winter Intermediate” зимняя конвекция достигает промежуточных глубин, обычно формируя очень холодные промежуточные воды. Летом АВ распространяются во фьорде в придонном слое. Зимой типа “Winter Open” конвекция формирует очень плотные воды, и заток АВ происходит в поверхностном слое. После таких зим АВ

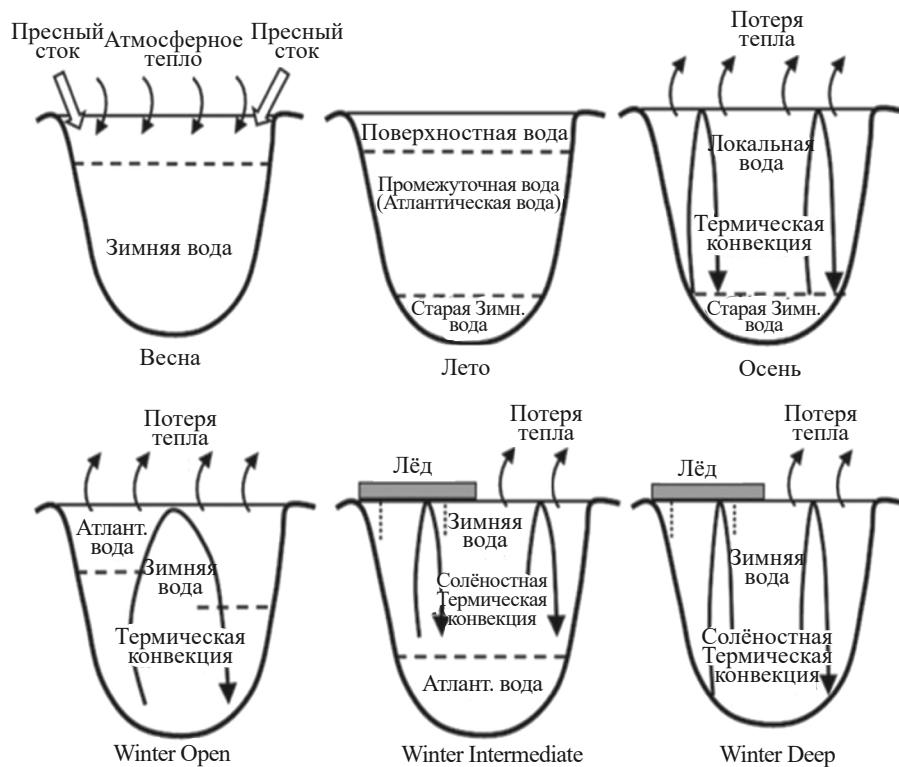


Рис. 4. Сезонный цикл стратификации в Конгсфьорде, с изменениями (Tverberg et al., 2019)

Fig. 4. Seasonal stratification cycle in Kongsfjorden, with modifications (Tverberg et al., 2019)

Таблица. Значения температуры и солености во фьордах Западного Шпицбергена**Table.** Temperature and salinity trend values in the fjords of Western Spitsbergen

Фьорд	Данные	Значения тренда	Период наблюдений
Хорнсунн (Strzelewicz et al., 2022)	Средняя/минимальная температура в слое ЗВ	0.03 ± 0.01 °C в год / 0.04 ± 0.02 °C в год	Лето 2001–2019 гг.
Исфьорд (Skogseth et al., 2020)	Средневзвешенная температура зима/лето	0.9 ± 0.3 °C в год / 1.2 ± 0.4 °C в год	Лето 1997–2017 гг.
	Средневзвешенная солёность зима/лето	0.021 ± 0.006 в год / 0.015 ± 0.01 в год	Зима 1997–2017 гг.
Конгсфьорд (De Rovere et al., 2022)	Температура на глубине 35 м/85 м Солёность на глубине 85 м	0.13 °C в год / 0.06 °C в год 0.03 PSU в год	2010–2020 гг.
Конгсфьорд (De Rovere et al., 2022)	Средняя температура по глубине	0.26 °C в год	Самые тёплые месяцы 2010–2020 гг.

летом наблюдаются на незначительной глубине. В работе Skogseth et al. (2020) аналогичная связь между сценариями формирования водных масс в зимний период и особенностями летних океанографических условий была описана и для Исфьорда (период наблюдений 1987–2017 гг.).

Отмечено, что Хорнсунн в меньшей степени подвержен влиянию АВ. Однако в последние годы в летний период в Хорнсунне наблюдалось увеличение ТАВ во фьорде, что отражает доминирование АВ на шельфе. Летом 2014 г. АВ были обнаружены внутри основного бассейна фьорда, а ТАВ достигли его внутренней части, что сделало этот год самым тёплым за период 2001–2015 гг. (Prominska et al., 2018). Также обнаружено снижение частоты формирования ЗВ.

Во всех трёх фьордах было зафиксировано повышение средних значений температуры и солёности вод (таблица).

Морской лёд. В XIX и XX веках морской ледяной покров в северной и восточной частях архипелага Шпицберген часто был многолетним (Divine, Dick, 2006; Dahlke et al., 2020). В некоторые годы была покрыта льдом даже большая часть Гренландского моря, а кромка льда располагалась между островами Ян-Майен и Медвежий (Dahlke et al., 2020). Современные ледовые условия в этом районе принимают всё более сезонный характер. В частности, в проливе Фрама и прилегающих водах Шпицбергена динамика и площадь морского льда зависят от крупномасштабного ветрового переноса льда, либо из Центральной Арктики (трансарктический перенос),

либо из Баренцева моря (Vinje et al., 1998; Smedsrud et al., 2017), а также от океанических течений (Dahlke et al., 2020). Благодаря совместному действию этих факторов, к северу от архипелага формируется шельфовая прибрежная полынья “Залив Китобоев”, которая существует круглый год, и здесь поступают наиболее тёплые АВ во всём Арктическом бассейне. Поток тепла из океана в атмосферу в этом районе оценивается в $200\text{--}500$ Вт/м², а перемешивание между АВ и более холодными окружающими водами обеспечивает достаточно тепла, чтобы поддерживать эту область свободной ото льда (Onarheim et al., 2014; Весман, Иванов, 2022).

