

**ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ
HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY****Оригинальная статья / Original paper**<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-291-310>

УДК 556 / 556.12

**Межгодовая изменчивость характеристик снежного покрова
речных водосборов бассейна Грён-фьорд (арх. Шпицберген)
в начале XXI века**

И.И. Василевич✉, М.В. Третьяков

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

✉vasilevich@aari.ru

ID ИИВ, 0000-0002-0918-0576; MBT, 0000-0003-3702-6362

Аннотация. Снежный покров играет одну из ключевых ролей в водном балансе ледников, рек и озер арктических архипелагов. Происходящие в настоящее время климатические изменения в арктическом регионе могут комплексно влиять на снежный покров. ФГБУ «ААНИИ» проводит исследование снежного покрова на архипелаге Шпицберген в районе п. Баренцбург с 2000 г. Цель работы — обобщение и анализ полученных данных с точки зрения межгодовой изменчивости в условиях климатических изменений. В работе приводятся результаты снегомерных съемок, пропуски в наблюдениях восстановлены с использованием статистических методов. Установлено, что в исследуемый период 2000–2024 гг. статистически значимых трендов у основных характеристик снежного покрова (высота, плотность, влагозапас) на момент максимального снегонакопления не обнаружено (–2,6 см/10 лет, –1,0 кг/м³/10 лет и 1,8 мм в. э./10 лет соответственно). Даты схода и образования, а также продолжительность залегания снежного покрова без значительных изменений. Результаты корреляционного анализа демонстрируют чувствительность характеристик снежного покрова высотных водосборов (ледники) к сумме осадков за холодный период, в то время как характеристики более низинных долинных водосборов чувствительны к температуре.

Ключевые слова: снежный покров, Арктика, Шпицберген, высота снежного покрова, водный эквивалент снежного покрова, речные водосборы

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Для цитирования: Василевич И.И., Третьяков М.В. Межгодовая изменчивость характеристик снежного покрова речных водосборов бассейна Грэн-фьорд (арх. Шпицберген) в начале XXI века. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(3):291–310. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-291-310>

Поступила 15.05.2025

После переработки 25.07.2025

Принята 28.07.2025

Interannual variability of snow cover characteristics of the Grønfjord basin (Spitsbergen) at the beginning of the XXI century

Igor I. Vasilevich✉, Mikhail V. Tretiakov

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia*

✉vasilevich@aari.ru

ORCID: 0000-0002-0918-0576; MVT, 0000-0003-3702-6362

Abstract. The snow cover plays one of the key roles in the water balance of water objects in Arctic archipelagos. The current climate changes in the Arctic region can have a complex impact on the snow cover of Arctic archipelagos. Since 2000, the Russian Federal State Budgetary Institution “AARI” has been conducting research on the snow cover on the Spitsbergen Archipelago near Barentsburg as part of a hydrological study. The aim of this work is to generalize and analyze the data obtained from the perspective of interannual variability under conditions of climate change. The paper presents results of snow surveys. Gaps in the observations are restored using statistical methods. It was found that during the study period from 2000 to 2024, no statistically significant trends were observed in the main characteristics of the snow cover (height, density, snow water equivalent) — -2.6 cm/10 years, -1.0 kg/m³/10 years and 1.8 mm w. e./10 years respectively. It was shown that the characteristics of the snow cover at similar objects are well correlated with each other and with the maximum height of the snow cover at the Barentsburg weather station, and they can be used to reconstruct the gaps. The climate in the study area during the cold season is becoming slightly warmer, windier, and drier, though the warmest years are also the wettest. The dates of snow disappearance and onset, as well as the duration of snow cover presence, remain largely unchanged. No relationships were found between the meteorological parameters of the cold period and the height or proportion of basal ice in total watershed liquid-water content. Correlation analysis results demonstrate the sensitivity of high-elevation watershed snow cover characteristics (glaciers) to precipitation totals during the cold period, while lowland valley watershed characteristics are sensitive to temperature. Thus, we currently observe an overall stationary period of snow accumulation conditions, where the increase in cold-season temperatures is partially offset by increased precipitation, and the sensitivity of watershed snow cover characteristics depends on their elevation.

Keywords: snow cover, Arctic, Spitsbergen, snow depth, water equivalent of snow, river catchments

For citation: Vasilevich I.I., Tretiakov M.V. Interannual variability of snow cover characteristics of the Grønfjord basin (Spitsbergen) at the beginning of the XXI century. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(3):291–310. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-3-291-310>

Received 15.05.2025

Revised 25.07.2025

Accepted 28.07.2025

Введение

Снежный покров играет значимую роль в водном балансе поверхностных водных объектов арктических архипелагов, таких как ледники, реки и озера. Снежный покров формирует зимний баланс массы ледников, определяет продолжительность

и объем половодья на реках^{1,2,3}, влияет на устойчивость многолетних мерзлых пород [1], а также химический состав прибрежных морских вод, попадая в них вместе с талым поверхностным стоком. На архипелаге Шпицберген в зимний период снег покрывает от 60 до 100 % территории [2]. Снежный покров чувствителен к климатическим изменениям [3], в связи с этим оценка изменчивости характеристик снежного покрова Шпицбергена и их чувствительности к происходящим в настоящее время климатическим изменениям, ярко проявляющимся на севере Атлантики [4, 5], является актуальной задачей.

Исследования снежного покрова Шпицбергена были начаты в 1934 г. и касались прежде всего баланса массы ледников архипелага [6]. Отечественные наблюдения аналогичного характера были начаты экспедицией Института географии АН СССР в 1965–1967 гг. Немалый вклад в изучение снега как элемента гидрологического режима внесла Шпицбергенская гляциологическая экспедиция Института географии АН СССР, которая существовала с 1976 по 1990 г. [6]. На основе этих наблюдений была получена достаточно тесная связь максимального снегонакопления в долине р. Грэн с суммой осадков холодного периода на метеостанции Баренцбург. С 2001 г. ФГБУ «АНИИ» проводит исследования элементов гидрологического режима и водного баланса речных водосборов в районе п. Баренцбург, частью которых являются снегомерные съемки.

Современные исследования снежного покрова архипелага Шпицберген сконцентрированы преимущественно в западной (Ню-Олесунн, Баренцбург), центральной (Лонгйир) и южной (Хорнсун) частях архипелага и посвящены в основном изучению снежного покрова как элемента баланса массы ледников (реже элемента водного баланса речных водосборов), межгодовой изменчивости физических свойств снежного покрова, а также его химического состава с точки зрения экологии [2, 7, 8]. Большое внимание также уделяется применению и развитию дистанционных методов, георадарной съемке и моделированию [8–11].

В настоящей статье приводятся результаты снегомерных съемок, производившихся на речных водосборах залива Грэн-фьорд в период с 2000 по 2024 г., а также анализ их межгодовой изменчивости и связи с метеорологическими условиями.

Объект исследования, материалы и методы

Объекты исследования

Объектами исследования являются речные водосборы бассейна залива Грэн-фьорд, расположенного в западной части архипелага Шпицберген и примыкающего с юга к заливу Ис-фьорд (рис. 1). На восточном берегу залива расположен российский поселок Баренцбург, где находится Российский научный центр на архипелаге Шпицберген (РНЦШ), логистический центр исследований АНИИ.

Речные водосборы представлены двумя основными морфологическими типами рельефа — горной долиной и внутригорной котловиной с разной степенью оледе-

¹ Методы изучения и расчета водного баланса. Под ред. В.С. Вуглинского. Л.: Гидрометеоиздат; 1981. 398 с.

² Руководство воднобалансовым станциям. Под ред. В.И. Кузнецова. Л.: Гидрометеоиздат; 1973. 305 с.

³ Снег. Справочник. Под ред. Д.М. Грея, Д.Х. Мейла. Л.: Гидрометеоиздат; 1986. 751 с.

