

ВНУТРИСЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АБЛЯЦИИ ЛЕДНИКА АЛЬДЕГОНДА (ШПИЦБЕРГЕН)

© 2023 г. У. В. Прохорова^{1,*}, А. В. Терехов¹, В. Э. Демидов¹,
С. Р. Веркулич¹, Б. В. Иванов^{1,2}

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

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: uvprokhorova@aari.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.

После доработки 11.03.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Рассмотрена зависимость внутрисезонной изменчивости абляции льда на леднике Альдегонда (Шпицберген) от приземной температуры воздуха и потока коротковолновой радиации. В 2018–2021 гг. абляция льда хорошо согласуется с обоими факторами ($r = 0.80–0.98$ и $0.71–0.99$ соответственно). 2022 год – аномальный с точки зрения нарушения связей абляции и радиации, что объясняется продолжительной волной тепла в Европе.

Ключевые слова: Арктика, Шпицберген, баланс массы ледника, коротковолновая радиация, волна тепла

DOI: 10.31857/S2076673423020138, **EDN:** RVESBM

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мировой климат стремительно меняется. Так, наблюдаемая за десятилетие 2006–2015 гг. глобальная средняя приземная температура была на $0.75–0.99^\circ\text{C}$ выше значений за период 1850–1900 гг. с “весьма высокой степенью достоверности”, что отражает долгосрочную тенденцию потепления с доиндустриальных времён (IPCC, 2018). Потепление крайне неравномерно в пространстве: тренды, превышающие среднегодовой глобальный показатель, наблюдаются во многих регионах, в том числе в Арктике, где они выше в 2–3 раза из-за эффекта “арктического усиления” (Nordli et al., 2014; Gjelten et al., 2016; Isaksen et al., 2016). Одним из таких регионов, где потепление идёт беспрецедентными темпами, является Баренцевоморский регион, включающий архипелаг Шпицберген – один из крупнейших центров современного оледенения в Северном полушарии (Isaksen et al., 2022). Основным следствием изменений климата на архипелаге является стремительная потеря массы его ледниками, составляющая, по последним оценкам, 7 ± 4 млрд. т/год (Schuler et al., 2020).

Регулярные ежегодные масс-балансовые наблюдения на Шпицбергене начаты в 1967–1968 гг. на ледниках в окрестностях норвежского п. Нью-Олесунн на северо-западе. С начала 1970-х годов измерения стали выполняться и советскими ис-

следователями вблизи пос. Баренцбург в центральной части острова, где в настоящее время ледники отступают наиболее интенсивно (Чернов, Муравьев, 2018; Hanssen-Bauer et al., 2019). Накопленный во второй половине XX в. массив натуральных данных послужил основой для первых обобщений и статистического анализа межгодовой изменчивости баланса массы ледников архипелага на предмет связи этой характеристики с метеорологическими факторами (Гляциология Шпицбергена, 1985; Hagen, Liestol, 1990). Многофакторный корреляционный анализ выявил наиболее тесную связь с температурой воздуха (Lefauconnier, Hagen, 1990), подтвердив известные ранее закономерности (Кренке, Ходаков, 1966).

Климатические изменения последних десятилетий привели к тому, что многие ледники Шпицбергена оказались ниже снеговой линии, что означает значительное снижение альбедо их поверхности на протяжении летнего сезона (Noël et al., 2020). В ряде статей, посвящённых анализу теплового баланса ледников архипелага в период абляции (Arnold, 2006; Прохорова и др., 2021; Zou et al., 2021), выявлена определяющая роль потока коротковолновой радиации в поверхностном таянии. Подобные выводы могут быть подтверждены или опровергнуты и другим путём, а именно на основе анализа внутрисезонной изменчивости абляции льда, не требующего теплобалансового моделирования. Объём данных гляциологическо-

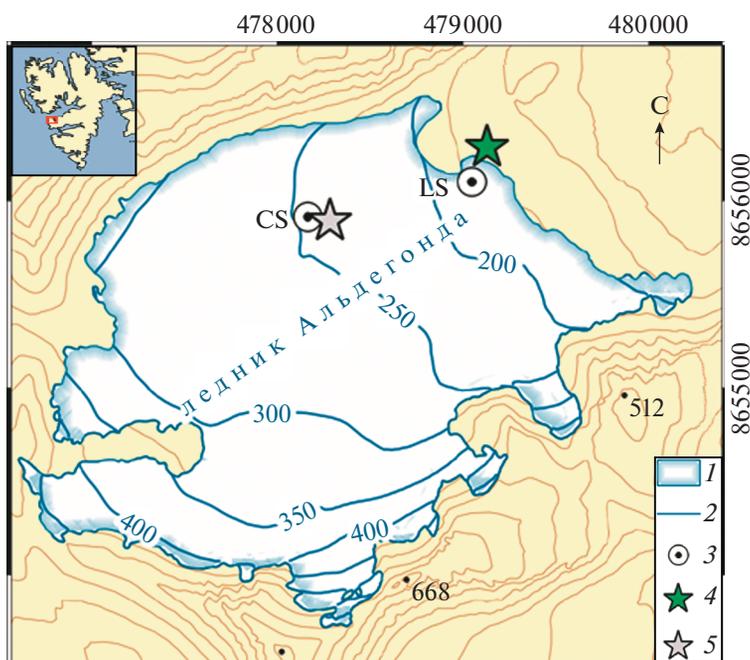


Рис. 1. Расположение ледника Альдегонда и измерительная сеть на нём: 1 – контур ледника (2021 г.); 2 – изолинии высоты поверхности (2018 г.); 3 – площадки для измерения абляции льда; 4 и 5 – постоянная и временные метеорологические станции.

Fig. 1. Location of the Aldegonda glacier and the measurement network on it: 1 – glacier outline (2021); 2 – surface elevation contour lines (2018); 3 – ice ablation measurement sites; 4 and 5 – permanent and temporary weather stations.