Ледовые условия в районе архипелага Шпицберген крайне динамичны, однако всё их многообразие можно объединить в четыре типа (рис. 5): 1) район к северу от Шпицбергена полностью покрыт льдом; 2) кромка льда проходит к северу от архипелага; 3) существование полынни “Залив Китобоев”; 4) промежуточный тип с образованием “прохода” в Баренцево море между кромкой льда и побережьем архипелага (Весман, Иванов, 2022). До середины 1990-х годов наиболее характерным был первый тип ледовых условий. С 1997 г. отмечается перестройка системы, когда преобладающим типом становится второй, с полынней “Залив Китобоев” (Весман, Иванов, 2022). Повторяемость возникновения этой полынни со временем растёт, в то время как полное покрытие льдом исследуемой области существенно снижается с конца 1980-х годов. Северное побережье Шпицбергена также начинает регулярно полностью очищаться ото льда с середины 1990-х

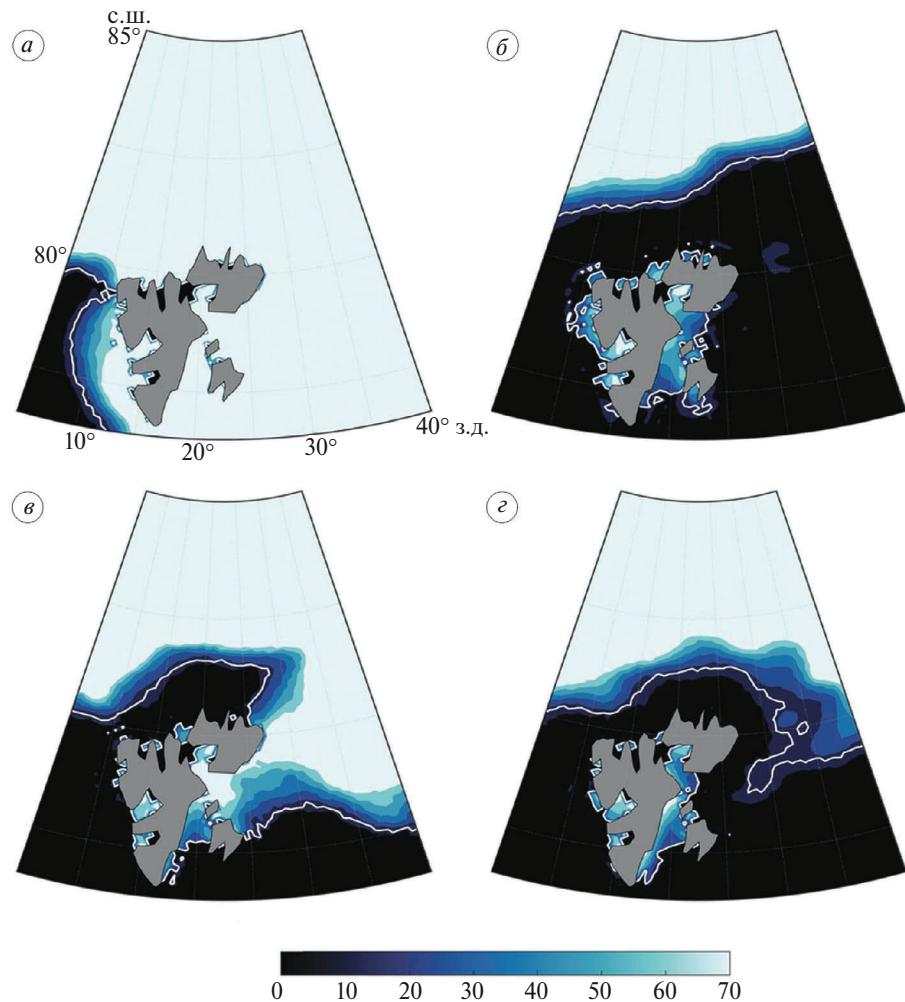


Рис. 5. Типичные ситуации распространения морского ледяного покрова к северу от архипелага Шпицберген: тип 1 (a); тип 2 (b); тип 3 (c); тип 4 (d). Цветовая шкала: сплошность льда, % (по Весман и Иванов, 2022)

Fig. 5. Typical situations of sea ice cover distribution north of the Svalbard archipelago: Type 1 (a); Type 2 (b); Type 3 (c); Type 4. (d). Colour scale: ice concentration, % (Vesman, Ivanov, 2022)

годов. Переходный тип ледовых условий наблюдается лишь в отдельные годы.

В площади ледяного покрова наблюдается ярко выраженный отрицательный тренд. Авторы (Falk-Petersen et al., 2015) отмечают, что наблюданное снижение площади морского льда интенсифицирует апвеллинг АВ вдоль северного склона архипелага. Помимо тенденции к увеличению площади открытой воды к северу от Шпицбергена, в ледовитости также выделяются характерные колебания в 2–3 и 5–6 лет (Весман, Иванов, 2022).