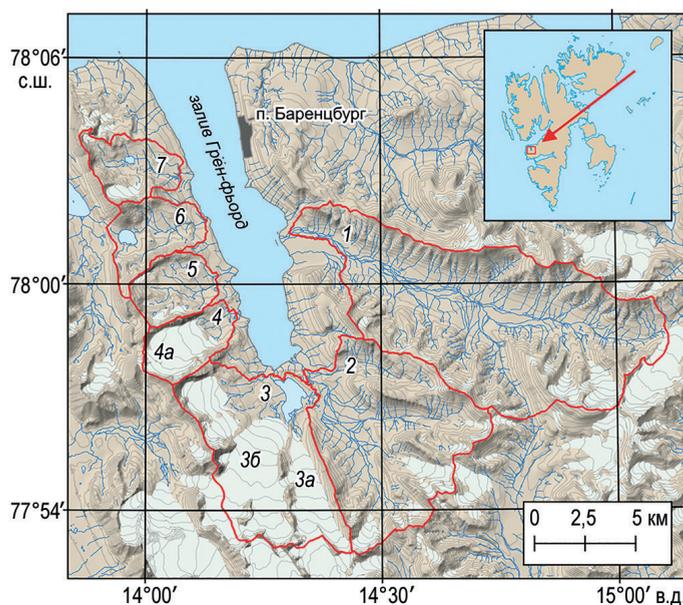


Рис. 1. Карта-схема района исследований.

Красной линией обозначены речные водосборы. Цифрами обозначены водосборы рек: 1 — Грёндален, 2 — Грёнфjord, 3 — Бретъёрна, 4 — Альдегонда, 5 — Брюде, 6 — Конгресс, 7 — Васстак, и ледники: 3a — Восточный Грёнфjord, 3б — Западный Грёнфjord, 4a — Альдегонда

Fig. 1. Scheme of the study area.

The red line indicates the river catchments. The numbers indicate the catchments of the rivers: 1 — Grøndalen, 2 — Grønfjord, 3 — Bretjerna, 4 — Aldegonda, 5 — Bryde, 6 — Kongress, 7 — Vasstak, and glaciers: 3a — East Grønfjord, 3b — West Grønfjord, 4a — Aldegonda

ненности и наличием озер. Площадь водосборов от 11 до 103 км², средняя высота водосборов варьируется в пределах от 176 до 266 м, средний уклон — от 11,7 до 16,2°. На практически всех водосборах присутствуют ледники, их доля от общей площади составляет от 5 до 50 %. Морфометрические характеристики получены на основе материалов ArcticDEM⁴ и спутниковых снимков Landsat⁵ и их последующей обработки в программном обеспечении QGIS (табл. 1).

Для удобства анализа и представления информации в данной статье принято разделение водосборов на непосредственно ледники — Альдегонда, Восточный и Западный Грёнфjord — и долинные водосборы, включающие в себя все оставшиеся водосборы с низкой степенью оледенения, — Грёндален, Брюде, Конгресс, а также безледниковую часть водосбора реки Альдегонда, обозначенную как морена л. Альдегонда.

⁴ Porter C., Howat I., Noh M.-J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. ArcticDEM – Mosaics. Version 4.1. 2023. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W> (accessed 24.04.2025)

⁵ Satellite data source (Landsat and etc.). Earth Explorer. U.S. Geological Survey. 2024. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 24.04.2025)

Таблица 1

**Морфометрические и морфологические характеристики
речных водосборов бассейна залива Грён-фьорд**

Table 1

**Morphometric and morphological characteristics
of river catchments of the Grøn fjord Bay basin**

Водосбор (объект)	Площадь, км ²	Средняя высота, м	Тип рельефа	Степень оледенения, %
Грёндален	102,9	266	горная долина	10
Грёнфьорд	59,5	258	внутригорная котловина	5
Бретъёрна	48,9	253	внутригорная котловина	60
Ледник Восточный Грёнфьорд	7,05	295	ледник	
Ледник Западный Грёнфьорд	16,4	345	ледник	
Альдегонда	11,6	259	горная долина	50
Ледник Альдегонда	5,58	330	ледник	
Морена ледника Альдегонда	6,02	133	горная долина	
Брюде	11,4	219	внутригорная котловина	10
Конгресс	13,3	176	горная долина	0
Васстак	11,8	209	внутригорная котловина	15

Материалы и методы

Для анализа характеристик снегонакопления использованы материалы экспедиционных снегомерных съемок ФГБУ «ААНИИ», производившихся в период с 2000 по 2024 г. на водосборах залива Грён-фьорд.

Снегомерные съемки на водосборах выполнялись в период максимального снегонакопления, с середины апреля по середину мая. Методика съемок основывается на принятых в Росгидромете руководящих документах^{6,7}. На ледниках применялась площадная снегомерная съемка, на равнинах, безледниковых участках водосборов (моренах) и некоторых горных долинах — ландшафтная снегомерная съемка. Площадная съемка представляет собой квазирегулярную сеть точек на объекте с размером шага от 250 до 400 м. Параметры площадной снегомерной съемки определяются на основании результатов предварительной маршрутно-ландшафтной снегомерной съемки, что обеспечивает репрезентативность метода. Ландшафтная съемка представляет собой прямолинейный профиль (либо профили), пересекающий типичные формы рельефа водосбора, на котором производится измерение высоты снежного покрова каждые 100–300 м. Измерение плотности снежного покрова при

⁶ Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеиздат; 1985. 301 с.

⁷ РД 52.25.261-90 Руководство по снегомерным работам в горах. М.: Роскомгидромет СССР. 1991. 127 с.

ландшафтной съемке производится каждые 10 точек, в то же время при площадной съемке на леднике количество шурфов варьируется от 4 до 9 ввиду низкой изменчивости снежного покрова на последних.

На водосборе реки Бретъёрна вследствие высокой степени оледенения снеговой съемка производилась только на ледниках Западный и Восточный Грэнфьорд, съемка на водосборе реки Альдегонда включала в себя отдельные съемки одноименного ледника и внеледниковой части водосбора, включая морену.

Влагозапас водосбора (Q) рассчитывался как сумма влагозапасов снежного покрова, притертой ледяной корки, мокрого снега и воды:

$$Q = Q_{\text{CH}} + Q_{\text{ЛК}} + Q_{\text{МС}} + Q_{\text{В}},$$

где Q — суммарный влагозапас объекта или водосбора, мм в. э.; Q_{CH} — влагозапас снежного покрова, мм в. э.; $Q_{\text{ЛК}}$ — влагозапас притертой ледяной корки, мм в. э.; $Q_{\text{МС}}$ — влагозапас мокрого снега, мм в. э.; $Q_{\text{В}}$ — влагозапас жидкой фазы в снежном покрове, мм в. э.

Влагозапас снежного покрова (Q_{CH}) на водосборе рассчитывался как произведение средних по водосбору высоты и плотности снежного покрова, а также размерного коэффициента 0,01. Влагозапасы притертой ледяной корки ($Q_{\text{ЛК}}$), мокрого снега ($Q_{\text{МС}}$) и жидкой фазы ($Q_{\text{В}}$) рассчитывались как произведение средней по водосбору высоты этих слоев, плотности, принятой равной 800 кг/м^3 для притертой ледяной корки и мокрого снега и 1000 кг/м^3 для жидкой фазы, и размерного коэффициента 0,01.

При расчете характеристик снежного покрова для всего водосбора залива Грэнфьорд, а также при сравнительном анализе групп объектов (долинные водосборы и ледники), с целью учета различий площадей водосборов применялся пересчет на средневзвешенное значение данных характеристик, вычисляемый по формуле:

$$A_{\text{СВ}} = \frac{\sum_i^n A_i S_i}{\sum_i^n S_i},$$

где $A_{\text{СВ}}$ — средневзвешенное значение характеристики; A_i — значение характеристики для i -го водосбора; S_i — площадь i -го водосбора.

Межгодовая изменчивость оценивалась основными методами статистического анализа — регрессионным и корреляционным. Оценка статистической значимости линейных трендов межгодовой изменчивости рассматриваемых в работе рядов метеопараметров и характеристик снежного покрова осуществлялась согласно методическим рекомендациям⁸. Линейный тренд признавался статистически значимым при выполнении условия:

$$r/\sigma_R \geq \beta,$$

где r — коэффициент корреляции линейного тренда; σ_R — случайная средняя квадратическая ошибка; β — статистический критерий, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ критерий $\beta = 2$. Случайная средняя квадратическая ошибка σ_R рассчитывается по формуле:

$$\sigma_R = (1 - r^2) / \sqrt{(n - 1)},$$

где r — коэффициент корреляции линейного тренда; n — длина выборки.