го мониторинга на Шпицбергене довольно велик на сегодняшний день и насчитывает четырнадцать масс-балансовых рядов продолжительностью более пяти лет (Schuler et al., 2020; Terekhov et al., 2022), однако они относятся к временным интервалам порядка балансового года, и потому не пригодны для выявления внутригодовой изменчивости.

В распоряжении авторов имеются данные измерений абляции льда на леднике Альдегонда, имеющие более высокую частоту (до трёх суток) и позволяющие проследить динамику этого процесса. Цель исследования – оценка зависимости внутрисезонной изменчивости летней абляции от метеорологических факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект изучения. Альдегонда – горно-долинный ледник площадью около 5.5 км², расположенный в 10 км к юго-западу от пос. Баренцбург (о. Западный Шпицберген, рис. 1). Практически вся поверхность ледника расположена ниже 500 м над ур. моря, что делает его лежащим ниже современной снеговой линии на архипелаге (Noël et al., 2020). Как следствие, до конца сезона абляции снежный покров на леднике исчезает либо полностью, либо остаются несколько процентов его площади в верховьях (Терехов и др., 2020). Таким

образом, средняя абляция льда на леднике практически тождественна балансу его массы.

Абляция льда. В работе использован массив результатов масс-балансового мониторинга на леднике Альдегонда с сентября 2017 г. по сентябрь 2022 г. Ряды исходных измерений представляют собой толщины стаявшего слоя льда на поверхности ледника, отсчитываемые по абляционным рейкам в сантиметрах, с временной дискретностью 3–14 сут (табл. 1). Наблюдения выполняются с июля по середину сентября, причём измеряется исключительно таяние льда, а временной ход таяния снега не фиксируется. До 2020 г. измерения проводились по мере необходимости перебуривания реек, поэтому частота замеров не регулярна во времени и зависит от динамики таяния в конкретный сезон; в 2021/22 г. измерения целенаправленно проводились по учащенной программе.

Для дальнейшего анализа используются данные с двух измерительных площадок (см. рис. 1): с нижней (далее – LS, lower site) и расположенной ближе к центру ледника (далее – CS, central site). Снежный покров в районе этих двух площадок исчезает раньше всего, поэтому количество измерений абляции льда здесь за сезон максимально. Измерительные площадки расположены на высотах 173 и 245 м над ур. моря (на 2019 г.) соответственно.

Таблица 1. Измеренные скорости таяния льда на поверхности ледника Альдегонда и усреднённые значения метеопараметров в 2018–2022 гг.

Период времени		Скорость абляции льда, см/сут		Средний поток коротковолновой солнечной радиации, Вт/м ²	Средняя приземная температура воздуха, °С
		площадка CS	площадка LS		
18.07.2018	01.08.2018	4.1	4.5	146.3	4.8
01.08.2018	07.08.2018	2.5	4.2	124.7	6.9
07.08.2018	13.08.2018	4.3	5.0	123.1	4.6
13.08.2018	20.08.2018	–	3.1	94.4	4.1
20.08.2018	10.09.2018	–	2.1	49.3	3.6
10.09.2018	19.09.2018	–	0.0	56.4	0.0
07.07.2019	20.07.2019	1.5	5.4	161.1	4.7
20.07.2019	31.07.2019	4.5	5.5	153.3	5.5
31.07.2019	13.08.2019	3.4	4.2	187.1	4.5
13.08.2019	02.09.2019	1.0	2.3	71.5	3.2
02.09.2019	16.09.2019	0.9	1.2	40.7	3.0
07.07.2020	25.07.2020	4.2	4.7	121.5	6.2
25.07.2020	05.08.2020	4.7	6.6	203.0	9.7
05.08.2020	19.09.2020	2.0	2.4	69.7	4.2
15.07.2021	20.07.2021	2.8	4.8	119.0	5.2
20.07.2021	27.07.2021	4.6	4.3	169.1	5.0
27.07.2021	31.07.2021	4.5	4.0	98.5	4.8
31.07.2021	05.08.2021	4.2	4.4	130.7	6.2
05.08.2021	10.08.2021	4.8	4.8	143.3	5.2
10.08.2021	14.08.2021	2.5	3.8	101.4	5.5
14.08.2021	17.08.2021	2.0	3.3	118.5	3.0
17.08.2021	25.08.2021	2.1	2.0	75.0	3.6
25.08.2021	31.08.2021	1.8	2.3	57.4	4.7
31.08.2021	07.09.2021	1.4	1.3	66.5	3.0
07.09.2021	11.09.2021	0.0	0.3	64.8	1.8
11.09.2021	27.09.2021	1.6	2.1	24.5	3.4
02.08.2022	08.08.2022	3.5	5.8	94.4	6.3
08.08.2022	13.08.2022	3.0	6.2	102.6	5.1
13.08.2022	20.08.2022	3.0	3.3	70.9	3.1
20.08.2022	26.08.2022	1.5	2.0	105.8	3.8
26.08.2022	01.09.2022	1.7	0.7	86.4	2.9
01.09.2022	08.09.2022	3.4	4.3	39.3	4.1
08.09.2022	15.09.2022	0.0	0.0	41.6	1.3

В исследовании использованы данные за те годы, когда отсчёты по рейкам снимались четыре и более раз за сезон, обеспечивая тем самым не менее трех измерений стаявшего слоя. Первое измерение в балансовом году, включающее остаточное осеннее и начальное весеннее таяние и охватывающее временной интервал более полугода, исключалось из анализа. Далее, для обеспечения взаимной сопоставимости данных, измерения

стаявшего слоя льда были пересчитаны в скорости таяния льда в см/сут путем нормирования на количество суток в каждом периоде (см. табл. 1).

