

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

На правах рукописи

Прохорова Ульяна Вячеславовна

**ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЛЕДНИКОВ ЗЕМЛИ НОРДЕНШЕЛЬДА НА
ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА АЛЬДЕГОНДА (О. ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)**

Научная специальность 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург, 2023

Работа выполнена в Лаборатории процессов взаимодействия океана и атмосферы ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Научный руководитель: **Иванов Борис Вячеславович**, кандидат географических наук, заведующий Лабораторией процессов взаимодействия океана и атмосферы Арктического и антарктического научно-исследовательского института, доцент Кафедры океанологии Санкт-Петербургского Государственного университета.

Официальные оппоненты: **Торопов Павел Алексеевич**, кандидат географических наук, заведующий Отделом гляциологии Института географии РАН, доцент Кафедры метеорологии и климатологии Московского Государственного университета.

Попов Сергей Викторович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий геофизик Антарктической геофизической партии Полярной морской геологоразведочной экспедиции, доцент Кафедры гидрологии суши Санкт-Петербургского Государственного университета.

Ведущая организация: Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета.

Защита диссертации состоится «12» октября 2023 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 24.2.365.02 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, дом 98, ауд. _____. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2023 года.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 24.2.365.02
к. ф.-м. н.

Ермакова Т. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На протяжении последних десятилетий в районе архипелага Шпицберген наблюдается устойчивое потепление, темпы которого превышают среднемировые из-за эффектов «арктического усиления» (*Nordli et al., 2014; Gjelten et al., 2016; Isaksen et al., 2016; Карандашева и др., 2020; Isaksen et al., 2022*). Количество атмосферных осадков также имеет тенденцию роста, но выраженную в гораздо меньшей степени (*Førland et al., 2020*), вследствие чего зимнее снегонакопление на ледниках архипелага не способно компенсировать их летнее таяние. Поэтому общий баланс массы оледенения архипелага Шпицберген демонстрирует отрицательный тренд и составляет, по последним оценкам, -7 ± 4 млрд т/год без учёта откалывания айсбергов от выводных ледников (*Schuler et al., 2020*). В свете этих фактов мониторинг и прогнозирование масс-балансовых характеристик ледников архипелага, безусловно, являются актуальными научными задачами.

В проводимом исследовании основным методом является теплобалансовое моделирование, применяемое к горно-долинному леднику Альдегонда в сезон абляции. Теплобалансовые модели, базирующиеся на термодинамическом подходе, полезны тем, что позволяют количественно охарактеризовать вклад того или иного метеорологического параметра в таяние на поверхности ледника и выявить механизмы взаимодействия между элементами климатической системы (криосфера–атмосфера).

В настоящее время для оценки абляции арктических ледников в основном используются модели, базирующиеся на эмпирической зависимости таяния от температуры воздуха (*Кренке и Ходаков, 1966; Ohmura, 2001; Hock, 2003; Чернов и др., 2019*) и дающие интегральную оценку абляции по всему леднику, и модели, в основе которых лежит уравнение теплового баланса ледника (*Hock, 2005*). Последние требуют большого количества пространственно распределённых параметров и используются реже в связи с меньшим количеством проводимых на ледниках актинометрических наблюдений, а также из-за трудностей оценки турбулентных потоков и отражательных характеристик поверхности. Тем не менее, теплобалансовые модели для сезонных и межгодовых оценок баланса массы применялись и демонстрировали хорошие результаты для ледников на севере Канады (*Wheler, Flowers, 2011*), в швейцарских Альпах (*Klok, Oerlemans, 2002*), на Кавказе (*Волошина, 1966; Волошина, 2001; Рец и др., 2011; Торопов и др., 2018*) и на Западном Шпицбергене (*Священников, Рагулина, 2010; Van Peltet et al., 2012; Karner et al., 2013; Arnold et al., 2006*).

В исследовании изложены результаты оценки составляющих теплового баланса поверхности ледника Альдегонда, выполненной на основе данных натурных наблюдений с 2018 по 2022 гг. Компоненты баланса рассчитаны с

применением математической модели, разработанной автором. Результаты моделирования были верифицированы путём сравнения с данными натурных измерений толщины стаявшего слоя по абляционным рейкам за аналогичные периоды времени. Поскольку ледник Альдегонда типичен по своим размерам и по диапазону высот для центральной части острова Западный Шпицберген, где оледенение сокращается наиболее быстрыми темпами, то полученные результаты можно экстраполировать на все небольшие и низко расположенные горно-долинные ледники Земли Норденшельда.

Объектом исследования является ледник Альдегонда в условиях современных изменений климата. **Предметом** — тепловой баланс поверхности ледников Шпицбергена, расположенных ниже современной снеговой линии.

Целью исследования является оценка влияния компонентов теплового баланса на внутрисезонную и межгодовую абляцию ледника Альдегонда.

Для достижения цели работы были решены следующие **задачи**:

1. Проведение натурных актинометрических и микроклиматических наблюдений на леднике Альдегонда; проверка репрезентативности данных;
2. Разработка алгоритма для математического моделирования расчёта компонентов теплового баланса, основанного на физических и эмпирических закономерностях;
3. Оценка вклада компонентов теплового баланса в таяние ледника Альдегонда по теплобалансовой модели;
4. Исследование аномалий в соотношении компонентов теплового баланса;
5. Верификация результатов моделирования по данным фактических измерений таяния поверхности ледника Альдегонда;
6. Оценка вклада компонентов баланса в межгодовую изменчивость абляции на основе установленных зависимостей;
7. Оценка вклада компонентов баланса в пространственное распределение величины абляции.

Методы исследования. При проведении исследований использовались следующие программы и алгоритмы: модель расчета потенциального потока солнечной радиации (Module Potential Incoming Solar Radiation), реализованная в программе System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS); методика расчёта отражательной способности поверхности по спутниковым снимкам Sentinel-2; двухслойная модель расчёта проникновения тепла вглубь ледника по вертикальному градиенту температуры; параметризация потоков длинноволновой радиации, адаптированная к условиям архипелага Шпицберген.