⁸ Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История; 2010. 162 с.

Восстановление пропусков в наблюдениях осуществлялось с использованием статистических моделей. Высота и плотность снежного покрова рассчитывались через объекты-аналоги. Для реперных объектов с наибольшими рядами наблюдений (Грёндален, Альдегонда) в качестве независимых переменных выступали максимальная высота снежного покрова, зафиксированная за сезон на метеостанции п. Баренцбург, а также сумма температур за холодный период и сумма осадков за январь. Для анализа качества связи между объектами были построены корреляционные матрицы высоты и плотности снежного покрова всех водосборов. Выбор объекта-аналога зависел от типа объектов, длины ряда совместных наблюдений,

Таблица 2

Характеристики применяемых для восстановления данных уравнений

Table 2

Characteristics of equations used to restore data

Объект	Рассчитываемая величина	Независимая переменная (объект-аналог)	Длина ряда	R^2	F	p	Станд. ошибка
Грёндален	H_{CH}	H_{CH} (Бб)	22	0,30	10,13	0,0047	16,8 см
	ρ	$T_{\text{СХП}}$	22	0,24	6,22	0,02	39 кг/м ³
	$H_{\text{ЛК}}$	H_{CH} (Гн)	19	0,31	7,50	0,01	8,55 см
Ледник Восточный Грёнфьорд	H_{CH}	H_{CH} (ЗГФ)	10	0,84	39,7	0,00001	14,06 см
	ρ	ρ (ЗГФ)	10	0,77	27,4	0,001	27 кг/м ³
Ледник Западный Грёнфьорд	H_{CH}	H_{CH} (Ал)	18	0,71	39,7	0,00001	14,1 см
	ρ	ρ (Ал)	18	0,67	32,3	0,00003	23 кг/м ³
Ледник Альдегонда	H_{CH}	H_{CH} (Бб)	22	0,55	24,3	0,0001	20,6 см
	ρ	$T_{\text{СХП}} + P_{\text{ЯНВ}}$	22	0,40	6,21	0,008	35 кг/м ³
Морена ледника Альдегонда	H_{CH}	H_{CH} (Гн)	12	0,64	17,4	0,002	17,5 см
	ρ	ρ (Гн)	12	0,53	11,4	0,007	38 кг/м ³
Брюде	$H_{\text{ЛК}}$	ДОТ	12	0,50	9,99	0,01	4,21 см
	H_{CH}	H_{CH} (ЗГФ)	8	0,55	7,48	0,034	10,9 см
Конгресс	ρ	ρ (ЗГФ)	8	0,55	7,30	0,035	31 кг/м ³
	H_{CH}	H_{CH} (Гн)	9	0,71	17,1	0,0044	6,31 см
	ρ	ρ (Гн)	9	0,45	5,73	0,048	58 кг/м ³

Примечание. Жирным выделены значимые коэффициенты (при $\alpha = 0,05$). Сокращения: Бб — Баренцбург, Гн — Грёндален, ВГФ — л. Восточный Грёнфьорд, ЗГФ — л. Западный Грёнфьорд, Ал — л. Альдегонда, м. Ал — морена л. Альдегонда, Бр — Брюде, Кг — Конгресс, $T_{\text{СХП}}$ — сумма температур за холодный период, $P_{\text{ЯНВ}}$ — сумма осадков за январь, ДОТ — количество дней с положительной среднесуточной температурой за холодный период, R^2 — коэффициент детерминации, F — статистический критерий Фишера, p — значение p -критерия.

Note. Significant coefficients (at $\alpha = 0,05$) are highlighted in bold. Abbreviations: Бб — Barentsburg, Гн — Grøndalen, ВГФ — East Grøn fjord glacier, ЗГФ — West Grøn fjord glacier, Ал — Aldegonda glacier, м. Ал — Aldegonda glacier moraine, Бр — Bryde, Кг — Kongress, $T_{\text{СХП}}$ — sum of temperatures for the cold period, $P_{\text{ЯНВ}}$ — sum of precipitation for January; ДОТ — number of days with positive average daily temperature for the cold period, R^2 — determination coefficient, F — Fisher's statistical criterion, p — p -criterion value.

статистической значимости (уровень значимости $\alpha = 0,05$) и качества связи. Применяемые статистические модели проверялись на независимом материале (результаты снегомерной съемки 2025 г.) и показали удовлетворительные результаты.

Восстановленное значение влагозапасов рассчитывалось по описанной выше методике. На водосборах с постоянно присутствующей притертой ледяной коркой (Грёндален, морена ледника Альдегонда) влагозапас рассчитывался как сумма влагозапасов снежного покрова и ледяной корки, высота которой также определялась при помощи статистических моделей. Влагозапасы мокрого снега Q_{MC} и жидкой фазы Q_B обычно невелики и регистрируются только в долине Грёндален, поэтому при восстановлении пропусков не учитывались. Характеристики моделей, применяемых для восстановления пропусков, приведены в табл. 2.

Пропуски в наблюдениях водосборов рек Грёнфьорд и Васстак, отраженных на рис. 1 и в табл. 1, не восстанавливались вследствие низкой продолжительности наблюдений на этих водосборах (6 и 4 лет соответственно), а их характеристики снежного покрова не учитывались в данной работе.

Результаты исследований и обсуждение

Межгодовая изменчивость высоты и влагозапаса снежного покрова

Характер формирования снежного покрова водосбора определяется результатом взаимодействия геоморфологических и метеорологических факторов и условий, таких как макрорельеф, экспозиция, высота местности, форма рельефа (наличие аккумулятивных форм), тип подстилающей поверхности, лавины, режим и количество осадков, оттепели, деятельность ветра. Таким образом, различия в характере распределения снежного покрова встречаются не только между водосборами на

Таблица 3

Сводная таблица характеристик снегонакопления на водосборах залива Грён-фьорд

Table 3

Summary table of snow accumulation characteristics in the Grøn fjord bay catchments

Объект	H, см				ρ , кг/м ³				Q, мм в. э.			
	Ср.	Мин.	Макс.	Тренд, см/10 лет	Ср.	Мин.	Макс.	Тренд, кг/м ³ /10 лет	Ср.	Мин.	Макс.	Тренд, мм в. э./10 лет
Гн	58	22	94	-3,49	341	270	410	-12	296	173	501	7,1
ВГФ	132	75	171	0,07	394	271	494	-4	525	203	755	-0,6
ЗГФ	154	110	196	-1,63	395	323	471	-2	610	365	843	-7,9
Ал	154	101	200	-2,79	380	294	467	-4	590	365	850	-14,3
м. Ал	93	46	139	3,09	347	269	440	-5	380	183	541	2,4
Бр	91	56	114	-1,45	347	294	420	-2	316	171	429	-5,8
Кг	75	51	94	-1,69	346	230	476	-1	261	159	371	-12,9
Средне-взвешенное	79	48	113	-2,59	351	281	417	-1	349	203	526	1,83

Примечание. Сокращения: Гн — Грёндален, ВГФ — л. Восточный Грёнфьорд, ЗГФ — л. Западный Грёнфьорд, Ал — л. Альдегонда, м. Ал — морена л. Альдегонда, Бр — Брюде, Кг — Конгресс.

Note. Abbreviations: Гн — Grøndalen, ВГФ — East Grøn fjord glacier, ЗГФ — West Grøn fjord glacier, Ал — Aldegonda glacier, м. Ал — Aldegonda glacier moraine, Бр — Bryde, Кг — Kongress.