Метеорологические данные. У края ледника, на высоте 180 м над ур. моря, установлена постоянно действующая автоматическая метеостанция Ново (далее – АМС, см. рис. 1), измеряющая температуру и влажность воздуха, направление и ско-

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции между скоростями абляции льда на поверхности ледника Альдегонда, приземной температурой воздуха (T_{air}) и потоком нисходящей солнечной радиации (SWD)

Площадка	CS		LS	
	T_{air}	SWD	T_{air}	SWD
2018	—	—	0.86	0.87
2019	0.83	0.71	0.96	0.89
2020	0.88	0.89	0.98	0.99
2021	0.79	0.77	0.86	0.79
2022	0.81	0.21	0.90	0.34

рость ветра, атмосферное давление и поток приходящей коротковолновой радиации в диапазоне 300–1000 нм. Временная дискретность измерений – 1 час. Вопрос репрезентативности этих измерений для поверхности ледника рассмотрен далее.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Связь абляции льда с метеорологическими факторами. В табл. 2 перечислены коэффициенты линейной корреляции между скоростями таяния льда на измерительных площадках LS и CS и двумя метеорологическими факторами – приземной температурой воздуха и нисходящим потоком коротковолновой радиации. Видно, что для температуры воздуха коэффициенты, меняющиеся от 0.80 до 0.98, стабильно высоки за все рассмотренные сезоны. Это подтверждает выводы (Ohmura, 2001) о том, что температура воздуха и рассчитанные на её основе суммы градусо-дней тепла являются хорошими предикторами для количественной оценки таяния ледников. С точки зрения теплового баланса ледника, температура воздуха опосредует практически все его основные составляющие: нисходящий поток длинноволновой радиации, турбулентные потоки явного и скрытого тепла. Физическим обоснованием этого служит тот факт, что упомянутые компоненты в значительной степени зависят от температуры воздуха. Поэтому снижение корреляции с потоком приходящей коротковолновой радиации с одновременным сохранением связи с температурой воздуха может указывать на значительное возрастание роли турбулентных потоков и длинноволнового излучения в структуре теплового баланса ледника в отдельные годы.

Значения коэффициентов корреляции между абляцией льда и коротковолновой радиацией для сезонов 2018–2021 гг. также высоки (см. табл. 2), что означает высокую долю изменчивости потока солнечной радиации в изменчивости исследуемой величины. Само по себе это не обязательно означает, что коротковолновая радиация являет-

ся преобладающим компонентом теплового баланса ледника Альдегонда. Однако этот факт был ранее продемонстрирован в работах (Arnold, 2006; Zou et al., 2021) для других низкорасположенных ледников на западном, атлантическом побережье Шпицбергена, а также в работе (Прохорова и др., 2021) для самого ледника Альдегонда. В этом случае влияние изменчивости коротковолновой радиации на внутрисезонную изменчивость абляции льда может быть высоким за счёт большей амплитуды значений радиации по сравнению с остальными составляющими теплового баланса. Преобладающая доля приходящей коротковолновой радиации имела бы важное следствие, делая ледник чувствительным к изменениям альбедо его поверхности. Основным фактором, изменяющим альбедо ледников в широких пределах, являются твердые осадки. Так, для соседнего ледника Западный Грэнфьорд показано, что значения его годового баланса имеют довольно высокие корреляции с зимним балансом (Teekhov et al., 2022). Чем дольше ледник остается укрыт снежным покровом в начале лета, на которое приходится пик приходящей коротковолновой радиации в окрестностях Баренцбурга, тем выше будет его среднее альбедо, и, следовательно, количество поглощенной солнечной радиации окажется значительно ниже.

В 2022 г. корреляционная зависимость абляции от потока солнечной радиации резко нарушается: значения коэффициентов составляют всего 0.21 и 0.34 на площадках CS и LS соответственно. В упомянутых выше работах показано, что в масштабе нескольких часов или суток возможно кратковременное изменение соотношения компонентов теплового баланса в пользу турбулентных потоков (Prokhorova et al., 2023). Это позволяет выдвинуть гипотезу, что в 2022 г. подобное увеличение вклада турбулентных потоков, которые в значительной мере зависят от температуры воздуха, происходило на протяжении большей части сезона. Таким образом, уже известные закономерности соотношения компонентов теплового баланса поверхности низкорасположенных ледников достаточно репрезентативны для большинства сезонов, но в отдельные годы наблюдаются аномалии, нарушающие среднесезонное соотношение, в частности, снижающие зависимость абляции льда от потока коротковолновой радиации на фоне роста вклада в абляцию температуры воздуха за счёт турбулентных потоков.

Репрезентативность использования данных АМС. Перед тем как подробно рассмотреть нарушение корреляции между абляцией и солнечной радиацией в 2022 г., рассмотрим вопрос репрезентативности данных, измеренных метеостанцией за пределами ледника, для самой его поверхности. В ходе сезонных наблюдений в центральной части

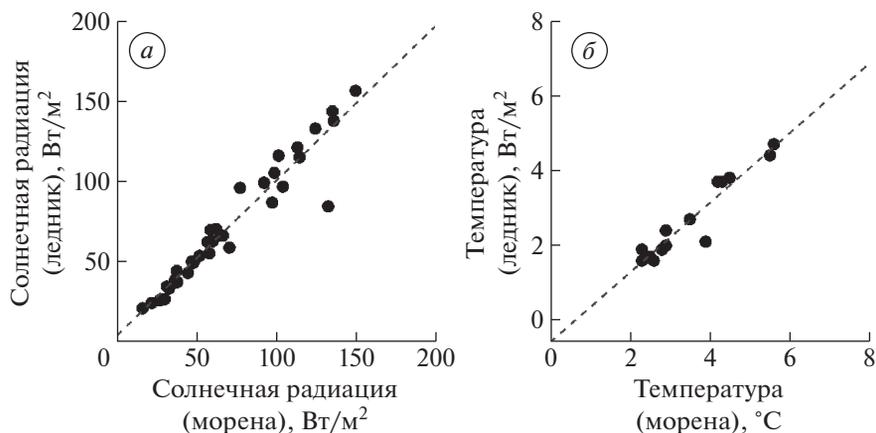


Рис. 2. Сравнение (а) потока приходящей коротковолновой солнечной радиации в центральной части и в низовьях ледника; (б) приземной температуры воздуха на АМС, установленных непосредственно на поверхности ледника и вблизи нее на равной высоте.