Новизна исследования. Проведены уникальные для рассматриваемого района архипелага Шпицберген теплобалансовые и микроклиматические наблюдения; разработана математическая модель таяния поверхности ледника, основанная на современных методиках оценки составляющих теплового баланса, позволившая экстраполировать значения из точки наблюдений на всю поверхность ледника; впервые показана изменчивость соотношения компонентов теплового баланса с разрешением в одни сутки для всего сезона абляции снега и льда на леднике; впервые представлена межгодовая изменчивость соотношения компонентов теплового баланса для центрального региона архипелага Шпицберген; рассмотрен механизм влияния погодных аномалий, таких как волны тепла, на тепловой баланс и абляцию ледника Альдегонда; впервые приведены оценки влияния неравномерности распределения приходящего потока солнечной радиации в зависимости от экспозиции ледника на величину абляции для условий архипелага Шпицберген.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Поток приходящей коротковолновой радиации преобладает в приходной части теплового баланса поверхности ледника Альдегонда в масштабах сезона;
2. В отдельные сутки на леднике Альдегонда наблюдаются эпизоды значительного усиления турбулентного теплообмена, основной причиной этого является циклоническая активность вблизи архипелага;
3. Соотношение компонентов теплового баланса поверхности ледника Альдегонда не постоянно год от года. В годы с наибольшей величиной абляции льда вклад компонентов, зависящих от температуры воздуха, повышается;
4. Приходящая солнечная радиация вносит существенный вклад в распределение величины абляции по леднику Альдегонда, обусловленный формой его поверхности и ориентацией склонов.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.18. – «Науки об атмосфере и климате» пунктам 1, 2, 5, 16, 17, 20.

Практическая и научная значимость проведенного исследования состоит в том, что ледники, будучи, наравне с морским льдом, частью криосферы Земли, являются индикаторами проявления глобальных изменений климата. В условиях современного потепления ледники Арктики стремительно сокращаются по площади и по объёму, что особенно выражено на архипелаге Шпицберген. Понимание механизмов воздействия климата на абляцию

ледников в текущих условиях даст представление о возможном развитии событий в будущем. Применяемая в исследовании модель теплового баланса не является прогностической, её основная задача — количественная оценка вклада в абляцию ледника Альдегонда компонентов теплового баланса поверхности.

Достоверность результатов обеспечивается использованием данных высокого качества и применением современных методик исследования. Ряды данных автоматических метеорологических станций в непосредственной близости от ледника Альдегонда ежегодно проходили контроль на наличие грубых ошибок и сдавались в Единый Государственный фонд данных Росгидромета. Данные АМС дополнительно проверялись на предмет влияния подстилающей поверхности на показания датчиков и их репрезентативность. Данные актинометрических исследований на леднике также сдавались в Госфонды Росгидромета и проходили регистрацию в федеральном реестре баз данных Роспатента. Используемые в работе данные гляциологического мониторинга и данные снегомерных съемок проходили контроль качества в Отделах географии полярных стран и гидрологии устьев рек и водных ресурсов и сдавались в Госфонды Росгидромета.

В работе используются данные метеостанции Баренцбург, работающей в составе сети Росгидромета. Данные проходят контроль качества и публикуются на сайте Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института — Мирового центра данных (г. Обнинск, www.meteo.ru).

Методики расчёта составляющих теплового баланса базировались на физических законах и эмпирических зависимостях, установленных в различных исследованиях, посвященных, как в целом тепловому балансу, так и отдельным его составляющим, опробованных для схожих условий.

Результаты расчета компонентов теплового баланса проходили дополнительную верификацию для определения погрешности используемых методик. Оценка отражательных свойств поверхности ледника Альдегонда с помощью спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat-8 верифицировалась по наземным маршрутным съемкам альбедо. Оценки потоков явного и скрытого тепла, рассчитанные на основе полуэмпирической теории турбулентности Мони́на-Обухова, проверялась по данным прямых пульсационных измерений, полученных с помощью ультразвукового анемометра, используемого в рамках совместных сезонных работ с сотрудниками Института Физики Атмосферы РАН им. Обухова в сезон 2022 г.

Апробация результатов диссертации проходила на различных всероссийских и международных конференциях: Международный Симпозиум по Атмосферной Радиации и Динамике «МСАРД—2023» (Санкт-Петербург, 2023); Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра

Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2022); Международная научная конференция «Научный Форум Свальбарда» (Осло, 2019); Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Майкоп, 2018); Международная научно-практическая конференция LXIX Герценовские чтения (Санкт-Петербург, 2016).

Личный вклад автора. Автором сформулированы цель и задачи исследования; лично проведены натурные наблюдения по программе теплобалансовых и микроклиматических измерений на леднике Альдегонда в период с 2017 по 2022 гг.; разработана методическая часть теплобалансовой модели для расчёта компонентов баланса; результаты моделирования верифицированы по данным наблюдений; проведен анализ полученных результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, входящих в ядро РИНЦ, из них 9 работ — в журналах, индексируемых наукометрическими системами SCOPUS и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационное исследование имеет следующую структуру: введение, четыре главы, заключение, список литературы общим объемом 99 наименований (из них 81 на английском языке), список основных сокращений, и содержит 100 страниц машинописного текста, 7 таблиц и 31 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы проводимого диссертационного исследования. Сформулирована цель и задачи работы, обозначены объект и предмет исследования, описана достоверность полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту, представлен список публикаций автора по теме диссертационного исследования.