Для наземных компонентов природной среды Шпицбергена важна ледовитость не только морей, окружающих архипелаг, но также внутренних фьордов. В исследовании (Dahlke et

al., 2020) показана пространственно-временная неоднородность ледовых условий во фьордах архипелага и вокруг них: так, морской лёд начинает формироваться в ноябре в восточных фьордах Северо-Восточной Земли, а затем распространяется в пролив Хинлопена и далее на юг. Обычно к январю лёд полностью покрывает фьорды, а к апрелю площадь морского льда достигает максимума в восточной части Шпицбергена. Подробный анализ ледовых условий для отдельных фьордов представлен в работах: Gerland, Hall (2006) (Конгсфьорд, Ван-Мейенфьорд и Хорнсунн); Høyland (2009) (Ван-Мейенфьорд); Zhuravskiy et al. (2012) (Грёнфьорд), Muckenhuber et al. (2016) (Исфьорд и Хорнсунн); Pavlova et al. (2019) (Конгсфьорд) и др.

Для всех перечисленных фьордов наименьшая площадь покрытия морским льдом характерна в сентябре, тогда как максимум наблюдается в марте–апреле. Некоторые фьорды и проливы, расположенные вдоль западного побережья Шпицбергена, где температура воздуха значительно выше, чем в других частях архипелага, практически свободны от льда с июня–июля по ноябрь (Dahlke et al., 2020). Кроме того, замерзанию этих водных объектов препятствует и приток более тёплых и солёных АВ, в то время как на юг архипелага приносит лёд и холодные воды Восточно-Шпицбергенское течение. В результате зимний максимум покрытия фьордов морским льдом на западном побережье обычно не превышает 50–60 %, тогда как на востоке и северо-востоке этот максимум превышает 80 % (Dahlke et al., 2020).

Ван-Мейен-фьорд, Экманфьорд, Биллефьорд и Темпельфьорд можно рассматривать как промежуточные случаи. Летом они почти свободны от льда, но зимой их покрытие льдом превышает 80 % (Dahlke et al., 2020). Все они, будучи расположенными в центральной части Шпицбергена, глубже вдаются в сушу и, вероятно, имеют более континентальный климат (низкие зимние температуры), большие объёмы пресной воды в период замерзания и локальные ветровые режимы.

Исследованию припайного льда посвящена работа Urbański и Litwicka (2022). В период с 1973 по 2000 г. фьорды северного Шпицбергена, бухты восточного побережья и как минимум половина площади фьордов Западного Шпицбергена были покрыты припаем в течение 4–5 месяцев (рис. 6). В первой четверти XXI века этот период сократился на 1–3 месяца, с наиболее значительными изменениями в западной и северной областях архипелага. Модельные расчёты показывают, что повышение средней температуры воздуха на 2 °C сократит продолжительность существования припая примерно в четыре раза по сравнению с текущими значениями (Urbański, Litwicka, 2022).

Что касается долговременных тенденций в площади морского льда, Dahlke с соавт. (2020) выделяют три основных региональных закономерности: на западном побережье архипелага – отсутствие или слабое сокращение площади морского льда до 2000 г., с ускорением сокращения в последние годы; на севере и северо-западе – увеличение площади морского льда в 1980–1990 гг., за которым последовало резкое сокращение; на северо-востоке – почти полное покрытие морским льдом до 2010 г., с резким сокращением в последние годы.

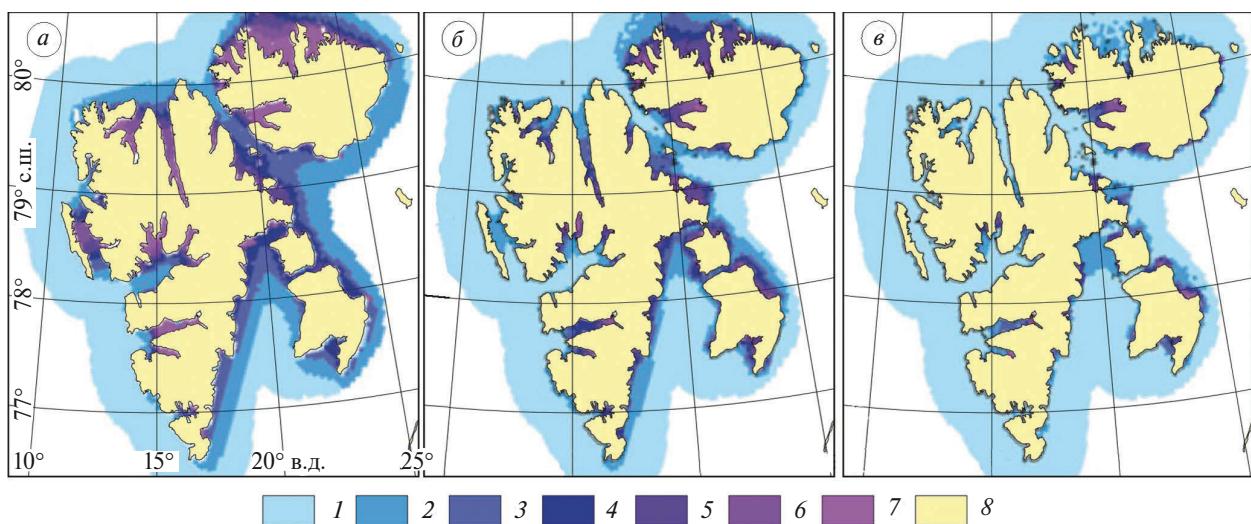


Рис. 6. Осреднённая продолжительность существования припая в районе архипелага Шпицберген: ледовые сезоны 1973–2000 гг. (а); ледовые сезоны 2005–2019 гг. (б); прогноз при условии повышения средней температуры воздуха зимой на 2 °C (по Urbański & Litwicka, 2022) (в). 1 – менее недели, 2 – от недели до месяца, 3 – 1–2 месяца, 4 – 2–3 месяца, 5 – 3–4 месяца, 6 – 4–5 месяцев, 7 – более 5 месяцев, 8 – суша