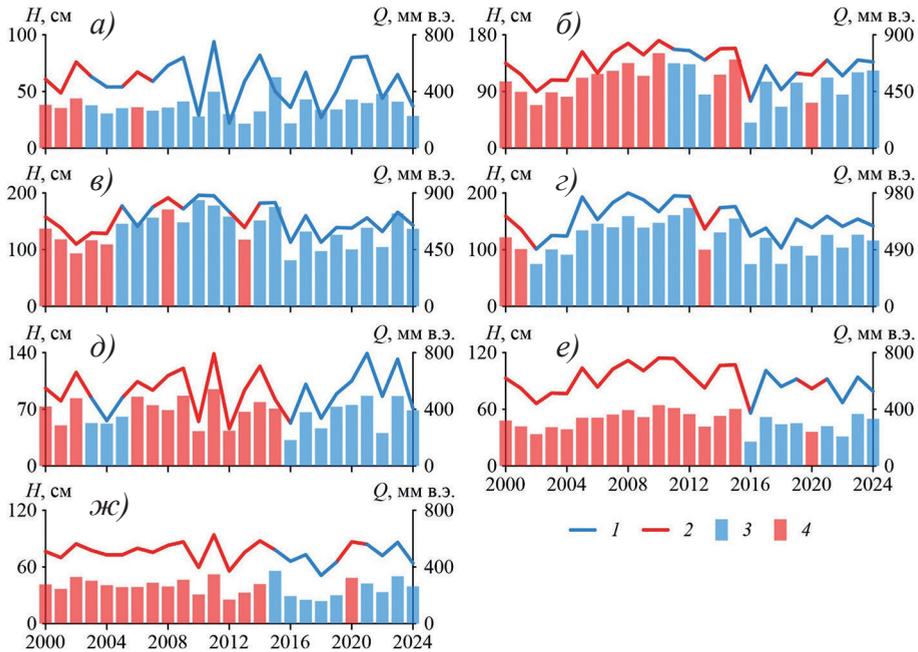


Рис. 2. Межгодовая изменчивость высоты и влагозапаса снежного покрова водосборов залива Грөн-фьорд за 2000–2024 гг. а) — Грёндален, б) — л. Восточный Грөнфьорд, в) — л. Западный Грөнфьорд, г) — л. Альдегонда, д) — морена л. Альдегонда, е) — Брюде, ж) — Конгресс.

1 — измеренная высота снежного покрова, 2 — восстановленная высота снежного покрова, 3 — измеренный влагозапас, 4 — восстановленный влагозапас.

Fig. 2. Interannual variability of snow cover depth and liquid-water content in the Grønfyord bay catchments for 2000–2024. а) — Grøndalen, б) — East Grønfyord glacier, в) — West Grønfyord glacier, г) — Aldegonda glacier, д) — Aldegonda glacier moraine, е) — Bryde, ж) — Kongress.

1 — measured snow depth, 2 — reconstructed snow depth, 3 — measured snow water equivalent, 4 — reconstructed snow water equivalent

всем архипелаге, но и у близких по физико-географическим свойствам водосборов одного района (см. табл. 1).

На рис. 2 приведена межгодовая изменчивость высоты снежного покрова и суммарного влагозапаса водосборов залива Грөн-фьорд; в табл. 3 — сводные данные характеристик снегонакопления.

Характеристикам снежного покрова (высота, плотность, влагозапас) исследуемых объектов за рассматриваемый период с 2000 по 2024 г. свойственна низкая изменчивость и отсутствие статистически значимых трендов. Средневзвешенная многолетняя высота снежного покрова по водосбору залива Грөн-фьорд составляет 79 см. Наибольшие высоты закономерно наблюдаются на ледниках — средняя многолетняя высота снежного покрова ледников Альдегонда и Западный Грөнфьорд 154 см, ледника Восточный Грөнфьорд — 132 см. Средневзвешенная высота снежного покрова в долинных водосборах в среднем составляет 44 % от высоты на ледниках. Средняя многолетняя высота долинных водосборов варьируется в пределах от 58 см (Грёндален) до 93 см (мор. л. Альдегонда). Средний коэффициент вариации высоты снежного

покрова для всех объектов равен 0,21, что говорит о малой изменчивости. Наибольшая изменчивость наблюдается в долине Грёндален (0,32) и морене ледника Альдегонда (0,29). Для других объектов эта величина не превышает 0,19. Среднее значение тренда высоты снежного покрова составляет $-1,13$ см/10 лет (средневзв. $-2,59$ см/10 лет) и варьируется в пределах от $-3,49$ до $3,09$ см/10 лет. Все тренды отрицательны, за исключением трендов ледника Восточный Грэнфьорд ($0,07$ см в декаду) и мор. л. Альдегонда ($3,09$ см в декаду), и статистически не значимы.

Средневзвешенное многолетнее значение плотности снежного покрова водосборов залива Грэн-фьорд составляет 351 кг/м³. Как и в случае с высотой, большие значения плотности соответствуют ледникам. Средневзвешенная плотность снежного покрова на ледниках — 392 кг/м³, долинных водосборов — 342 кг/м³. Плотность снежного покрова обладает низкой изменчивостью — средний коэффициент вариации равен 0,09. Для всех объектов характерен статистически не значимый тренд — -1 кг/м³ в 10 лет (средневзв.). Наибольший тренд наблюдается на водосборе Грёндален, равный -12 кг/м³ в 10 лет.

Средневзвешенное многолетнее значение влагозапаса для всех водосборов составляет 349 мм в. э. Влагозапас является функцией высоты и плотности снежного покрова, но, несмотря на меньшую плотность у долинных водосборов, их средневзвешенный влагозапас составляет большую долю от влагозапаса ледников (53 %), чем высота, что обуславливается наличием притертого льда в долинах. Коэффициент вариации для всех водосборов в пределах от 0,18 до 0,26, что говорит о низкой изменчивости. Средневзвешенный тренд по всем объектам составляет $1,8$ мм в. э./10 лет. Тренды преимущественно отрицательны, самые большие значения у л. Альдегонда ($-14,3$ мм в. э./10 лет) и Конгресса ($-12,9$ мм в. э./10 лет). Все тренды статистически не значимы.

Взаимосвязь характеристик снежного покрова исследуемых объектов неоднозначна (рис. 3). Характеристики между сезонами изменяются преимущественно квазисинхронно. Как правило, наиболее сильная связь между межгодовыми значениями высоты, плотности и влагозапаса снежного покрова характерна для близких по морфологическим свойствам объектов.

Приведенные далее величины коэффициентов корреляции получены при анализе невосстановленных рядов наблюдений. Коэффициенты корреляции между высотами снежного покрова ледников Альдегонда, Западный Грэнфьорд и Восточный Грэнфьорд варьируются в пределах от 0,84 до 0,92, у долинных водосборов Грёндален, Конгресс и морены ледника Альдегонда — от 0,80 до 0,95. Тем не менее, несмотря на близость свойств и близкое расположение друг к другу, у некоторых объектов отсутствует статистически значимая связь — коэффициенты корреляции между высотой снежного покрова водосбора Брюде и соседними Конгрессом и мореной ледника Альдегонда составляет 0,33 и 0,66 соответственно. У большинства объектов также присутствует статистически значимая связь между высотой снежного покрова и максимальным зарегистрированным за период снегонакопления значением высоты снежного покрова на метеостанции п. Баренцбург — средний коэффициент корреляции для ледников 0,76, для долинных водосборов — 0,65 (водосборы Грёндален и морена л. Альдегонда).

Характер связи между значениями плотности и влагозапаса снежного покрова среди ледников и долинных водосборов следующий: для ледников характерна хорошая связь, средние коэффициенты корреляции для влагозапаса и плотности 0,93

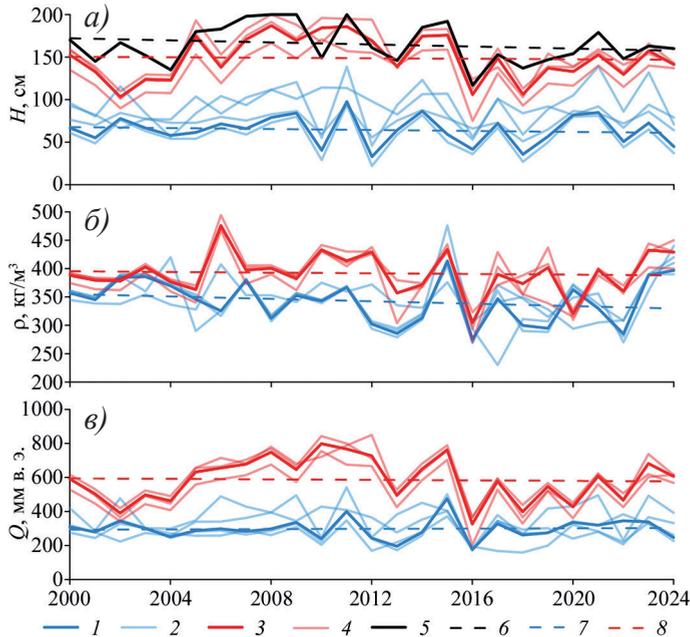


Рис. 3. Межгодовая изменчивость высоты *a)*, плотности *б)* и влагозапаса *в)* снежного покрова водосборов залива Грён-фьорд.