В главе 1 дано краткое физико-географическое описание архипелага Шпицберген в целом и полуострова Земля Норденшельда в частности. Описан рельеф и характер оледенения. Для ледников полуострова Земля Норденшельда характерными особенностями являются их расположение ниже высоты современной снеговой линии, небольшая площадь и стремительные темпы ее сокращения. В главе также дано климатическое описание, перечислены основные климатообразующие факторы, представлено районирование архипелага по особенностям распределения климатических параметров и тенденций их изменения. Отдельно рассмотрен климат и климатические тренды полуострова Земля Норденшельда по данным станции Баренцбург, расположенной на восточном берегу залива Грэнфьорд в непосредственной близости от объекта исследования. Показано, что по совокупности всех рассмотренных в главе причин ледник Альдегонда репрезентативен для экстраполяции результатов проводимого исследования и на все остальные ледники полуострова Земля Норденшельда, поскольку он относится к наиболее распространенному здесь морфологическому типу ледников и типичен по высоте поверхности. Климатические условия и их динамика в районе ледника Альдегонда, а также характер и тренды оледенения типичны и для всей юго-западной части архипелага. В конце главы представлен исторический обзор ранее проводимых исследований теплового баланса ледников архипелага Шпицберген. Важной особенностью является то, что первые наблюдения в силу своей нерегулярности давали неоднозначные результаты, а полученные выводы о соотношении компонентов баланса нельзя экстраполировать ни во времени, ни в пространстве.

В главе 2 дано подробное описание теплобалансовой модели системы “атмосфера–ледник” и используемых в работе данных. Знаки потоков тепла, входящих в уравнение баланса, определяют их направление относительно ледниковой поверхности: положительные потоки приносят тепло к поверхности, отрицательные — отводят тепло от неё.

В обобщенном виде разработанная автором модель работает на основе следующего алгоритма: на первом шаге происходит инициализация модели, то есть первоначальное наполнение переменных внутри программы, которые характеризуют за представление текущего состояния ледника; далее, для получения пространственно распределенных метеорологических величин на

основе временных рядов натуральных измерений, в модели предусмотрена предварительная интерполяция с учетом факторов, влияющих на пространственную изменчивость этих величин; на следующем шаге происходит пошаговый расчет компонентов теплового баланса с обновлением внутренних переменных; в качестве результата модель выдает временные ряды компонентов теплового баланса ледника с разрешением в один час, а также пространственно-распределенные величины, характеризующие таяние снега и льда на поверхности. Расчеты основаны на данных наблюдений, проводимых непосредственно на леднике Альдегонда в период с 2015 по 2022 гг. Используются как данные автоматических метеорологических станций, установленных на морене и ригеле вблизи ледника, которые являются основой для расчета компонентов баланса, так и данные, необходимые для инициализации модели и верификации полученных результатов. К последним относятся данные гляциологического мониторинга по 14 абляционным рейкам, данные снегомерных съемок о высоте и плотности снежного покрова и данные, полученные с помощью термокосы, о вертикальном распределении температуры в радиационно-активном деятельном слое ледника. В главе приводятся методики расчёта каждого из компонентов теплового баланса и методики интерполяции данных от точки установки оборудования ко всей поверхности ледника с учетом высоты, вертикальных градиентов метеорологических величин, морфологических особенностей рельефа и астрономических факторов.

Для экстраполяции значений приходящего потока солнечной радиации используется алгоритм расчета потенциального максимально возможного приходящего потока Potential Incoming Solar Radiation, реализованный в программе SAGA GIS. В основе алгоритма расчёта потенциального потока приходящей солнечной радиации на горизонтальную поверхность лежат следующие уравнения:

$$Q = Q_{dir} + Q_{dif}$$

$$Q_{dir} = S_{const} * \beta^{m(\theta)} * S_d * S_g * \cos(A)$$

$$Q_{dif} = R_{glb} * P_{dif} * D * S_g * W * \cos(A)$$

где Q_{dir} — поток прямой солнечной радиации, Q_{dif} — поток рассеянной солнечной радиации, β — прозрачность атмосферы, $m(\theta)$ — относительная длина оптического пути, зависит от высоты над уровнем моря и зенитного угла солнца, S_d — продолжительность солнечного сияния, S_g — доля видимого воздушного пространства, A — угол падения между центроидом сектора

воздушного пространства и осью, перпендикулярной к поверхности, зависит от наклона поверхности, R_{glb} — глобальное нормальное излучение, P_{dif} — доля рассеянного излучения, D — временной интервал, W — доля рассеянного излучения, исходящего из данного сектора воздушного пространства относительно всех секторов (Fu P., 2000).

Далее алгоритм учитывает особенности рельефа, т.е. пересчитывает поток для наклонной поверхности:

$$Q_i = Q \sin \delta_{exp} / \sin h_0$$

где Q_i — поток суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность, δ_{exp} — угол падения солнечных лучей, h_0 — угол высоты солнца (Hofierka et al., 2002).

Полученные растры распределенных значений потока масштабируются по данным измеренного потока на АМС.

Для определения значений альbedo снежной и ледовой поверхности используются спутниковые снимки Sentinel-2 с пространственным разрешением равным 10 и 20 м. Для получения интегральной величины по значениям спектрального альbedo поверхности в отдельных диапазонах длин волн, была использована формула, предложенная в работе (Liang, 2001) и адаптированная позднее для спутника Sentinel-2 (Naegeli et al., 2017). Формула представляет собой уравнение множественной линейной регрессии, в котором предикторами выступают пять из семи спектральных каналов спутника Sentinel-2:

$$\alpha = 0.356b_2 + 0.130b_4 + 0.373b_8 + 0.085b_{11} + 0.072b_{12} - 0.0018$$

где α — спектральное альbedo поверхности, b_i — величина коэффициента спектральной яркости поверхности в i -м спектральном канале спутника Sentinel-2.

Для проведения дополнительной верификации альbedo, рассчитанного по спутниковым изображениям, были использованы данные натуральных маршрутных съемок альbedo.

Для оценки изменения альbedo снега во времени был использован алгоритм расчета, основанный на методике изложенной в работе Rohrer and Braun (1994). Поскольку разница альbedo снега с даты последнего снегопада уменьшается из-за процессов его уплотнения, то альbedo определяется уравнением:

$$\alpha = \alpha_0 + k * \exp^{-n \cdot r} \quad (2)$$

где α_0 — минимально возможное значение альбедо снега, равное 0,40, $k = 0,44$, n — количество дней после последнего снегопада, r — константа, которая выбирается в зависимости от температуры воздуха и составляет 0,05 при отрицательной температуре и 0,12 для положительной.