Fig. 2. Comparison of (a) incoming short-wave solar radiation flux in the central part and in the lower reaches of the glacier; (b) surface air temperature on meteorological stations installed directly on the surface of the glacier and near it at an equal height.

ледника вблизи измерительной площадки CS временно устанавливалась дополнительная теплоробалансовая станция (см. рис. 1). Данные по солнечной радиации показали хорошую согласованность между наблюдениями в нижней и центральной частях ледника (рис. 2, а).

Для оценки репрезентативности данных о приземной температуре воздуха и влажности, полученных вне ледника, в ходе экспедиций 2021/22 г. проведены работы по установке временной АМС непосредственно на поверхности ледника на той же высоте, что и стационарная. Установлено, что при переходе от поверхности, на которой расположена стационарная метеостанция, к поверхности ледника происходит температурный скачок, который в среднем составляет для летнего сезона около 1°C (см. рис. 2, б). При этом изменчивость в показаниях температуры воздуха сохраняется, поэтому данные постоянной АМС используются для расчета корреляций со скоростями абляции льда без внесения корректировок.

Измерительная площадка CS может считаться репрезентативной для ледника Альдегонда. По данным многолетнего гляциологического мониторинга на этом леднике (2013–2020 гг.), величина абляции льда, измеренная на CS, количественно совпадает со средним по леднику значением: коэффициент линейной корреляции между двумя величинами составляет 0.98 (рис. 3). Несмотря на то что на леднике расположены также и другие абляционные рейки, на больших высотах, их отсчеты не задействованы в данном исследовании из-за более позднего схода здесь снежного покрова, и, как следствие, меньшего количества измеренных временных интервалов абляции льда.

Аномальная внутрисезонная изменчивость 2022 г.
Представленные результаты показывают, что тесная связь с температурой воздуха сохраняется, но корреляция с потоком приходящей солнечной радиации значительно снижена. Чтобы продемонстрировать изменения во внутрисезонной изменчивости абляции льда, приведшие к наблюдаемому в 2022 г. ухудшению связи таяния с солнечной радиацией, рассмотрим временной ход

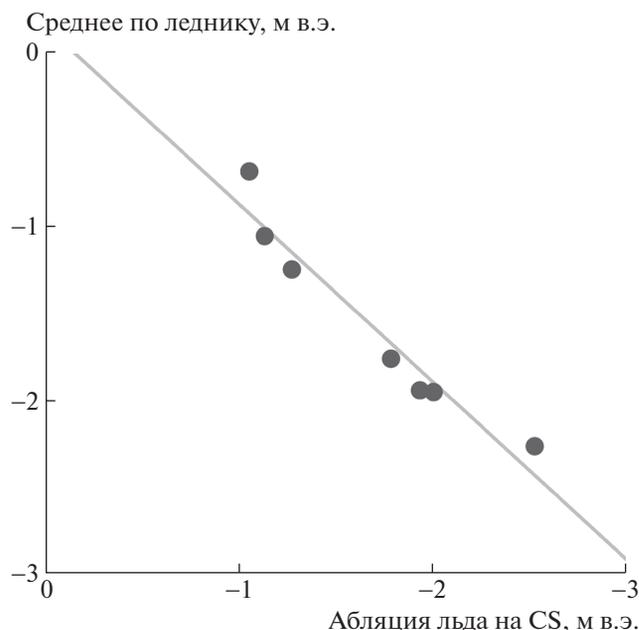


Рис. 3. Сравнение величины таяния льда, измеренного на площадке CS со средней по леднику величиной.

Fig. 3. Comparison of the ice melt measured at the CS site with its glacier-averaged value.