1 — средневзвешенное значение характеристик снежного покрова долинных водосборов; 2 — характеристики снежного покрова долинных водосборов; 3 — средневзвешенное значение характеристик снежного покрова ледников; 4 — характеристики снежного покрова ледников; 5 — максимальная высота снежного покрова в п. Баренцбург; 6 — линейный тренд максимальной высоты снежного покрова в п. Баренцбург; 7 — линейные тренды средневзвешенных характеристик снежного покрова долинных водосборов; 8 — линейные тренды средневзвешенных характеристик снежного покрова ледников

Fig. 3. Interannual variability of snow cover height *a)*, density *б)* and water equivalent *в)* in the Grønfyord bay catchments.

1 — weighted average value of snow cover characteristics of valley catchments; 2 — snow cover characteristics of valley catchments; 3 — weighted average value of glacier snow cover characteristics; 4 — glacier snow cover characteristics; 5 — maximum snow cover height in Barentsburg; 6 — linear trend of maximum snow cover height in Barentsburg; 7 — linear trends of weighted average snow cover characteristics of valley catchments; 8 — linear trends of weighted average snow cover characteristics of glaciers

и 0,81 соответственно; статистически значимая связь для долинных водосборов обнаруживается только у значений плотности снежного покрова (0,73 в среднем); отсутствие связи для значений влагозапаса долинных водосборов преимущественно является следствием присутствия притертой ледяной корки и ее неоднородности внутри сезона между водосборами.

Продолжительность залегания снежного покрова

Время схода снежного покрова (рис. 4) остается преимущественно неизменным — средняя дата схода снежного покрова 15 июня (вариации в пределах 31 мая — 27 июня), тренд статистически не значим (0,8 сут/10 лет). Средняя дата появления устойчивого снежного покрова — 5 октября с вариацией в пределах от 10 сентября до 1 ноября, тренд 1,2 сут/10 лет. Дата максимальной зарегистрированной высоты снежного покрова на станции испытывает флуктуации на протяжении всего

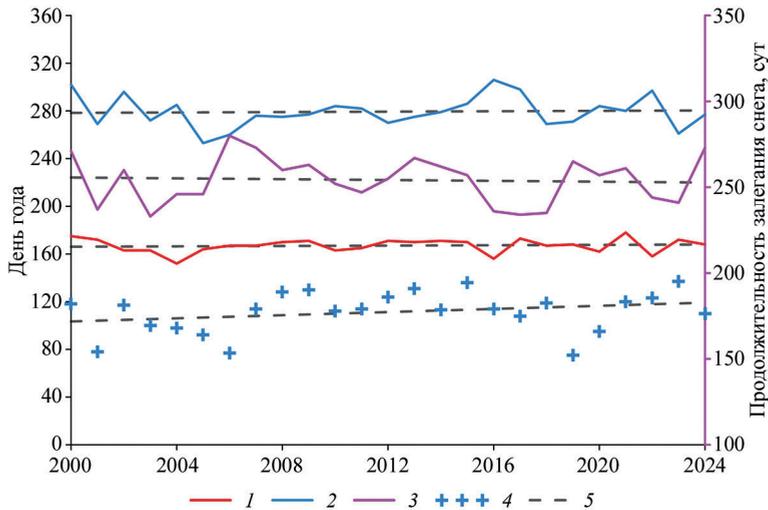


Рис. 4. Даты начала залегания, схода и максимальной высоты снежного покрова, а также продолжительность его залегания по данным метеостанции п. Баренцбург.

1 — дата схода; 2 — дата начала залегания; 3 — продолжительность залегания; 4 — дата максимальной высоты снега на метеостанции п. Баренцбург; 5 — линейные тренды

Fig. 4. Dates of the onset, melting and maximum snow cover depth, as well as the duration of its occurrence according to the Barentsburg meteorological station.

1 — disappearance date; 2 — onset date; 3 — occurrence duration; 4 — date of maximum snow depth at Barentsburg meteorological station; 5 — linear trends

рассматриваемого периода, средняя дата — 21 апреля, имеет сравнительно более выраженный, но статистически не значимый, тренд на увеличение (6,6 сут/10 лет). Среднее количество дней с наличием снежного покрова 254, имеет слабый и незначимый тренд на снижение — 1,2 сут/10 лет. Изменчивость продолжительности залегания снежного покрова обуславливается преимущественно изменчивостью даты появления снежного покрова.

Межгодовая изменчивость метеопараметров и связь с характеристиками снежного покрова

Климат Шпицбергена в значительной степени обуславливается расположением архипелага на основном маршруте переноса атмосферного и океанического тепла в Арктику и претерпевает значительные изменения в последние десятилетия [12]. В свою очередь на западную часть архипелага, где располагается залив Грэн-фьорд, влияние оказывает теплое Западно-Шпицбергенское течение.

На рис. 5 приведена межгодовая изменчивость средних суточных значений температуры и скорости ветра, а также суммы осадков за холодные периоды (началом и концом периода являются устойчивые переходы температуры ниже и выше 0 °C соответственно) с 2000 по 2024 г. по данным метеостанции п. Баренцбург. В табл. 4 даны статистические характеристики указанных метеопараметров, дополненные значениями продолжительности холодного периода и длиной оттепелей.

Для рассматриваемых метеопараметров характерна низкая изменчивость ($C_v \leq 0,22$). Скорость ветра имеет статистически значимый тренд на увеличение (0,2 м/с в 10 лет).

Interannual variability of snow cover characteristics of the Grønfyord basin (Spitsbergen)...

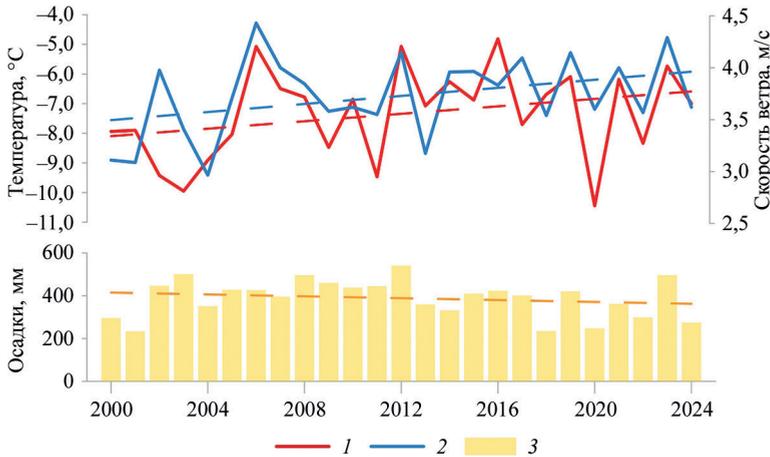


Рис. 5. Межгодовая изменчивость средних значений температуры и скорости ветра, а также суммы осадков за холодные периоды с 2000 по 2024 г.

1 — температура, 2 — скорость ветра, 3 — сумма осадков. Штрихом нанесены линии трендов

Fig. 5. Interannual variability of mean values of temperature and wind speed, as well as precipitation for cold periods from 2000 to 2024.

1 — temperature, 2 — wind speed, 3 — precipitation. The dashed lines indicate trend lines

Таблица 4

Сводная таблица статистических характеристик метеопараметров
в период с 2000 по 2024 г.