Fig. 6. Average duration of fast ice existence in the Svalbard archipelago area: ice seasons of 1973–2000 (a); ice seasons of 2005–2019 (b); forecast assuming an increase in average winter air temperature by 2 °C (Urbański, Litwicka, 2022) (в). 1 – Less than a week, 2 – from a week to a month, 3 – 1–2 months, 4 – 2–3 months, 5 – 3–4 months, 6 – 4–5 months, 7 – more than 5 months, 8 – land

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения природной среды архипелага Шпицберген, особенно усилившиеся на рубеже 1990–2000-х годов, тесно связаны с потеплением, которое представляет собой одно из наиболее наглядных проявлений глобальных климатических изменений последних десятилетий. Потеплению в районе архипелага подвержен не только приземный слой воздуха, демонстрирующий рекордный рост температуры относительно других районов Арктики, но и окружающий океан и его фьорды, где происходит процесс атлантификации. Этот процесс проявляется в росте средних значений температуры и солёности вод, в увеличении случаев затока АВ во фьорды в зимний период и в уменьшении глубин, на которых они распространяются.

Современное потепление, несомненно, влияет и на криосферу архипелага: сезонная кромка морского льда отступает всё дальше к северу; припайного льда становится меньше, а период его существования укорачивается.

Несмотря на сравнительно хорошую изученность арх. Шпицберген по сравнению с другими арктическими территориями, при обобщении знаний выделяются некоторые пробелы, связанные с техническими, методическими и логистическими сложностями исследований. Назовём следующие проблемные аспекты современных климатологических и океанологических работ на Шпицбергене: измерения атмосферных осадков на архипелаге весьма разрознены, а кроме того, имеют технические сложности, связанные с недо- или переучётом количества твёрдых осадков существующими измерительными средствами. Из-за этого ранее ставились под сомнения выявленные тренды в наблюдаемых суммах осадков и в соотношении жидких и твёрдых осадков (Førland et al., 2020); большинство океанографических данных относятся к летнему периоду, а имеющихся круглогодичных данных с высоким пространственным и временным разрешением недостаточно для фиксирования и объяснения всех происходящих изменений. В связи с этим существует необходимость увеличения количества наблюдений в зимний период, в том числе подо льдом; неизученными остаются трансформации, которым подвергается АВ после их проникновения на континентальный шельф и во фьорды. Также мало изучено суммарное влияние вторжений АВ во фьорды Западного Шпицбергена на общий объём тепла, переносимого ЗШТ в центральную часть

Арктического бассейна. В то время как свойства и структура ЗШТ подробно проанализированы и задокументированы (Beszczynska-Moller et al., 2012; Walczowski, 2017), исследования ПТ остаются фрагментарными.

Перечисленные проблемы намечают перспективные направления для дальнейших работ на архипелаге. Однако особое внимание следует уделить междисциплинарным исследованиям, которые не только рассматривают каждый из компонентов природной среды архипелага по отдельности, но и улучшают современные представления о физических процессах и механизмах, регулирующих прямые и обратные связи в экосистеме Шпицбергена в условиях климатических изменений.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы НИТР Ростгидромета 5.1 на 2025–2029 гг. “Развитие моделей и методов мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, исследования процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики”.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the NITR program of Roshydromet 5.1 for 2025–2029 “Development of models and methods for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers, and permafrost, as well as the study of ice interaction processes with natural objects and engineering structures for the Arctic”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 11–26.
- Весман А.В., Иванов Б.В. Характерные типы ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 118–132.
- Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние снежного покрова на охлаждение поверхностного слоя ледника Восточный Грён-фьорд (Шпицберген) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 1. С. 75–88. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010072>
- Aas K.S., Dunse T., Collier E., Schuler T.V., Berntsen T.K., Kohler J., Luks B. The climatic mass balance of Svalbard glaciers: A 10-year simulation with a coupled atmosphere–glacier mass balance model // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 1089–1104.
- Bloshkina E.V., Pavlov A.K., Filchuk K. Warming of Atlantic water in three West Spitsbergen fjords: Recent