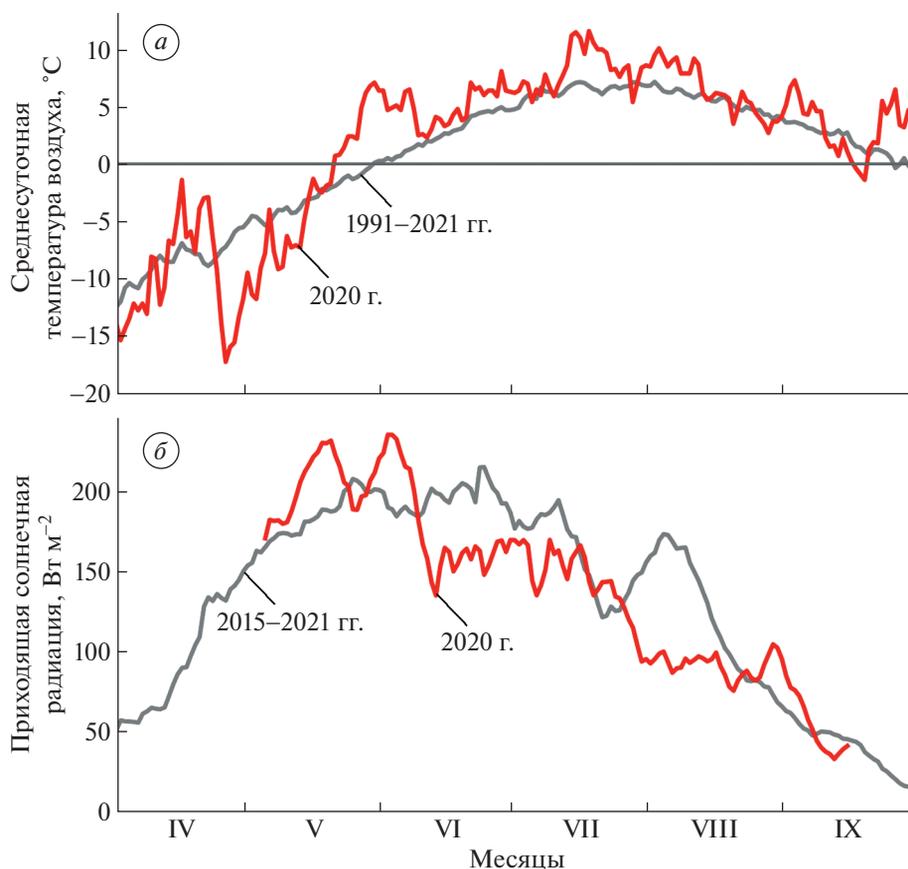


Рис. 4. Временной ход метеовеличин в 2022 г. на фоне их многолетних норм.
Fig. 4. The time course of meteorological variables in 2022 against their long-term normal.

метеорологических величин на фоне их многолетних норм (рис. 4). Видно, что максимум температуры воздуха приходится в исследуемом районе на вторую половину июля, после чего идёт постепенный её спад. Для входящей коротковолновой радиации, теоретический пик, определяемый астрономическим фактором, сдвинут во времени относительно температурного максимума и должен приходиться на 21–22 июня. Однако, фактически, из-за особенностей облачности, на протяжении всего июня – второй половины июля в окрестностях Баренцбурга наблюдается “плато” высоких значений радиации. Из-за того, что ледник укрыт снегом до второй половины июля, несоответствие максимумов двух факторов в начале лета никак не проявляет себя в таянии льда. После того, как поверхность льда очищается от снега, значения обоих метеопараметров начинают снижаться, обеспечивая тесную корреляцию с обоими факторами на протяжении большинства рассмотренных сезонов.

Осредненный “куполообразный” ход температуры был нарушен в 2022 г. сильными положительными аномалиями в начале и в конце сезона таяния: экстремальные значения аномалий на-

блюдались в конце мая – первую неделю июня и в сентябре (см. рис. 4, а). Июньский эпизод сильного потепления не мог непосредственно влиять на таяние льда, поскольку в это время поверхность ледника была покрыта снегом. Сентябрьский эпизод находит отражение в натуральных измерениях: средняя скорость таяния с 1 по 8 сентября 2022 г. составила 3.4 и 4.3 см/сут (CS и LS соответственно), чего прежде в осенний период в исследуемом районе не наблюдалось. Поскольку поток коротковолновой радиации на Шпицбергене не может быть высоким в сентябре даже при полностью ясном небе (см. рис. 4, б), сентябрьские положительные аномалии температуры, вызвавшие усиление абляции, нарушают описанные ранее устойчивые корреляции с солнечной радиацией.

Положительные аномалии температуры воздуха наблюдались не только на территории архипелага, но и во всей Европе на протяжении практически всего летне-осеннего сезона, и были вызваны масштабной волной тепла 2022 г. Волны тепла – природное явление, характеризующееся периодом аномально жаркой погоды, которая проявляется на определенной территории вследствие атмосферных факторов (Robinson, 2001).

Причины этого явления связаны с возникновением блокирующих антициклонов. Для этого явления характерна стабильная погода с высокими температурами воздуха, пониженной влажностью и высоким атмосферным давлением (di Sarua et al., 2021). Анализ синоптической ситуации с 1 по 8 сентября 2022 г. показывает, что антициклон, ранее установившийся над Европой и принесший аномальную жару, сместился севернее и архипелаг Шпицберген попал под его влияние, что сделало сентябрь в среднем на 2°C теплее нормы (Copernicus, 2022).

Таким образом, волна тепла 2022 г. повлияла на внутригодовой ход абляции льда на леднике Альдегонда, изменив среднесезонное соотношение компонентов теплового баланса и зависимости абляции льда от метеорологических величин, наблюдавшиеся в предыдущие сезоны. По последним оценкам, опасные метеорологические явления, включая также и волны тепла, будут происходить в будущем чаще, охватывая большие территории, и будут иметь большую продолжительность и величину (IPCC, 2021). В результате в ближайшем будущем возможен рост турбулентно-адвективного фактора (с одновременным снижением роли радиационного фактора) таяния низкорасположенных ледников.

Практические следствия для моделирования.

Для моделирования абляции ледников зачастую используются простые эмпирические модели, связывающие единственный предиктор – приземную температуру воздуха – с таянием поверхности. Подобный класс моделей, имеющих очевидное преимущество в их нетребовательности к исходным данным, называется “T-index модели” (Ohmura, 2001). Их частный случай – известная эмпирическая модель Кренке–Ходакова (Кренке, Ходаков, 1966), пример применения которой для ледника Восточный Грэнфьорд на Шпицбергене показан в работе (Чернов и др., 2019).

Предполагается, что T-index модели должны применяться с некоторым эмпирически найденным “региональным” коэффициентом (либо индивидуальным для каждого ледника), неизменным для каждого года моделирования. Использование подобных моделей было предложено в те времена, когда климат считался стационарным. Это отражается, например, в работе советских гляциологов той эпохи (Grosval’d, Kotlyakov, 1969), в которой была предпринята попытка выявить цикличность в доступных масс-балансовых рядах и сравнить по мировым центрам оледенения сдвиг относительно друг друга фаз этой цикличности. Однако начиная с последнего десятилетия XX в. усилия гляциологов посвящены поиску в накопленных рядах долгосрочных трендов и отделению климатического сигнала от сигналов прочих факторов, влияющих на баланс массы

ледников, в частности, морфометрического (Hagen et al., 2005; Vincent et al., 2017; Charalampidis et al., 2018). Подразумеваемая при этом нестационарность климата влечёт за собой потерю предсказательной силы эмпирических моделей в будущем (Oerlemans, Hoogendoorn, 1989).