Table 4

Summary table of meteorological parameters' statistical characteristics
for the period from 2000 to 2024

	Темпе- ратура, °C	Количество осадков, мм	Скорость ветра, м/с	Продолжительность холодного периода, сут	Оттепели, сут
Холодный период					
Среднее	-7,34	389	3,73	236	9,2
Мин	-10,5	234	2,97	191	2
Макс	-4,82	541	4,43	263	20
Сv	-0,21	0,22	0,10	0,08	0,46
Тренд	0,63 °C/10 лет	-21,9 мм/10 лет	0,19 м/с/10 лет	-10,9 сут/10 лет	-1,0 сут/10 лет
Год					
Среднее	-3,12	569	3,45	—	—
Мин	-5,81	382	2,65	—	—
Макс	-0,37	797	3,93	—	—
Сv	-0,35	0,13	0,07	—	—
Тренд	0,91 °C/10 лет	15,1 мм/10 лет	0,15 м/с/10 лет	—	—

Примечание. Жирным выделены статистически значимые тренды ($\alpha=0.05$).

Note. Statistically significant trends are highlighted in bold ($\alpha = 0.05$).

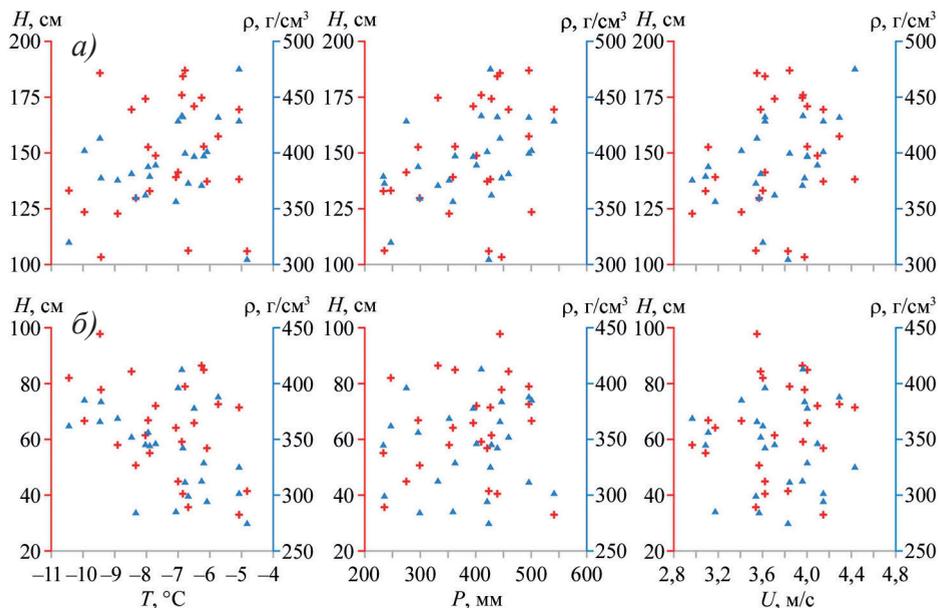


Рис. 6. График зависимости средних значений высоты и плотности снежного покрова на ледниках *а)* и в долинных водосборах *б)* от метеопараметров (среднесуточные температура и скорость ветра и сумма осадков за холодный период)

Fig. 6. Graph of the dependence of average values of snow cover depth and density on glaciers *a)* and in valley catchments *б)* on meteorological parameters (average daily temperature and wind speed, and the amount of precipitation during the cold period)

Значения трендов для суммы осадков и температуры составляют $-21,9$ мм/10 лет и $0,6$ °C/10 лет соответственно. Продолжительность холодного периода имеет низкую изменчивость и статистически значимый тренд на уменьшение, составляющий $-10,9$ дней за десятилетие. Количество дней с оттепелями за холодный период имеет высокую изменчивость ($Cv = 0,46$) и статистически не значимый тренд на снижение ($-1,0$ сут/10 лет).

Статистически значимые тренды обнаружены у среднегодовых значений температуры воздуха ($0,91$ °C/10 лет) и скорости ветра ($0,15$ м/с/10 лет). Среднегодовой температуре также свойственна высокая изменчивость ($Cv = 0,46$). Сумма осадков за год имеет положительный статистически не значимый тренд ($15,1$ мм/10 лет).

При более подробном рассмотрении межгодовой изменчивости метеопараметров (анализировалась межгодовая изменчивость среднемесячных значений метеопараметров для каждого месяца отдельно) значительных отличий от текущего анализа среднесуточных величин за холодный период не обнаружено, что говорит об отсутствии существенных изменений распределения приведенных метеопараметров внутри холодного периода за рассматриваемый диапазон лет.

Таким образом, за рассматриваемый временной диапазон (2000–2024) холодные периоды имеют тенденцию к сокращению продолжительности, повышению температуры и средней скорости ветра и уменьшению количества выпадающих осадков. В то же время с точки зрения годовых значений метеопараметров климат в районе п. Баренцбург за рассматриваемый период становится более теплым, влажным и ветреным. Для анализа взаимосвязи изменчивости метеопараметров за

Таблица 5

**Связь средних значений характеристик снежного покрова
на ледниках и в долинных водосборах
и метеопараметров за холодный период**

Table 5

**Relationship between average values of snow cover characteristics
on glaciers and in valley catchments,
and meteorological parameters during the cold period**

Тип объекта	Характеристика	Температура	Сумма осадков	Скорость ветра
Ледники	Высота	0,15	0,38 (0,059)	0,21
	Плотность	0,31	0,40 (0,050)	0,42 (0,04)
	Влагозапас	0,26	0,46 (0,019)	0,33 (0,09)
Долинные водосборы	Высота	-0,39 (0,05)	0,14	0,12
	Плотность	-0,44 (0,03)	0,07	-0,04
	Влагозапас	-0,38 (0,06)	0,09	0,21

Примечание. В скобках приведено p -значение; жирным выделены статистически значимые коэффициенты (при уровне значимости $\alpha = 0,05$).

Note. The p -value is given in brackets; statistically significant coefficients are highlighted in bold (at a significance level of $\alpha = 0,05$).

холодный период и характеристик снежного покрова были построены точечные графики функций (рис. 6) и корреляционная матрица (табл. 5).

Характеристики снежного покрова (высота, плотность и влагозапас) ледников имеют слабую статистическую связь с приведенными метеопараметрами. Наибольшие коэффициенты корреляции обнаруживаются между характеристиками снежного покрова ледников и суммой осадков за соответствующие холодные периоды, однако только одна характеристика имеет статистически значимую связь с суммой осадков при уровне значимости $\alpha = 0,05$ — влагозапас ($r = 0,46$, $p = 0,02$). Высота и плотность снежного покрова ледников имеют практически идентичные, находящиеся на границе статистической значимости связи с суммой осадков — $r = 0,38$, $p = 0,059$ для высоты и $r = 0,40$, $p = 0,05$ для плотности. Также статистически значимая связь обнаруживается между плотностью и средней скоростью ветра за холодный период ($r = 0,42$, $p = 0,04$), остальные коэффициенты корреляции между характеристиками снега и другими метеопараметрами лежат в пределе от 0,15 до 0,31.

Высота и плотность снежного покрова долинных водосборов имеют статистически значимую связь с среднесуточной температурой холодного периода — соответствующие коэффициенты корреляции для высоты, плотности и влагозапаса составляют $-0,39$ ($p = 0,05$) и $-0,44$ ($p = 0,03$). При этом связь влагозапаса и температуры находится на границе статистической значимости ($r = -0,38$, $p = 0,06$). Связь между характеристиками снежного покрова долин и остальными метеопараметрами не обнаружена.

Доля притертой ледяной корки в общем влагозапасе долинных водосборов

Значительную часть влагозапаса долинных водосборов составляет притертая ледяная корка, образовавшаяся на поверхности почвы в результате оттепелей, выпадения жидких осадков на снежную толщу низкой толщины и намерзания поверхностного стока различного генезиса.