Длинноволновый баланс вычислялся по методике, описанной в работе (König-Langlo, Augstein, 1994). В соответствии с этим подходом, длинноволновый баланс подстилающей поверхности равен:

$$I = \varepsilon \sigma T_s^4 - \varepsilon_a(n, T, e) \sigma T^4$$

где T_s — температура поверхности (К); ε — излучательная способность поверхности, принятая для льда 0,98; σ — постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Второе слагаемое уравнения — нисходящее излучение атмосферы, где ε_a — излучательная способность атмосферы, являющаяся функцией количества облачности (n), температуры воздуха (T) и упругости водяного пара (e) на высоте 2 м.

Для расчёта турбулентных потоков явного (P) и скрытого (LE) тепла использовался метод, изложенный в работе (Munro, 1990), основанный на полуэмпирической теории турбулентности Мони́на-Обухова. Для оценки величин потоков применяются аэродинамические формулы, в которые входят значения скорости ветра, температуры и относительной влажности воздуха на двух высотах: вблизи поверхности ледника (s) и на некоторой высоте z :

$$P = C_H c_p \rho_a u_z (T_z - T_s)$$

$$LE = C_E L_V \rho_a u_z \left(\frac{0.622}{p} \right) (e_z - e_s)$$

где C_H и C_E — коэффициенты турбулентного теплообмена, зависящие от условий плотностной стратификации в приземном слое воздуха, ρ_a — плотность воздуха, рассчитанная на основе его температуры и давления, $c_p = 1010$ Дж/(кг·К) — удельная теплоёмкость воздуха, $L_V = 2,514 \cdot 10^6$ Дж/кг — скрытая теплота парообразования. Скорость ветра u_z , температура воздуха T_z и давление p измерены на высоте $z = 1,6$ м. T_s и e_s представляют собой температуру тающей поверхности и упругость водяного пара вблизи неё. Парциальное давление водяного пара на высоте z рассчитывается на основе измеренной относительной влажности воздуха.

Поток тепла, направленный вглубь ледника или кондуктивный поток энергии G вычисляется исходя из величины вертикального градиента

температуры ∇T в верхнем слое многослойной модели, которая расширяет простую двухслойную модель Klok and Oerlemans (2002):

$$G = -k\nabla T_{surf} c\rho$$

где c — удельная теплоемкость, ρ — плотность и k — температуропроводность, зависящая от объемной плотности материала в верхнем слое

Изменение температуры верхнего слоя на каждом шаге модельного времени рассчитывается следующим образом:

$$\frac{\partial T_{surf}}{\partial t} = -\frac{k\nabla T}{d_{surf}} + \frac{B}{c\rho d_{surf}}$$

где d_{surf} — толщина верхнего слоя, B — поток тепла из атмосферы, который представляет собой сумму балансов коротковолнового и длинноволнового и турбулентных потоков. B учитывается только для самого верхнего слоя многослойной модели; для более глубоких слоев изменение температуры определяется только разностью восходящих и нисходящих кондуктивных тепловых потоков.

Поток тепла расходуемый на таяние (A) вычисляется по остаточному принципу. Это позволяет определять толщину растаявшего в течение суток слоя льда, в единицах водного эквивалента:

$$A = \frac{N\Delta h}{\Delta t}$$

где A — поток тепла, затрачиваемый на таяние, Вт/м²; N — удельная теплота плавления льда, принятая $3,33 \cdot 10^5$ Дж/кг; Δh — водный эквивалент растаявшего слоя, мм в.э.; Δt — интервал времени, с.

В главе 3 представлены результаты моделирования внутрисезонной изменчивости компонентов теплового баланса, влияющих на таяние ледника Альдегонда в период с мая по сентябрь на примере 2021 года. Начало абляции снега на леднике Альдегонда, согласно модели, пришлось на последнюю неделю мая, однако интенсивного таяния не наблюдалось до 15 июня, поскольку основная часть избытка тепла уходила на прогрев снежной толщи до температуры плавления (Рисунок 1). Полное освобождение ледника от снежного покрова произошло во второй половине лета, что обусловило большой высотный градиент в величинах таяния льда. Наиболее продолжительное время снег оставался в самых верховьях и вдоль бортов ледника в затененных областях. Максимальные значения потока тепла, затрачиваемого на таяние, наблюдались в первую неделю июля, когда началось активное снеготаяние и стремительное отступление снеговой линии вверх по леднику, что привело к снижению его среднего альбедо. Изменения по

абсолютной величине потока тепла, затрачиваемого на таяние льда, в целом повторяют колебания величины коротковолнового баланса поверхности, что наглядно демонстрирует его определяющую роль в изменчивости величины таяния поверхности ледника.

В среднем за сезон таяния, доля коротковолнового баланса от общей суммы положительных компонентов теплового баланса составила 84%, явного потока тепла — 13%, скрытого тепла — 3% (Таблица 1). Полученный по данным 2021 года результат для всего периода абляции хорошо соотносится с результатом предыдущего моделирования для ледника Альдегонда в августе 2019 года, когда аналогичные потоки тепла составили доли в 89%, 10% и 1%, соответственно (Прохорова и др., 2021).