Представленное исследование наглядно подтверждает, что известные эмпирические закономерности могут меняться с течением времени. Поэтому в последние десятилетия на первый план выходят более сложные математические модели, основанные на так называемом process-based подходе, т.е. на описании механизмов физических взаимодействий в системе атмосфера – ледник (O’Neel, 2019). Выявление факторов и механизмов, ответственных за таяние поверхности, важно с точки зрения анализа чувствительности ледников к климатическим изменениям. Физически обоснованные модели требуют значительно большего количества входных данных, но они в наилучшей степени описывают особенности таяния ледника с наблюдаемым на Шпицбергене переходом от таяния радиационного таяния к адвективно-турбулентному.

ВЫВОДЫ

Значения абляции льда на леднике Альдегонда в отдельные сезоны публиковались ранее, например, в работе (Сидорова и др., 2019). Однако эти значения были суммарными за балансовые годы и не позволяли провести оценку изменчивости величины внутри сезонов таяния. В проведенном исследовании мы впервые рассмотрели внутрисезонную изменчивость величины абляции льда на леднике Альдегонда (2018–2022 гг.) и её зависимость от двух метеорологических факторов – температуры воздуха и потока приходящей коротковолновой радиации. Показано, что в сезоны 2018–2021 гг. тесная корреляция существует с обоими факторами (0.80–0.98 для температуры и 0.71–0.99 для коротковолновой радиации). Это косвенно указывает на высокую чувствительность ледников Шпицбергена, оказавшихся ниже современной снеговой линии, к изменениям количества твёрдых осадков, влияющих на альбедо их поверхности.

Показано, что в аномальный 2022 г. зависимость таяния от потока солнечной радиации резко снижается (0.34 и 0.21 для измерений в нижней и в центральной части ледника). С точки зрения взаимодействия ледника с атмосферой это означает, что в отдельные сезоны коротковолновая радиация перестает иметь преобладающую долю в тепловом балансе поверхности, а вклад турбулентных потоков и длинноволнового баланса в таяние увеличивается. Аномалия 2022 г. вызвана масштабной волной тепла, имевшей место над всей Европой. Волна тепла нарушила нормаль-

ный внутрисезонный ход метеоэлементов, существенно продлив сезон абляции в осенний период. Прогнозируемое в будущем учащение волн тепла повлечёт изменение в механизме таяния ледников Шпицбергена от преобладающего вклада солнечной радиации к преобладающему вкладу турбулентных потоков.

Исследование демонстрирует, насколько эмпирически выявленные зависимости могут меняться от сезона к сезону в условиях нестационарного климата. Это имеет два важных следствия: во-первых, выводы о тепловом балансе ледников, сделанные по результатам наблюдений одного сезона, следует экстраполировать во времени с осторожностью; во-вторых, предсказательная способность регрессионных моделей, построенных на основе предшествующих наблюдений, оказывается под вопросом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген ААНИИ за предоставленное оборудование, за помощь в организации и проведении полевых работ.

Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. “Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база “Мыс Баранова”, гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген”.

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Arctic Expedition on Svalbard (Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia) for providing logistics, equipment and for helping to carry out the field studies.

This study was funded under Project 5.1.4, “Monitoring of State and Pollution of the Environment, Including the Cryosphere, in the Arctic Basin and in the Area of Scientific Station Ice Base Cape Baranov, hydrometeorological Observatory of Tiksi and Russian Scientific Centre on Spitsbergen”, within the Plan NITR of Roshydromet 2020–2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисик А.Л., Новиков А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Веркулич С.Р. Строеение и динамика ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) по данным повторных георадиолокационных исследований 1999, 2018 и 2019 гг. // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. №. 1. С. 26–37.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421010069>
- Гляциология Шпицбергена. М.: Наука, 1985. 200 с.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. №. 12. С. 153–164.
- Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р. Расчёт составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 г. // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. №. 3. С. 50–60.
- 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. Т. 55. №. 1. С. 2190057.
- Сидорова О.Р., Тарасов Г.В., Веркулич С.Р., Чернов Р.А. Изменчивость поверхностной абляции горных ледников Западного Шпицбергена // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. №. 4. С. 438–448.
- Терехов А.В., Тарасов Г.В., Сидорова О.Р., Демидов В.Э., Анисимов М.А., Веркулич С.Р. Оценка баланса массы ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в 2015–2018 гг. на основе модели ArcticDEM, геодезических и гляциологических данных // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. №. 2. С. 192–200.
- Чернов Р.А., Кудиков А.В., Вишневца Т.В., Осокин Н.И. Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. №. 1. С. 59–66.
- Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. №. 4. С. 462–472.
- Arnold N.S., Rees W.G., Hodson A.J., Kohler J. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier // Journ. of Geophys. Research: Earth Surface. 2006. V. 111. №. F2.
- Bonan D.B., Christian J.E., Christianson K. Influence of North Atlantic climate variability on glacier mass balance in Norway, Sweden and Svalbard // Journ. of Glaciology. 2019. V. 65. №. 252. P. 580–594.
<https://doi.org/10.1017/jog.2019.35>
- Copernicus Climate Bulletins // Электронный ресурс. <https://climate.copernicus.eu/climate-bulletins> (Дата обращения: 13.02.2023)
- Di Capua G., Sparrow S., Kornhuber K., Rousi E., Osprey S., Wallom D., van den Hurk B., Coumou D. Drivers behind the summer 2010 wave train leading to Russian heat-wave and Pakistan flooding // Climate and Atmospheric Science. 2021. V. 4. №. 1. P. 55.
<https://doi.org/10.1038/s41612-021-00211-9>
- Charalampidis C., Fischer A., Kuhn M., Lambrecht A., Mayer C., Thomaidis K., Weber M. Mass-budget anomalies and geometry signals of three Austrian glaciers // Frontiers in Earth science. 2018. P. 218.
- 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. P. 29878.
- Grosval'd M.G., Kotlyakov V.M. Present-day glaciers in the USSR and some data on their mass balance // Journ. of Glaciology. 1969. V. 8. №. 52. P. 9–22.
- Hagen J.O., Eiken T., Kohler J., Melvold K. Geometry changes on Svalbard glaciers: mass-balance or dynamic