Средняя толщина притертой ледяной корки (ПЛК) в долине Грёндален варьируется в пределах от 0,63 до 37,0 см (средняя толщина 11,8 см) при коэффициенте вариации 0,79, что говорит о ее высокой изменчивости. Относительно общих влагозапасов долины доля влагозапаса притертой ледяной корки в среднем составляет 32 % и изменяется в пределах от 2 до 73 % (рис. 7). Наблюдаемая средняя толщина притертой ледяной корки для морены л. Альдегонда имеет схожие статистические характеристики, ключевыми из которых являются сильная изменчивость и большая амплитуда. Тем не менее среднее значение толщины притертой корки и доли в общем влагозапасе водосбора существенно ниже — среднее 5,9 см, доля 16 %. Для остальных долинных водосборов (Брюде, Конгресс) характерна незначительная высота притертой ледяной корки.

Высота ПЛК на водосборах Грёндален и морена л. Альдегонда имеет статистически не значимые тренды, равные 3,1 и $-0,6$ см/10 лет соответственно. Это соблюдается и для трендов доли ПЛК в общих влагозапасах водосборов, где соответствующие значения трендов равны 6,9 и $-0,8$ %/10 лет.

Статистически значимая связь между метеопараметрами холодного периода (среднесуточная температура, сумма осадков, средняя скорость ветра) и высотой и долей в общих влагозапасах ПЛК обнаружена только у температуры и долей ПЛК морены л. Альдегонда ($r = 0,46$, $p = 0,02$).

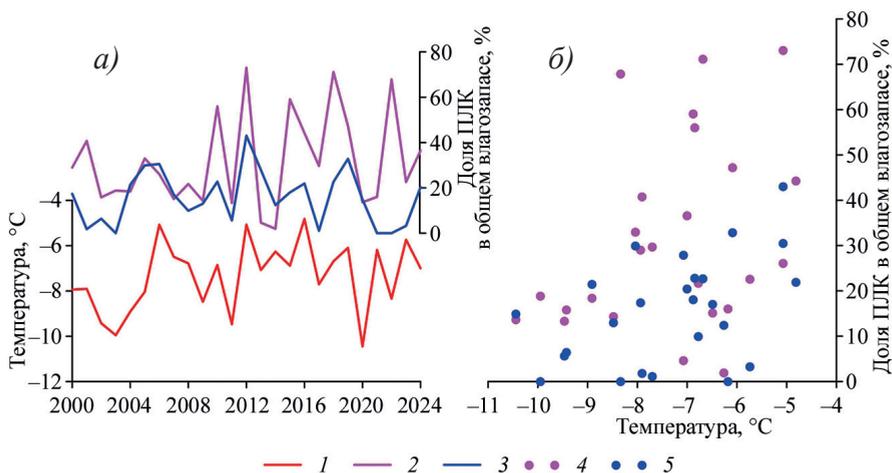


Рис. 7. Характеристики притертой ледяной корки от общего влагозапаса водосборов Грёндален и морены л. Альдегонда. а) — межгодовая изменчивость доли притертой ледяной корки; б) — зависимость доли притертой ледяной корки от среднесуточной температуры холодного периода. 1 — среднесуточная температура холодного периода; 2 — доля притертой ледяной корки в общем влагозапасе в долине Грёндален; 3 — доля притертой ледяной корки в общем влагозапасе на морене л. Альдегонда; 4 — Грёндален; 5 — морена л. Альдегонда

Fig. 7. Characteristics of the basal ice share in the total liquid-water content of catchments Grøndalen Valley and Aldegonda glacier moraine. а) — interannual variability of the basal ice share; б) — dependence of the basal ice share on mean daily temperature during cold period.

1 — mean daily temperature during cold period; 2 — basal ice share in liquid-water content in the Grøndalen Valley; 3 — basal ice share in total liquid-water content of Aldegonda glacier moraine; 4 — Grøndalen; 5 — Aldegonda glacier moraine

Обсуждение

Согласно полученным результатам, высота, плотность и влагозапас снежного покрова водосборов залива Грён-фьорд в начале XXI в. не испытывают статистически значимых изменений, полученные тренды характеристик близки к нулю, что согласуется с результатами других исследований снежного покрова архипелага Шпицберген [8, 9]. В [8] авторы в промежутке с 1961 по 2012 г. находят слабоположительные и статистически не значимые тренды влагозапаса снежного покрова, и, согласно их выводам, долгосрочная тенденция также незначительна.

В то же время исследования [5, 8, 9] находят на большей части архипелага Шпицберген тренд на сокращение продолжительности залегания снежного покрова, положительный временной сдвиг в появлении устойчивого снежного покрова, а также более ранний сход снежного покрова, ссылаясь на быстрое потепление Арктики. Отсутствие значимого тренда даты схода снежного покрова во время потепления для всего архипелага авторы связывают с компенсацией повышения температуры количеством осадков. Данные результаты в целом совпадают с результатами, полученными в нашей работе. Применительно к бассейну залива Грён-фьорд также замечено, что в период с 2006 по 2013/14 г. даты начала устойчивого снегозалегаания и схода снежного покрова, а также продолжительность снегозалегаания были относительно статичны в сравнении с другими временными периодами, что можно объяснить сменой атмосферной циркуляции [13].

Климат Шпицбергена пространственно неоднороден. Наиболее сильные климатические изменения происходят на севере и северо-востоке архипелага [8], в то время как на западной и южной частях он более статичен, что может быть следствием влияния Западно-Шпицбергенского течения. По данным метеостанции п. Баренцбург в начале XXI в. в холодный период наблюдается слабое потепление (тренд среднесуточной температуры холодного периода $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), усиление ветра ($0,2\text{ м/с}/10\text{ лет}$), а также снижение суммы осадков ($-21,9\text{ мм}/10\text{ лет}$). Среди полученных трендов статистическую значимость имеет только усиление ветра. Результаты анализа климатических изменений годовых значений метеопараметров (среднегодовая температура воздуха и скорость ветра, сумма осадков за год) по данным метеостанции п. Баренцбург также согласуются с аналогичными исследованиями [5, 8]. Тренд на снижение количества осадков в холодный период статистически не значим, а сумма осадков не имеет связи с продолжительностью холодного периода, что в совокупности с положительным трендом годовой суммы осадков свидетельствует о перераспределении режима осадков внутри года.

Отсутствие качественных статистически значимых линейных связей между метеопараметрами и характеристиками снежного покрова в бассейне залива Грён-фьорд является следствием вариативности и динамики метеорологических условий в сочетании с физико-географическими особенностями каждого объекта или водосбора в целом. В то же время полученные результаты корреляционного анализа демонстрируют отличия в условиях снегозалегаания, которые проявляются в наличии статистически значимой связи у характеристик снежного покрова ледников с суммой осадков за холодный период, в то время как характеристики долин имеют связи только со средней температурой холодного периода. Таким образом, можно предположить, что вследствие малой средней высоты рельефа характеристики снежного покрова долинных водосборов более чувствительны к изменениям температуры, чем

осадков или ветра, в то время как ледники, имеющие большую высоту, демонстрируют чувствительность к осадкам.

Между высотой снега на метеостанции Баренцбург и высотой снега на водосборах существует статистически значимая связь, как было показано в табл. 2 и на рис. 3. Замечено, что характеристики снежного покрова у однотипных объектов, особенно ледников, как правило, имеют статистически значимую связь, которую можно использовать при реконструкции пропусков данных или реанализе (так же как и связь с максимальной высотой снега на метеостанции). С этой точки зрения наиболее репрезентативными объектами являются Грёндален для долинных водосборов и ледник Альдегонда для ледников. Значимую роль в этом выборе играет длина рядов наблюдений на этих объектах.

В статье не рассмотрено влияние горизонтального переноса снежного покрова, что может стать предметом будущих исследований. В то же время, по данным авторов, полученным в ходе работ 2022 г. на востоке архипелага Шпицберген в долине Агард, горизонтальный метелевый перенос снежного покрова может оказывать существенное влияние на характеристики снежного покрова. Согласно полученным результатам, под воздействием горизонтального переноса снега с морского ледяного покрова плотность снежного покрова в долине Агард достигала значений, характерных для ледников залива Грён-фьорд, а высота была в среднем выше, чем у долин залива. Основную роль здесь играет экспозиция долины в сочетании с наличием ледяного покрова на море, что косвенно подтверждается в работе [12].