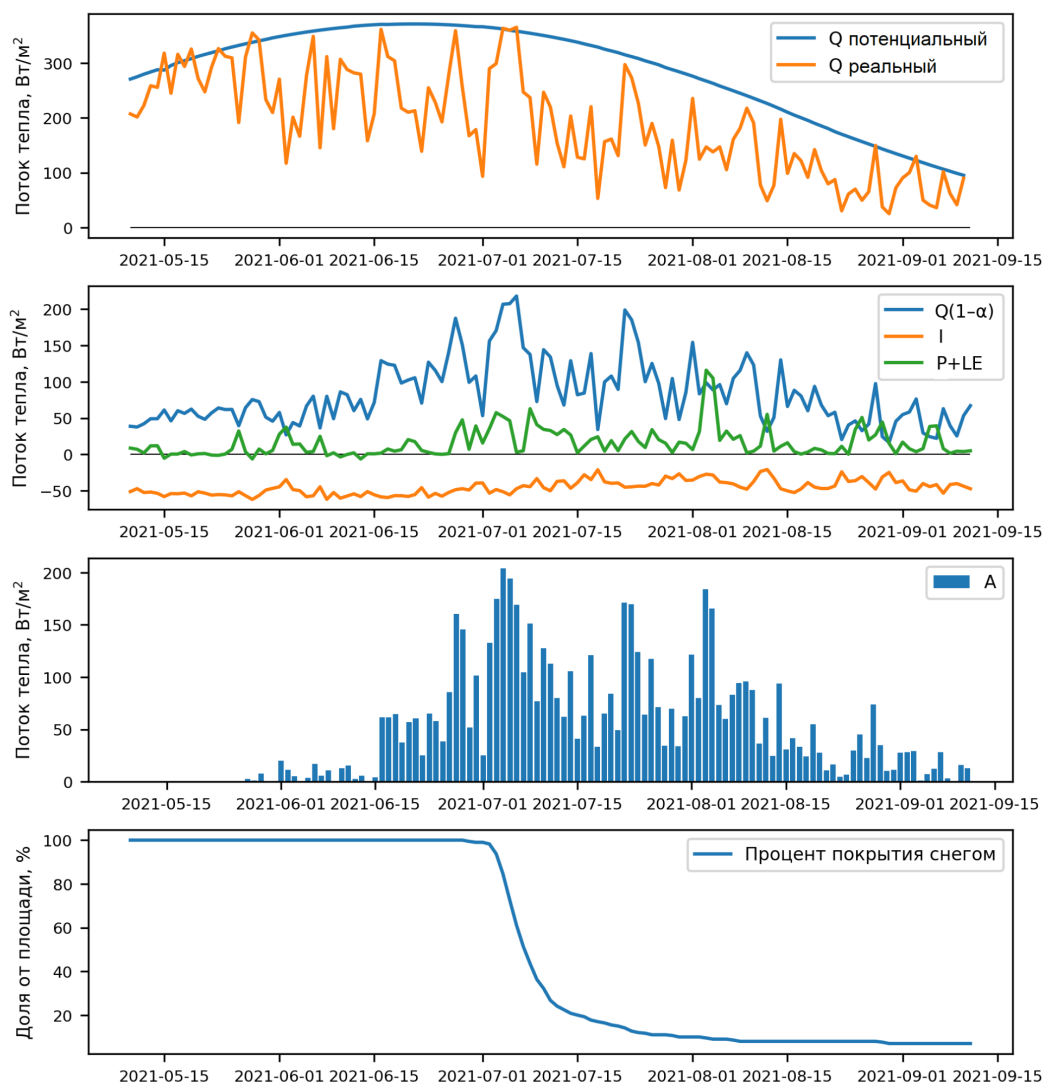


Рисунок 1. Внутригодовые изменения среднесуточных потоков тепла на леднике Альдегонда в сезон абляции 2021 г. P, LE — поток явного и скрытого тепла, $Q(1-\alpha)$ — коротковолновый баланс, I — длинноволновый баланс, A — поток тепла, затрачиваемый на таяние

Таблица 1. Средние значения компонентов теплового баланса в сезон таяния 2021 г. и их вклад в сумму положительных компонентов баланса.

Компоненты теплового баланса	Значение, Вт/м²	Вклад, %
Коротковолновый баланс	83.2	84
Поток явного тепла	12.6	13
Поток скрытого тепла	3.2	3
Поток тепла вглубь ледника	-3.9	-
Длинноволновый баланс	-45.7	-

В ходе сезона таяния ледника Альдегонда в 2021 году было выявлено несколько случаев, когда величина турбулентных потоков тепла и их вклад в таяние ледника значительно возрастали. Эти явления носили эпизодический характер и имели продолжительность от одних суток до недели, давая до 60% общего суточного притока энергии в августе и сентябре, когда поток солнечной радиации был низким (Рисунок 2). Для выделения подобных случаев был использован следующий критерий: "эпизодом" значительного увеличения турбулентных потоков считались те временные отрезки, когда сумма потоков явного и скрытого тепла превышала их среднее за сезон значение (16 Вт/м²) плюс стандартное отклонение (20 Вт/м²). Таким образом, в качестве порогового значения использовалась сумма потоков, составляющая величину более 36 Вт/м². Таких эпизодов на протяжении сезона абляции в 2021 году было выделено семь. Суммарно эти случаи кратковременного увеличения потоков скрытого и явного тепла обеспечили приток к поверхности ледника 103,7 МДж тепла, что составляет около 10% от общего притока тепла за сезон (1086,8 МДж), полученного суммированием всех положительных компонентов баланса за время наблюдений.

Для всех семи рассмотренных случаев характерной особенностью является значительный рост средней скорости ветра и величины его порывов, до 18 м/с, в одном и том же преобладающем направлении с южной составляющей (Рисунок 2). Анализ синоптической ситуации выявил, что в дни этих событий наблюдалось либо прохождением циклона, либо барическая ложбина к западу от атлантического побережья Шпицбергена, что вызвало

сильные южные и юго-восточные ветры в окрестностях Баренцбурга и, как следствие, увеличение турбулентных потоков над ледниками.

Также одной из возможных причин увеличения скорости ветра в одном преобладающем направлении могли быть склоновые кatabатические ветра и фёны. Подобные явления наблюдались ранее на архипелаге Шпицберген во время преобладания восточного переноса (*Shestakova et al. 2022*), и приводили к увеличению приземной температуры воздуха и, следовательно, потока явного тепла, что потенциально может влиять на таяние. Однако, автором выявлено несколько факторов, не позволяющих однозначно идентифицировать события 2021 г. как фёны: 1) направление ветра соответствовало общей атмосферной циркуляции с южной составляющей, а топографическая модуляция не выявлена; 2) не происходило характерного для фёнов падения влажности воздуха, которое наблюдается из-за его адиабатического расширения; более того, наблюдалось увеличение скрытого потока тепла, то есть влагообмен атмосферы с поверхностью ледника усиливался; 3) явления не характеризовались существенным потеплением воздуха; основным фактором, усилившим турбулентные потоки, была именно скорость ветра. Перечисленные факторы позволяют заключить, что основной причиной значительного увеличения турбулентных потоков над ледником Альдегонда в 2021 г. была циклоническая активность, а не фёновые ветра.