- patterns and century-long trends // *Polar Research*. 2021. V. 40. <https://doi.org/10.33265/polar.v40.5392>
- Cottier F., Tverberg V., Inall M., Svendsen H., Nilsen F., Griffiths C.* Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange: The seasonal hydrography of Kongsfjorden, Svalbard // *Journal of Geophysical Research*. 2005. V. 110. P. 12. <https://doi.org/10.1029/2004jc002757>
- Dahlke S., Hughes N.E., Wagner P.M., Gerland S., Wawrzyniak T., Ivanov B., Maturilli M.* The observed recent surface air temperature development across Svalbard and concurring footprints in local sea ice cover // *International Journal of Climatology*. 2020. V. 40. № 12. P. 5246–5265. <https://doi.org/10.1002/joc.6517>
- De Rovere F., Langone L., Schroeder K., Miserocchi S., Giglio F., Aliani, S., Chiggiato J.* Masses variability in inner Kongsfjorden (Svalbard) during 2010–2020 // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. 741075 p. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.741075>
- Divine D.V., Dick C.* Historical variability of sea ice edge position in the Nordic Seas // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. V. 111. № C1.
- European Climate Assessment & Dataset project // Электронный ресурс. <https://www.ecad.eu/> Дата обращения: 25.06.2025.
- Falk-Petersen S., Pavlov V., Berge J., Cottier F., Kovacs K.M., Lydersen C.* At the rainbow's end: high productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf // *Polar Biology*. 2015. V. 38. P. 5–11.
- Førland E.J., Benestad R., Hanssen-Bauer I., Hauge J.E., Skaugen T.E.* Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100 // *Advances in meteorology*. 2011. 893790 p. <https://doi.org/10.1155/2011/893790>
- Førland E.J., Isaksen K., Lutz J., Hanssen-Bauer I., Schuler T.V., Dobler A., Gjelten H.M., Vikhamar-Schuler D.* Measured and modeled historical precipitation trends for Svalbard // *Journal of Hydrometeorology*. 2020. V. 21. № 6. P. 1279–1296. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0252.1>
- Gerland S., Hall R.* Variability of fast-ice thickness in Spitsbergen fjords // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 44. P. 231–239. <https://doi.org/10.3189/172756406781811367>
- Gjelten H.M., Nordli Ø., Isaksen K., Førland E.J., Sviashchennikov P.N., Wyszynski P., Prokhorova U.V., Przybylak R., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V.* Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen // *Polar Research*. 2016. V. 35. № 1. 29878 p.
- Grünberg I., Groenke B., Westermann S., Boike J.* Permafrost and active layer temperature and freeze/thaw timing reflect climatic trends at Bayelva, Svalbard // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2024. V. 129. e2024JF007648 p. <https://doi.org/10.1029/2024JF007648>
- Hanssen-Bauer I.* Climate in Svalbard 2100 // A knowledge base for climate adaptation. 2019. 208 p.
- Hestnes E., Bakkehoi S., Jaedicke C.* Longyearbyen, Svalbard – vulnerability and risk management of an Arctic settlement under changing climate – a challenge to authorities and experts // *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Breckenridge, Colorado. 2016. P. 363–370.
- Høyland K.V.* Ice thickness, growth and salinity in Van Mijenfjorden, Svalbard, Norway // *Polar Research*. 2009. V. 28. № 3. P. 339–352.
- IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC, Geneva, Switzerland. 2023. P. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Isaksen K., Nordli Ø., Førland E.J., Łupikasza E., Eastwood S., Niedźwiedź T.* Recent warming on Spitsbergen—Influence of atmospheric circulation and sea ice cover // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. V. 121. P. 11.913–11.931
- Koc N., Jansen E., Haflidason H.* Paleoceanographic reconstructions of surface ocean conditions in the Greenland, Iceland and Norwegian seas through the last 14 ka based on diatoms // *Quaternary Science Reviews*. 1993. V. 12. P. 115–140.
- Laufer-Meiser K., Michaud A.B., Maisch M., Byrne J.M., Kappler A., Patterson M.O., Røy H., Jørgensen B.B.* Potentially bioavailable iron produced through benthic cycling in glaciated Arctic fjords of Svalbard // *Nature Communications*. 2021. V. 12. № 1. 1349 p.
- Martín-Español A., Navarro F.J., Otero J., Lapazaran J.J., Błaszczyk M.* Estimate of the total volume of Svalbard glaciers, and their potential contribution to sea-level rise, using new regionally based scaling relationships // *Journal of Glaciology*. 2015. V. 61. № 225. P. 29–41.
- Merchel M., Walczowski W.* Increases in the temperature and salinity of deep and intermediate waters in the West Spitsbergen Current region in 1997–2016 // *Oceanologia*. 2020. V. 62. № 4. P. 501–510. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.08.001>
- Muckenhuber S., Nilsen F., Korosov A., Sandven S.* Sea ice cover in Isfjorden and Hornsund, Svalbard (2000–2014) from remote sensing data // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. № 1. P. 149–158.
- Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S.* Fjord-shelf exchanges controlled by ice and brine production: The interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard // *Continental Shelf Research*. 2008. V. 28. P. 1838–1853. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.015>