Значительную долю влагозапаса долинных водосборов составляет притертая ледяная корка. Наиболее сильно это проявляется у больших горных долинных водосборов с преимущественно однородным плоским рельефом (Грёндален), где доля притертой ледяной корки в общем влагозапасе может достигать 79 %. Однако статистической связи между метеопараметрами холодного периода и высотой и долей притертой ледяной корки в общих влагозапасах водосбора не найдено, это может свидетельствовать о том, что генезис притертой ледяной корки неоднозначный, а увеличение числа оттепелей или выпадения жидких осадков на снежный покров, наблюдаемых в начале XXI в. [8, 12, 14], не играют в нем определяющей роли и зависят от обстоятельств, таких как высота снежного покрова на момент выпадения осадков, район выпадения с точки зрения влияния рельефа на снегонакопление, сумма осадков.

Заключение

Результаты исследования показали, что за период 2000–2024 гг. не наблюдается статистически значимых (при уровне значимости $\alpha = 0,05$) трендов изменения высоты, плотности и влагозапаса снежного покрова. Полученные тренды преимущественно слабоотрицательные. Показано, что характеристики снежного покрова у однотипных объектов хорошо коррелируют между собой и значением максимальной высоты снежного покрова на метеостанции п. Баренцбург и могут быть использованы для реконструкции. Продолжительность снегозалегания, а также даты установления и схода снежного покрова не имеют ярко выраженных трендов. Климат района исследования в холодный период становится слегка более теплым, ветреным и сухим. Обнаружены слабые, но статистически значимые линейные связи между метеопараметрами холодного периода и характеристиками снежного покрова. В районе исследования влияние на суммарные влагозапасы и высоту

и долю притертой ледяной корки в общих влагозапасах увеличения количества случаев выпадения жидких осадков на снежный покров, оттепелей и их продолжительности не обнаружено.

Таким образом, в настоящее время мы наблюдаем в целом стационарный период условий снегонакопления, где увеличение температуры холодного периода частично компенсируется увеличением суммы осадков [15–17]. Наличие связей между характеристиками снежного покрова и суммой осадков за холодный период на ледниках, являющихся преимущественно высотными водосборами, а также между характеристиками снежного покрова маловысотных долинных водосборов и средней температурой холодного периода является характерной чертой данного периода, демонстрируя особенности чувствительности характеристик снежного покрова в зависимости от высоты и типа водосбора к основным метеорологическим параметрам.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. Регистрационный номер НИТР АААА-А20-120041590009-7.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность руководству и сотрудникам Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген, ее зимовочным и сезонным составам.

Competing interests. The authors have no conflict of interest to declare.

Financing. The research was funded within project 5.1.4 of Roshydromet STW' Plan 2020–2024. STW registration number АААА-А20-120041590009-7.

Acknowledgments. The team of authors expresses gratitude to the management and staff of the Russian Scientific Arctic Expedition in the archipelago of Spitsbergen, as well as its wintering and seasonal teams.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Динамика параметров снежного покрова, влияющих на устойчивость многолетней мерзлоты на архипелаге Шпицберген. *Лед и Снег*. 2016;56(2):189–198. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-189-198>
Osokin N.I., Sosnovskii A.V. Dynamics of snow cover parameters affecting permafrost stability on the Svalbard archipelago. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2016;56(2):189–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-189-198>
2. Gallet J.-C., Björkman M., Borstad C., Hodson A., Jacobi H.-W., Larose C., Luks B., Spolaor A., Schuler T., Urazgildeeva A., Zdanowicz C. Snow research in Svalbard: current status and knowledge gaps. *SESS report 2018 — The State of Environmental Science in Svalbard — an annual report*. Longyearbyen: Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System. 2019:82–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4778366>
3. Bokhorst S., Pedersen S.H., Brucker L., Anisimov A., Bjerke J.W., Brown R.D., Ehrlich D., Essery R.L.H., Heilig A., Ingvander S., Johansson C., Johansson M., Jónsdóttir I.S., Inga N., Luoju K., Macelloni G., Mariash H., McLennan D., Rosqvist G.N., Sato A., Savela H., Schneebeli M., Sokolov A., Sokratov S.A., Terzago S., Vikhamar-Schuler D., Williamson S., Qiu Y., Callaghan T.V. Changing Arctic snow cover: A review of recent developments and assessment of future needs for observations, modelling, and impacts. *Ambio*. 2016;45:516–537. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0770-0>
4. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Køltzow M.A.Ø., Aaboe S., Gjeltén H.M., Mezghani A., Eastwood S., Førland E., Benestad R.E., Hanssen-Bauer I., Brækkan R., Sviashchennikov P., Demin V., Revina A., Karandasheva T. Exceptional warming over the Barents area. *Scientific Reports*. 2022;12:9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>

5. Van Pelt W., Pohjola V., Pettersson R., Marchenko S., Kohler J., Luks B., Hagen J.O., Schuler T.V., Dunse T., Noël B., Reijmer C. A long-term dataset of climatic mass balance, snow conditions, and runoff in Svalbard (1957–2018). *The Cryosphere*. 2019;13(9):2259–2280. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2259-2019>
6. *Гляциология Шпицбергена*. Под ред. В.М. Котлякова. М.: Наука; 1985. 200 с.
7. Zdanowicz C., Gallet J.-C., Salvatori R., Malnes E., Isaksen K., Hübner C., Jones E., Lihavainen H. An agenda for the future of Arctic snow research: the view from Svalbard. *Polar Research*. 2023;42:8827. <https://doi.org/10.33265/polar.v42.8827>
8. Van Pelt W., Kohler J., Liston G., Hagen J., Luks B., Reijmer C., Pohjola V. Multidecadal climate and seasonal snow conditions in Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2019;121(11):2100–2117. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2259-2019>
9. Maniktala D. *Analysing seasonal snow cover trends and patterns on Svalbard*. Uppsala: Department of Earth Sciences, Uppsala University; 2022. 44 p.
10. Kierulf H., van Pelt W., Petrov L., Dähnn M., Kirkvik A.-S., Omang O. Seasonal glacier and snow loading in Svalbard recovered from geodetic observations. *Geophysical Journal International*. 2022;229(1):408–425. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab482>
11. Ignatiuk D., Dunse T., Gallet J.-C., Girod L., Grabiec M., Kepski D., Kohler J., Laska M., Luks B., van Pelt W., Pettersson R., Pohjola V., Schuler T.V. Ground penetrating radar measurement of snow in Svalbard — past, present, future (SnowGPR). *SESS report 2022 — The State of Environmental Science in Svalbard — an annual report*. Longyearbyen: Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System; 2022: 116–141. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7371725>
12. Wickström S., Jonassen M., Cassano J., Vihma T. Present temperature, precipitation, and rain-on-snow climate in Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020;125(14):e2019JD032155. <https://doi.org/10.1029/2019JD032155>
13. Lang C., Fettweis X., Erpicum M. Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979–2013 despite the Arctic warming. *The Cryosphere*. 2015;9(1):83–101. <https://doi.org/10.5194/tc-9-83-2015>
14. Сосновский А.В., Осокин Н.И. Влияние оттепелей на снежный покров и промерзание грунта при современных изменениях климата. *Лед и Снег*. 2019;59(4):475–482. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-433>
Sosnovskii A.V., Osokin N.I. The influence of thaws on snow cover and soil freezing under modern climate changes. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2019;59(4):475–482. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-433>
15. Luce C., Lopez-Burgos V., Holden Z. Sensitivity of snowpack storage to precipitation and temperature using spatial and temporal analog models. *Water Resources Research*. 2014;50(12):9447–9462. <https://doi.org/10.1002/2013WR014844>
16. Hamlet A.F., Mote P.W., Clark M. P., Lettenmaier D.P. Effects of temperature and precipitation variability on snowpack trends in the Western United States. *Journal of Climate*. 2005;18(21):4545–4561. <https://doi.org/10.1175/JCLI3538.1>
17. Bonsoms J., López-Moreno J.I., Alonso-González E. Snow sensitivity to temperature and precipitation change during compound cold-hot and wet-dry seasons in the Pyrenees. *The Cryosphere*. 2023;17(3):1307–1326. <https://doi.org/10.5194/tc-17-1307-2023>