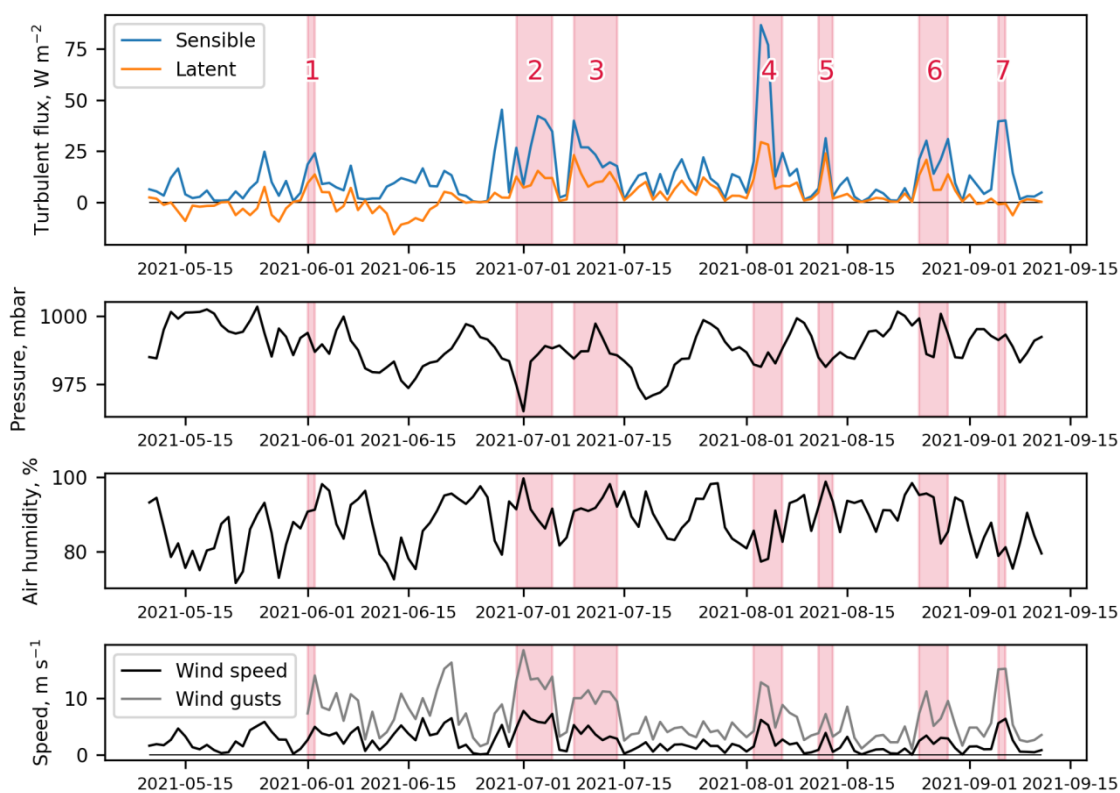


Рисунок 2. Случаи значительного увеличения турбулентных потоков тепла, Альдегонда в сезон таяния 2021 г.

Важным следствием проведенного анализа является то, что увеличение частоты и глубины циклонов, проходящих к западу от архипелага Шпицберген, способно продлить сезон таяния ледников в осенний период, а также уменьшить накопление твердых осадков. В контексте гляциологических исследований мезомасштабная циклоническая активность является фактором регионального масштаба, затрагивающим не только ледник Альдегонда, но также и все ледники юго-западной части архипелага Шпицберген.

В конце главы приводится оценка качества модели. Качество работы модели оценивалась по четырем параметрам: 1) по изменению доли площади снежного покрова во времени, 2) по величинам потоков явного и скрытого тепла, 3) по суммарной за сезон толщине стаявшего слоя льда на леднике в четырнадцати точках, соответствующих местам установки абляционных реек, 4) по суточным скоростям абляции льда за все измеренные на каждой абляционной рейке временные интервалы. С учетом описанных в работе источников погрешностей, характерных для натуральных измерений, используемых для верификации, можно заключить, что погрешность результатов моделирования, невелика и является приемлемой для их дальнейшего анализа.

В главе 4 проанализированы взаимосвязи межгодовых изменений величин абляции ледника Альдегонда и метеорологических параметров, опосредующих компоненты теплового баланса, которые в наибольшей степени определяют таяние ледника. В таблице 2 приведены коэффициенты линейной корреляции между скоростями таяния льда по абляционным рейкам в нижней части ледника (Н) и центральной части ледника (Ц) и двумя метеорологическими факторами — приземной температурой воздуха и потоком нисходящей коротковолновой радиации.

Коэффициенты корреляции с температурой воздуха стабильно высоки за все рассмотренные сезоны. Для теплового баланса ледника это означает, что температура воздуха опосредует практически все его основные составляющие: нисходящий поток длинноволновой радиации, турбулентные потоки явного и скрытого тепла, — физическим обоснованием этому служит тот факт, что эти компоненты в значительной степени зависят от температуры воздуха. Значения коэффициентов корреляции между величинами абляции и приходящей солнечной радиацией для сезонов 2018–2021 гг. также высоки, что указывает на значимую связь между этими величинами. Снижение коэффициентов 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.