- response? // *Annals of Glaciology*. 2005. V. 42. P. 255–261.
<https://doi.org/10.3189/172756405781812763>
- Hagen J.O., Liestøl O. Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88 // *Annals of Glaciology*. 1990. T. 14. C. 102–106.
<https://doi.org/10.3189/S0260305500008351>
- Hanssen-Bauer I. Climate in Svalbard 2100 // A knowledge base for climate adaptation. 2019. 208 p.
- Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling // *Progress in Physical Geography*. 2005. T. 29. №. 3. P. 362–391.
- IPCC: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. P. 3–24.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- 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 // *Journ. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. T. 121. №. 20. P. 11913–11931.
- Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Koltzow M., Aaboe S., Gjelten I H., Mezghani A., Eastwood I S., Førland E., Benestad R., Hanssen-Bauer I., Brækkan R., Sviashchenkov P., Demin V., Revina A., Karandasheva T. Exceptional warming over the Barents area // *Scientific reports*. 2022. V. 12. №. 1. P. 1–18.
- Lefauconnier B., Hagen J.O. Glaciers and climate in Svalbard: statistical analysis and reconstruction of the Brøggerbreen mass balance for the last 77 years // *Annals of Glaciology*. 1990. V. 14. P. 148–152.
- Noël B., Jakobs C.L., Van Pelt W.J.J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., van de Berg W.G., van den Broeke, M.R. Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability // *Nature Communications*. 2020. V. 11. №. 1. P. 4597.
- 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. P. 21349.
- Oerlemans J., Hoogendoorn N.C. Mass-balance gradients and climatic change // *Journ. of Glaciology*. 1989. V. 35. №. 121. P. 399–405.
<https://doi.org/10.3189/S0022143000009333>
- Ohmura A. Physical basis for the temperature-based melt-index method // *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2001. V. 40. №. 4. P. 753–761.
- O’Neil S., McNeil C., Sass L.C., Florentine C., Baker E.H., Peitzsch E., McGrath D., Fountain A.G., Fagre D. Re-analysis of the US Geological Survey Benchmark Glaciers: long-term insight into climate forcing of glacier mass balance // *Journ. of Glaciology*. 2019. V. 65. №. 253. P. 850–866.
- Robinson P.J. On the definition of a heat wave // *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2001. V. 40. №. 4. P. 762–775.
- Schuler T.V., Kohler J., Elagina N., Hagen J.O.M., Hodson A.J., Jania J.A., Kääh A.M., Luks B., Matecki J., Moholdt G., Pohjola V.A., Sobota I., Van Pelt W.J. Reconciling Svalbard glacier mass balance // *Frontiers in Earth Science*. 2020. 156 p.
- Terekhov A.V., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Prokhorova U., Romashova K., Anisimov M., Sidorova O., Tarasov G. Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grøn fjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20 // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022. V. 54. №. 1. P. 584–602.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
- Vincent C., Fischer A., Mayer C., Bauder A., Galos S.P., Funk M., Thibert E., Six D., Braun L., Huss M. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years // *Geophys. Research Letters*. 2017. V. 44. №. 3. P. 1376–1383.
- 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. P. 5318.
<https://doi.org/10.33265/polar.v40.5318>

Citation: Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Demidov V.E., Ivanov B.V., Verkulich S.R. Intra-annual variability of the surface ablation of the Aldegondabreen glacier (Spitsbergen). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 214–224. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020138

Intra-Annual Variability of the Surface Ablation of the Aldegondabreen Glacier (Spitsbergen)

U. V. Prokhorova^{a,#}, A. V. Terekhov^a, V. E. Demidov^a, B. V. Ivanov^{a,b}, and S. R. Verkulich^a

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

^b Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

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

The intra-annual variability of the surface ice ablation on the 5.5 km² Aldegondabreen glacier (Spitsbergen Island, Barentsburg area) is presented. The ice ablation was measured during five seasons (2018–2022) at the two stakes, installed in the lower part of the glacier and at the index site, where the amount of ablation numerically coincides with the glacier-averaged value with the $r = 0.99$ agreement. The temporal resolution of the ice ablation data is uneven and varies from 3 to 45 days. To carry out the correlation analysis, meteorological data from the automated weather station located near the glacier terminus are used. The ice ablation rates, obtained after normalization for the number of days between stake readings, have a tight correlation with both the air temperature and the downwelling shortwave radiation flux for most of the seasons, in 2018–2021 ($r = 0.71–0.99$). Surface air temperature and short-wave radiation are closely related; the above estimates indicate the leading role of short-wave radiation in the summer ablation of the glacier in the period 2018–2021. The year 2022 became anomalous, as the correlation with the shortwave radiation significantly decreased ($r = 0.21–0.34$). The European heat wave of 2022, which also affected the Svalbard archipelago, interrupted the ordinary intra-annual variability of the air temperature, causing the unprecedented ice melt on Aldegondabreen in September. The predicted increase in frequency and intensity of the future heat waves will result in an increased role of turbulent fluxes in the surface energy balance of the low-elevated Svalbard glaciers. The article demonstrates how the empirically identified dependencies can change from season to season in a non-stationary climate.