- Nilsen F., Skogseth R., Vaardal-Lunde J., Inall M.E.* A simple shelf circulation model: intrusion of Atlantic Water on the West Spitsbergen Shelf // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. V. 46. P. 1209–1230.
- Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A.E., Isaksen K.* Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 // *Polar research*. 2014. V. 33. № 1. 21349 p.
- Nordli Ø., Wyszyński P., Gjelten H., Isaksen K., Łupi-kaśza E., Niedźwiedź T., Przybylak R.* Revisiting the extended Svalbard Airport monthly temperature series, and the compiled corresponding daily series 1898–2018 // *Polar Research*. 2020. V. 39. 3613 p.
- Onarheim I.H., Smedsrød L.H., Ingvaldsen R.B., Nilsen F.* Loss of sea ice during winter north of Svalbard // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014. V. 66. № 1. 23933 p.
- Pavlova O., Gerland S., Hop H.* Changes in sea-ice extent and thickness in Kongsfjorden, Svalbard (2003–2016) // *The ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard*. 2019. P. 105–136.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-46425-1_4
- Pilguy N., Kolendowicz L., Kryza M., Migała K., Czernecki B.* Temporal changes in wind conditions at Svalbard for the years 1986–2015 // *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2019. V. 101. № 2. P. 136–156.
- Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Demidov V.E., Romashova K.V., Barskov K.V., Chechin D.G., Vasilevich I.I., Tretiakov M.V., Ivanov B.V., Repina I.A., Verkulich S.R.* Impact of Extreme Weather Events on the Surface Energy Balance of the Low-Elevation Svalbard Glacier Aldegondabreen // *Water*. 2025. V. 17. № 2. 274 p.
- Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B., Demidov V.* Heat balance of a low-elevated Svalbard glacier during the ablation season: A case study of Aldegondabreen // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2023. V. 55. № 1. 2190057 p.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2023.2190057>
- Skogseth R., Olivier L.L.A., Nilsen F., Falck E., Fraser N., Tverberg V., Ledang A.B., Vader A., Jonassen M.O., Søreide J., Cottier F., Berge J., Ivanov B.V., Falk-Petersen S.* Variability and decadal trends in the Isfjorden (Svalbard) ocean climate and circulation—an indicator for climate change in the European Arctic // *Progress in Oceanography*. 2020. V. 187. 102394 p.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102394>
- Smedsrød L.H., Halvorsen M.H., Stroeve J.C., Zhang R., Kloster K.* Fram Strait sea ice export variability and September Arctic sea ice extent over the last 80 years // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 1. P. 65–79.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-65-2017>
- Strzelewicz A., Przyborska A., Walczowski W.* Increased presence of Atlantic water on the shelf south-west of Spitsbergen with implications for the Arctic fjord Hornsund // *Progress in Oceanography*. 2022. V. 200. 102714 p.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102714>
- Svendsen J.I., Mangerud J.* Holocene glacial and climatic variations on Spitsbergen, Svalbard // *The Holocene*. 1997. V. 7. № 1. P. 45–57.
- Svendsen H., Beszczynska-Möller A., Hagen J.O., Lefauconnier B., Tverberg V., Gerland S., Ørbæk J.B., Bischof K., Papucci C., Zajaczkowski M., Azzolini R., Bruland O., Wiencke C., Winther J.-G., Dallman W.* The physical environment of Kongsfjorden–Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard // *Polar research*. 2002. V. 21. № 1. P. 133–166.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2002.tb00072.x>
- Promińska A., Falck E., Walczowski W.* Interannual variability in hydrography and water mass distribution in Hornsund, an Arctic fjord in Svalbard // *Polar Research*. 2018. V. 37. № 1. P. 1495546.
<https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1495546>
- Tverberg V., Skogseth R., Cottier F., Sundfjord A., Walczowski W., Inall M.E., Falck E., Pavlova O., Nilsen F.* The Kongsfjorden transect: Seasonal and interannual variability in hydrography // *The ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard*. Cham: Springer, 2019. P. 49–104.
- Urbański J.A., Litwicka D.* The decline of Svalbard land-fast sea ice extent as a result of climate change // *Oceanologia*. 2022. V. 64. № 3. P. 535–545.
- Vickers H., Saloranta T., Køltzow M., van Pelt W.J.J., Malnes E.* An analysis of winter rain-on-snow climatology in Svalbard // *Front. Earth Sci.* 2024. V. 12. P. 1342731.
<https://doi.org/10.3389/feart.2024.1342731>
- Vinje T., Nordlund N., Kvambakk Å.* Monitoring ice thickness in Fram Strait // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998. V. 103. № C5. P. 10437–10449.
- Walczowski W., Beszczynska-Möller A., Wieczorek P., Merchel M., Grynczel A.* Oceanographic observations in the Nordic Sea and Fram Strait in 2016 under the IO PAN long-term monitoring program AREX // *Oceanologia*. 2017. V. 59. № 2. P. 187–194.
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.12.003>
- Wickström S., Jonassen M.O., Cassano J.J., Vihma T.* Present temperature, precipitation, and rain-on-snow climate in Svalbard // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. V. 125. № 14. P. e2019JD032155.
- Zou X., Ding M., Sun W., Yang D., Liu W., Huai B., Jin S., Xiao C.* The surface energy balance of Austre Lovénbreen, Svalbard, during the ablation period in 2014 // *Polar Research*. 2021. V. 40.
- Zhuravskiy D., Ivanov B., Pavlov A.* Ice conditions at Gronfjorden Bay, Svalbard, from 1974 to 2008 // *Polar Geography*. 2012. V. 35. № 2. P. 169–176.

Citation: Prokhorova U. V., Bloshkina E. V., Mahotin M. S., Vesman A. V., Terekhov A. V., Borisik A. L., Romashova K. V., Chernov R. A., Vasilevich I. I., Demidov V. E. Environmental changes in Svalbard at the beginning of the 21st century. Part 1. Climate, ocean, and sea ice. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (4): 703–717. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040139.

Environmental changes in Svalbard at the beginning of the 21st century. Part 1. Climate, ocean, and sea ice

© 2025 U. V. Prokhorova^{a, #}, E. V. Bloshkina^a, M. S. Mahotin^a, A. V. Vesman^a, A. V. Terekhov^a,
A. L. Borisik^a, K. V. Romashova^a, R. A. Chernov^b, I. I. Vasilevich^a, V. E. Demidov^a

^a*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia*

^b*Institute of Geography, Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: uvprokhorova@aari.ru*

Received May 6, 2025; revised July 7, 2025; accepted September 25, 2025

This review provides the present-day assessment of natural environment state of the Svalbard Archipelago in the first quarter of the 21st century. In recent decades, the region was subjected to significant environmental changes due to fast climate warming associated with the Arctic amplification, when rates of the surface temperature growth exceeded the global means by several times. This resulted in marked transformation of the local ecosystems. The key environmental factors, including (1) climate, (2) oceanography, (3) sea ice, are considered in the first part of the article. The paper presents current trends in surface air temperature and sea ice, as well as the dynamics of Atlantic Water inflow into the archipelago's fjords. Although Svalbard is among the most accessible and thoroughly studied regions of the Arctic, there are significant gaps in knowledge due to technical and methodological difficulties. The problems involve fragmented and incorrect data on the atmospheric precipitation, a lack of year-round oceanographic observations, and insufficient understanding of the impacts of Atlantic water on the fjords. These aspects open ways for future research, with a particular emphasis on interdisciplinary approaches that may enhance understanding of ecosystem changes in the context of climate change.