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

Площадка	Ц		Н	
	T_{air}	Q	T_{air}	Q
2018	–	–	0.86	0.87
2019	0.83	0.71	0.97	0.90
2020	0.88	0.89	0.98	0.99
2021	0.80	0.77	0.86	0.79
2022	0.81	0.21	0.90	0.34

Чтобы выявить причины, обусловившие значительное ухудшение связи таяния с притоком солнечной радиацией, был проанализирован временной ход значений приземной температуры воздуха и приходящей солнечной радиации в 2022 на фоне их многолетних норм. Максимум температуры воздуха приходился в исследуемом районе на вторую половину июля, после чего наблюдался постепенный спад. Для приходящей коротковолновой радиации 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. Среднемноголетний “куполообразный” ход температуры воздуха был нарушен в 2022 г. сильными положительными аномалиями в начале и в конце сезона таяния: экстремальные значения наблюдались в конце мая–первую неделю июня и в первую неделю сентября. Июньский эпизод сильного потепления не мог непосредственно повлиять на таяние льда, поскольку в это время поверхность ледника была покрыта снегом. Сентябрьский эпизод находит отражение в натурных измерениях абляции: средняя скорость таяния с 1 по 8 сентября 2022 г. составила 3,4 и 4,3 см/сут (в центральной и нижней частях ледника, 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, сентябрьские положительные аномалии температуры нарушают описанные ранее устойчивые корреляции с солнечной радиацией. Положительные аномалии температуры воздуха на протяжении практически всего летне-осеннего сезона наблюдались не только на территории архипелага, но и во всей Европе, и были вызваны масштабной волной тепла 2022 г. По последним экспертным оценкам,

экстремальные значения метеорологических величин, обусловленные, в том числе и волнами тепла, будут повторяться в будущем чаще, охватывая большие территории, и будут иметь большую продолжительность и величину (IPCC, 2021). В результате, таяние низкорасположенных ледников Шпицбергена может в ближайшем будущем перейти от радиационного типа к турбулентно-адвективному.

Метеорологические измерения на леднике Альдегонда производятся, начиная с 2015 г., однако, на основе полученных ранее зависимостей можно установить некоторые особенности абляции и за более ранние отрезки времени, используя данные гляциологического мониторинга. Ряды измерений толщины стаявшего слоя льда на леднике Альдегонда доступны с 2008 г., исключая трёхлетний перерыв в 2010–2013 гг. Поскольку абляционные рейки установлены на леднике достаточно равномерно, охватывая практически всю его поверхность, то данные могут быть проанализированы на предмет пространственного распределения величин абляции льда. Установленная в ряде гляциологических работ зависимость величины абляции льда от высоты соблюдается для ледника Альдегонда, но год от года она выражена в различной степени. Всего за 12 лет наблюдений коэффициент детерминации (R^2), показывающий долю вариации исследуемого признака, определяемую высотой над уровнем моря, изменялся от 0,37 до 0,86. Чем ниже этот показатель, тем большая доля вариации должна определяться компонентами теплового баланса, не зависящими от высоты, а именно коротковолновым балансом. Примерами сезонов с низким значением R^2 и, следовательно, с повышенной ролью коротковолнового баланса в таянии, являются 2015, 2019 и 2021 гг. — в эти сезоны потеря ледником массы была умеренной.

Кроме того, данные прямых измерений показывают, что в годы с наибольшей потерей ледником своей массы высотный градиент таяния был больше (Рисунок 3). Это может быть обусловлено компонентами теплового баланса, в наибольшей степени чувствительными к изменению высоты, такими как потоки явного и скрытого тепла или нисходящее длинноволновое излучение, которые значительно изменяются с высотой.

В 2016, 2018–2020 и 2022 гг. суммарная абляция за сезон достигала максимальных значений, а значения коэффициентов R^2 были высоки, что указывает на значительную роль компонентов баланса, зависящих от высоты, в изменчивости величины абляции. Это также частично подтверждает тезис из работы *Aas et al. (2016)* о том, что в годы с наибольшей абляцией на ледниках архипелага Шпицберген вклад турбулентных потоков возрастает.