Keywords: Arctic, Svalbard, glacier mass balance, short-wave radiation, heat wave

REFERENCES

- Borisik A.L., Novikov A.L., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Verkulich S.R.* Structure and dynamics of Aldegondabreen, Spitsbergen, according to repeated GPR surveys in 1999, 2018 and 2019. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (1): 26–37 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673421010069>
- Glyciologiya Shpicbergena.* Glaciology of Svalbard. Moscow: Nauka, 1985: 200 p. [In Russian].
- Krenke A.N., Khodakov V.G.* On the connection between surface melting of glaciers and air temperature. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1966, 12: 153–164. [In Russian].
- Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Ivanov B.V., Verkulich S.R.* Calculation of the heat balance components of the Aldegonda glacier (Western Spitsbergen) during the ablation period according to the observations of 2019. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2021, 25 (3): 50–60. [In Russian].
- 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.
- Sidorova O.R., Tarasov G.V., Verkulich S.R., Chernov R.A.* Surface ablation variability of mountain glaciers of West Spitsbergen. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2019, 65 (4): 438–448. [In Russian].
- Terekhov A.V., Tarasov G.V., Sidorova O.R., Demidov V.E., Anisimov M.A., Verkulich S.R.* Estimation of mass balance of Aldegondabreen (Spitsbergen) in 2015–2018 based on ARCTICDEM, geodetic and glaciological measurements. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (2): 192–200. [In Russian].
- Chernov R.A., Kudikov A.V., Vshivtseva T.V., Osokin N.I.* Estimation of the surface ablation and mass balance of Eustr Grønfyordbreen (Spitsbergen). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (1): 59–66. [In Russian].
- Chernov R.A., Muraviev A.Y.* Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjold Land (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (4): 462–472. [In Russian].
- Arnold N.S., Rees W.G., Hodson A.J., Kohler J.* Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier. *Journ. of Geophys. Research: Earth Surface*. 2006, 111 (F2).
- Bonan D.B., Christian J.E., Christianson K.* Influence of North Atlantic climate variability on glacier mass balance in Norway, Sweden and Svalbard. *Journ. of Glaciology*. 2019, 65 (252): 580–594
<https://doi.org/10.1017/jog.2019.35>
- Copernicus Climate Bulletins.* Retrieved from: <https://climate.copernicus.eu/climate-bulletins> (Last access: 13 February 2023).
- Di Capua G., Sparrow S., Kornhuber K., Rousi E., Osprey S., Wallom D., van den Hurk B., Coumou D.* Drivers behind the summer 2010 wave train leading to Russian heat-wave and Pakistan flooding. *Climate and Atmospheric Science*. 2021, 4 (1): 55.
- Charalampidis C., Fischer A., Kuhn M., Lambrecht A., Mayer C., Thomaidis K., Weber M.* Mass-budget anomalies and geometry signals of three Austrian glaciers. *Frontiers in earth science*. 2018: 218.
- 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.
- Grosval'd M.G., Kotlyakov V.M.* Present-day glaciers in the USSR and some data on their mass balance. *Journ. of Glaciology*. 1969, 8 (52): 9–22.
- Hagen J.O., Eiken T., Kohler J., Melvold K.* Geometry changes on Svalbard glaciers: mass-balance or dynamic response? *Annals of Glaciology*. 2005, 42: 255–261.
- Hagen J.O., Liestøl O.* Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88. *Annals of Glaciology*. 1990, 14: 102–106.
<https://doi.org/10.31857/S0260305500008351>
- Hanssen-Bauer I.* Climate in Svalbard 2100. A knowledge base for climate adaptation. 2019: 208 p.

- Hock R.* Glacier melt: a review of processes and their modeling. *Progress in physical geography*. 2005, 29 (3): 362–391.
- IPCC: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 3–24.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- 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. *Journ. of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016, 121 (20): 11913–11931.
- Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Koltzow M., Aaboe S., Gjelten I.H., Mezghani A., Eastwood I.S., Førland E., Benestad R., Hanssen-Bauer I., Brækkan R., Sviashchenkov P., Demin V., Revina A., Karandasheva T.* Exceptional warming over the Barents area. *Scientific reports*. 2022, 12 (1): 1–18.
- Lefauconnier B., Hagen J.O.* Glaciers and climate in Svalbard: statistical analysis and reconstruction of the Brøggerbreen mass balance for the last 77 years. *Annals of Glaciology*. 1990, 14: 148–152.
- Noël B., Jakobs C.L., Van Pelt W.J.J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., van de Berg W.G., van den Broeke, M.R.* Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability. *Nature Communications*. 2020, 11 (1): 4597.
- 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.
- Oerlemans J., Hoogendoorn N.C.* Mass-balance gradients and climatic change. *Journ. of Glaciology*. 1989, 35 (121): 399–405.
<https://doi.org/10.3189/S0022143000009333>
- Ohmura A.* Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2001, 40 (4): 753–761.
- O’Neil S., McNeil C., Sass L.C., Florentine C., Baker E.H., Peitzsch E., McGrath D., Fountain A. G., Fagre D.* Reanalysis of the US Geological Survey Benchmark Glaciers: long-term insight into climate forcing of glacier mass balance. *Journ. of Glaciology*. 2019, 65 (253): 850–866.
- Robinson P.J.* On the definition of a heat wave. *Journ. of Applied Meteorology and Climatology*. 2001, 40 (4): 762–775.
- Schuler T.V., Kohler J., Elagina N., Hagen J.O.M., Hodson A.J., Jania J.A., Käab A.M., Luks B., Matecki J., Moholdt G., Pohjola V.A., Sobota I., Van Pelt W.J.* Reconciling Svalbard glacier mass balance. *Frontiers in Earth Science*. 2020: 156.
- Terekhov A.V., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Prokhorova U., Romashova K., Anisimov M., Sidorova O., Tarasov G.* Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grønfjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022, 54 (1): 584–602.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
- Vincent C., Fischer A., Mayer C., Bauder A., Galos S.P., Funk M., Thibert E., Six D., Braun L., Huss M.* Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44 (3): 1376–1383.
- 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: 5318.