Keywords: Arctic, climate change, polar amplification, atlantification, glacier retreat, sea ice

REFERENCES

- Alekseev G. V. Manifestation and intensification of global warming in the Arctic. Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya. Fundamental and Applied Climatology.* 2015, 1: 11–26. [In Russian].
- Vesman A. V., Ivanov B. V. Characteristic types of ice conditions north of the Svalbard archipelago. Problemy Arkтики i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic.* 2022, 68 (2): 118–132. [In Russian].
- Sosnovskiy A. V., Chernov R. A. Influence of snow cover on cooling of the surface layer of the Vostochny Grönfjord glacier (Spitsbergen). Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021, 61 (1): 75–88.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421010072> [In Russian].
- Aas K. S., Dunse T., Collier E., Schuler T. V., Berntsen T. K., Kohler J., Luks B. The climatic mass balance of Svalbard glaciers: A 10-year simulation with a coupled atmosphere–glacier mass balance model. The Cryosphere.* 2016, 10: 1089–1104.
- Bloshkina E. V., Pavlov A. K., Filchuk K. Warming of Atlantic water in three West Spitsbergen fjords: Recent patterns and century-long trends. Polar Research.* 2021, 40. <https://doi.org/10.33265/polar.v40.5392>
- Cottier F., Tverberg V., Inall M., Svendsen H., Nilsen F., Griffiths C. Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange: The seasonal hydrography of Kongsfjorden, Svalbard. Journ. of Geophysical Research.* 2005, 110: 12. <https://doi.org/10.1029/2004jc002757>
- Dahlke S., Hughes N. E., Wagner P. M., Gerland S., Wawrzyniak T., Ivanov B., Maturilli M. The observed recent surface air temperature development across Svalbard and concurring footprints in local sea ice cover. International Journ. of Climatology.* 2020, 40 (12): 5246–5265. <https://doi.org/10.1002/joc.6517>

- De Rovere F., Langone L., Schroeder K., Miserocchi S., Giglio F., Aliani S., Chiggiato J.* Masses variability in inner Kongsfjorden (Svalbard) during 2010–2020. *Frontiers in Marine Science*. 2022, 9: 741075. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.741075>
- Divine D.V., Dick C.* Historical variability of sea ice edge position in the Nordic Seas. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 2006, 111 (C1).
- European Climate Assessment & Dataset project. Retrieved from: <https://www.ecad.eu/> (Last access: June, 25 2025).
- Falk-Petersen S., Pavlov V., Berge J., Cottier F., Kovacs K.M., Lydersen C.* At the rainbow's end: High productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf. *Polar Biology*. 2015, 38: 5–11.
- Førland E.J., Benestad R., Hanssen-Bauer I., Haugen J.E., Skaugen T.E.* Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100. *Advances in meteorology*. 2011: 893790. <https://doi.org/10.1155/2011/893790>
- Førland E.J., Isaksen K., Lutz J., Hanssen-Bauer I., Schuler T.V., Dobler A., Gjelten H.M., Vikhamar-Schuler D.* Measured and modeled historical precipitation trends for Svalbard. *Journ. of Hydrometeorology*. 2020, 21 (6): 1279–1296. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0252.1>
- Gerland S., Hall R.* Variability of fast-ice thickness in Spitsbergen fjords. *Annals of Glaciology*. 2006, 44: 231–239. <https://doi.org/10.3189/172756406781811367>
- Gjelten H.M., Nordli Ø., Isaksen K., Førland E.J., Sviashchennikov P.N., Wyszynski P., Prokhorova U.V., Przybylak R., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V.* Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen. *Polar Research*. 2016, 35 (1): 29878.
- Grünberg I., Groenke B., Westermann S., Boike J.* Permafrost and active layer temperature and freeze/thaw timing reflect climatic trends at Bayelva, Svalbard. *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. 2024, 129: e2024JF007648. <https://doi.org/10.1029/2024JF007648>
- Hanssen-Bauer I.* Climate in Svalbard 2100. A knowledge base for climate adaptation. 2019: 208 p.
- Hestnes E., Bakkehoi S., Jaedicke C.* Longyearbyen, Svalbard – vulnerability and risk management of an Arctic settlement under changing climate – a challenge to authorities and experts. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Breckenridge, USA. 2016, 363–370.
- Høyland K.V.* Ice thickness, growth and salinity in Van Mijenfjorden, Svalbard, Norway. *Polar Research*. 2009, 28 (3): 339–352.
- IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, Switzerland. 2023: 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Isaksen K., Nordli Ø., Førland E.J., Łupikasza E., Eastwood S., Niedzwiedz T.* Recent warming on Spitsbergen—Influence of atmospheric circulation and sea ice cover. *Journal of Geophys. Research: Atmospheres*. 2016, 121: 11.913–11.931.
- Koc N., Jansen E., Hafstadson H.* Paleoceanographic reconstructions of surface ocean conditions in the Greenland, Iceland and Norwegian seas through the last 14 ka based on diatoms. *Quaternary Science Reviews*. 1993, 12: 115–140.
- Laufer-Meiser K., Michaud A.B., Maisch M., Byrne J.M., Kappler A., Patterson M.O., Røy H., Jørgensen B.B.* Potentially bioavailable iron produced through benthic cycling in glaciated Arctic fjords of Svalbard. *Nature Communications*. 2021, 12 (1): 1349.
- Martín-Español A., Navarro F.J., Otero J., Lapazaran J.J., Błaszczyk M.* Estimate of the total volume of Svalbard glaciers, and their potential contribution to sea-level rise, using new regionally based scaling relationships. *Journ. of Glaciology*. 2015, 61 (225): 29–41.
- Merchel M., Walczowski W.* Increases in the temperature and salinity of deep and intermediate waters in the West Spitsbergen Current region in 1997–2016. *Oceanologia*. 2020, 62 (4): 501–510. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.08.001>
- Muckenhuber S., Nilsen F., Korosov A., Sandven S.* Sea ice cover in Isfjorden and Hornsund, Svalbard (2000–2014) from remote sensing data. *The Cryosphere*. 2016, 10 (1): P. 149–158.
- Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S.* Fjord-shelf exchanges controlled by ice and brine production: The interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard. *Cont. Shelf Res.* 2008, 28: 1838–1853. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.015>
- Nilsen F., Skogseth R., Vaardal-Lunde J., Inall M.E.* A simple shelf circulation model: intrusion of Atlantic Water on the West Spitsbergen Shelf. *Journ. of Physical Oceanography*. 2016, (46): 1209–1230.
- Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A.E., Isaksen K.* Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012. *Polar research*. 2014, 33 (1): 21349.
- Nordli Ø., Wyszyński P., Gjelten H., Isaksen K., Łupikasza E., Niedzwiedz T., Przybylak R.* Revisiting the extended Svalbard Airport monthly temperature series, and the compiled corresponding daily series 1898–2018. *Polar Research*. 2020, 39: 3613.
- Onarheim I.H., Smedsrød L.H., Ingvaldsen R.B., Nilsen F.* Loss of sea ice during winter north of Svalbard. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014, 66 (1): 23933.

- Pavlova O., Gerland S., Hop H. Changes in sea-ice extent and thickness in Kongsfjorden, Svalbard (2003–2016). The ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. 2019: 105–136. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46425-1_4
- Pilguy N., Kolendowicz L., Kryza M., Migała K., Czerniecki B. Temporal changes in wind conditions at Svalbard for the years 1986–2015. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 2019, 101 (2): 136–156.
- Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Demidov V.E., Romashova K.V., Barskov K.V., Chechin D.G., Vasilevich I.I., Tretiakov M.V., Ivanov B.V., Repina I.A., Verkullich S.R. Impact of Extreme Weather Events on the Surface Energy Balance of the Low-Elevation Svalbard Glacier Aldegondabreen. *Water*. 2025, 17 (2): 274.
- Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B., Demidov V. Heat balance of a low-elevated Svalbard glacier during the ablation season: A case study of Aldegondabreen. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2023, 55 (1): 2190057. <https://doi.org/10.1080/15230430.2023.2190057>
- Skogseth R., Olivier L.L.A., Nilsen F., Falck E., Fraser N., Tverberg V., Ledang A.B., Vader A., Jonassen M.O., Søreide J., Cottier F., Berge J., Ivanov B.V., Falk-Petersen S. Variability and decadal trends in the Isfjorden (Svalbard) ocean climate and circulation – an indicator for climate change in the European Arctic. *Progress in Oceanography*. 2020, 187: 102394. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102394>
- Smedsrød L.H., Halvorsen M.H., Stroeve J.C., Zhang R., Kloster K. Fram Strait sea ice export variability and September Arctic Sea ice extent over the last 80 years. *The Cryosphere*. 2017, 11 (1): 65–79. <https://doi.org/10.5194/tc-11-65-2017>
- Strzelewicz A., Przyborska A., Walczowski W. Increased presence of Atlantic water on the shelf south-west of Spitsbergen with implications for the Arctic fjord Hornsund. *Progress in Oceanography*. 2022, 200: 102714. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102714>
- Svendsen J.I., Mangerud J. Holocene glacial and climatic variations on Spitsbergen, Svalbard. *The Holocene*. 1997, 7 (1): 45–57.
- Svendsen H., Beszczynska-Möller A., Hagen J.O., Lefauconnier B., Tverberg V., Gerland S., Ørbæk J.B., Bischof K., Papucci C., Zajaczkowski M., Azzolini R., Bruland O., Wiencke C., Winther J.-G., Dallman W. The physical environment of Kongsfjorden–Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar research*. 2002, 21 (1): 133–166. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2002.tb00072.x>
- Promińska A., Falck E., Walczowski W. Interannual variability in hydrography and water mass distribution in Hornsund, an Arctic fjord in Svalbard. *Polar Research*. 2018, 37 (1): 1495546. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1495546>
- Tverberg V., Skogseth R., Cottier F., Sundfjord A., Walczowski W., Inall M.E., Falck E., Pavlova O., Nilsen F. The Kongsfjorden transect: seasonal and interannual variability in hydrography. The ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. Cham: Springer, 2019: 49–104.
- Urbański J.A., Litwicka D. The decline of Svalbard land-fast sea ice extent as a result of climate change. *Oceanologia*. 2022, 64 (3): 535–545.
- Vickers H., Saloranta T., Kołtzw M., van Pelt W.J.J., Malnes E. An analysis of winter rain-on-snow climatology in Svalbard. *Front. Earth Sci.* 2024, 12: 1342731. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1342731>
- Vinje T., Nordlund N., Kvambekk Å. Monitoring ice thickness in Fram Strait. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 1998, 103 (C5): 10437–10449.
- Walczowski W., Beszczynska-Möller A., Wieczorek P., Merchel M., Grynczel A. Oceanographic observations in the Nordic Sea and Fram Strait in 2016 under the IO PAN long-term monitoring program AREX. *Oceanologia*. 2017, 59 (2): 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.12.003>
- Wickström S., Jonassen M.O., Cassano J.J., Vihma T. Present temperature, precipitation, and rain-on-snow climate in Svalbard. *Journ. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020, 125 (14): e2019JD032155.
- Zou X., Ding M., Sun W., Yang D., Liu W., Huai B., Jin S., Xiao C. The surface energy balance of Austre Lovénbreen, Svalbard, during the ablation period in 2014. *Polar Research*. 2021: 40.
- Zhuravskiy D., Ivanov B., Pavlov A. Ice conditions at Gronfjorden Bay, Svalbard, from 1974 to 2008. *Polar Geography*. 2012, 35 (2): 169–176.