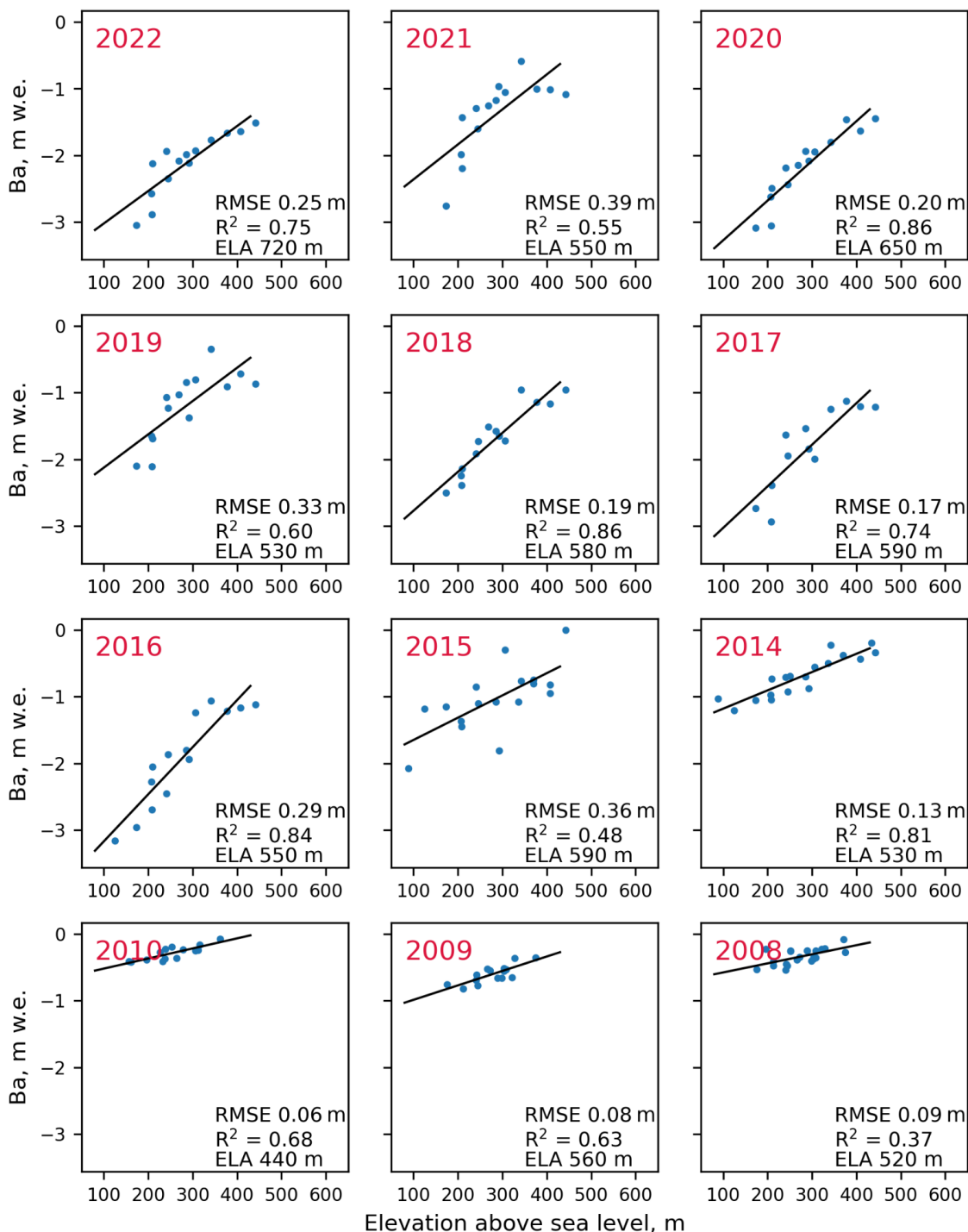


Рисунок 3. Зависимость абляции льда на леднике Альдегонда от высоты над уровнем моря, по данным фактических измерений; RMSE — среднеквадратическая ошибка; ELA — высота снеговой линии

В главе 4 также рассматриваются особенности пространственного распределения величины абляции по леднику Альдегонда. Для анализа использовались данные о снижении поверхности ледника за два пятилетних интервала (2008–2013 и 2013–2018 гг.), которые были получены вычитанием

разновременных ЦМР после предварительного устранения систематического вертикального сдвига между ними (*Terekhov et al., 2023*). Изменение высоты поверхности ледника в целом зависят от рельефа, демонстрируя наибольшие значения (т.е. наибольшее суммарное таяние льда) вблизи края языка и наименьшие — в верховьях. Тем не менее, заметно, что снижение поверхности ледника происходит вдоль его левого и правого борта (северного и южного, соответственно) по-разному при равных высотах (Рисунок 4). Наиболее выражено это в центральной части ледника, где изолинии таяния "заходят" далеко вверх по леднику у левого борта, а затем, пересекая изогипсу высоты в 250 м над уровнем моря, спускаются ниже этой изогипсы у правого борта. Таким образом, ледник Альдегонда делится своей продольной осью на две неравные части, для которых обнаруживаются разные высотные зависимости абляции льда (Рисунок 5а).

Объяснением наблюдаемого различия в таянии северной и южной частей ледника Альдегонда может служить форма её поверхности. Из-за её вогнутости, с тальвегом, проходящим по продольной оси ледника, северная его часть имеет экспозицию на восток-юго-восток (ВЮВ) (Рисунок 4.6). Пространственно эта часть ледника совпадает с областью более интенсивной абляции при равной высоте, описанной выше.

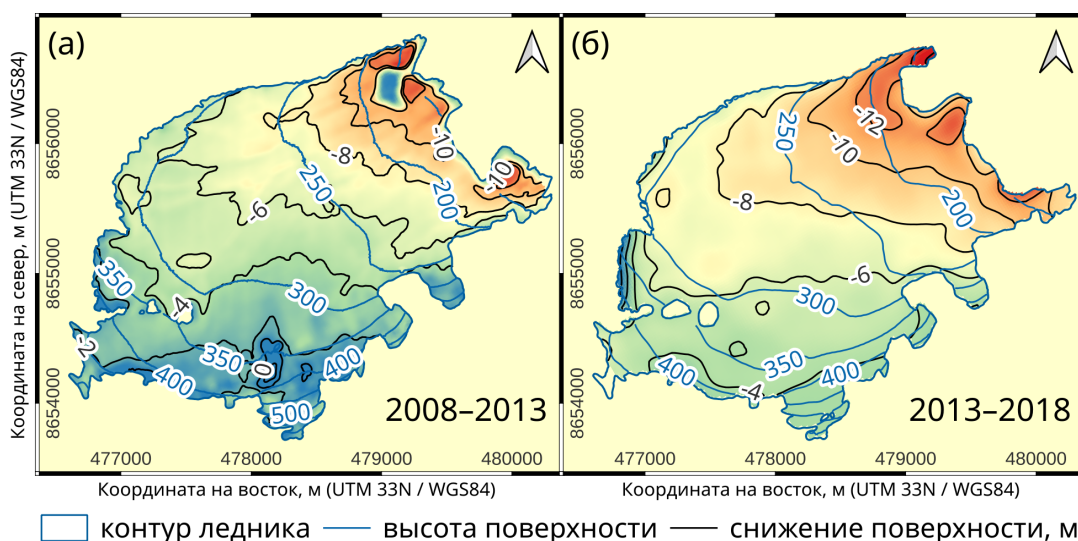


Рисунок 4. Снижение поверхности ледника Альдегонда: а) 2008–2013 гг., б) 2013–2018 гг. (*Terekhov et al., 2023*)

Для оценки вклада экспозиции поверхности ледника в пространственное распределение величины абляции по леднику, был рассчитан усредненный за сезон поток коротковолновой солнечной радиации при ясном небе за период с 15 июля по 15 сентября, выбранный потому, что это наиболее характерные сроки абляции льда на леднике Альдегонда (Рисунок 5б). В силу особенностей наклона и экспозиции, максимальные значения среднего потока солнечной

радиации наблюдаются в северной части ледника, охватывая область наиболее интенсивного таяния, в то время как минимальные значения распределены вдоль южного борта, где ледник затеняется горным хребтом с высотными отметками примерно до 770 м. Осредненный поток в пределах северной и южной частей ледника Альдегонда составляет 165 и 139 Вт/м², то есть среднее различие составляет 26 Вт/м². В действительности, из-за рассеяния значительной части потока солнечной радиации, вызванного облачностью, атмосферными газами и аэрозолями, различие между этими величинами должно быть несколько меньше. Однако оно является достаточным, чтобы заметно влиять на распределение величины абляции льда по леднику.

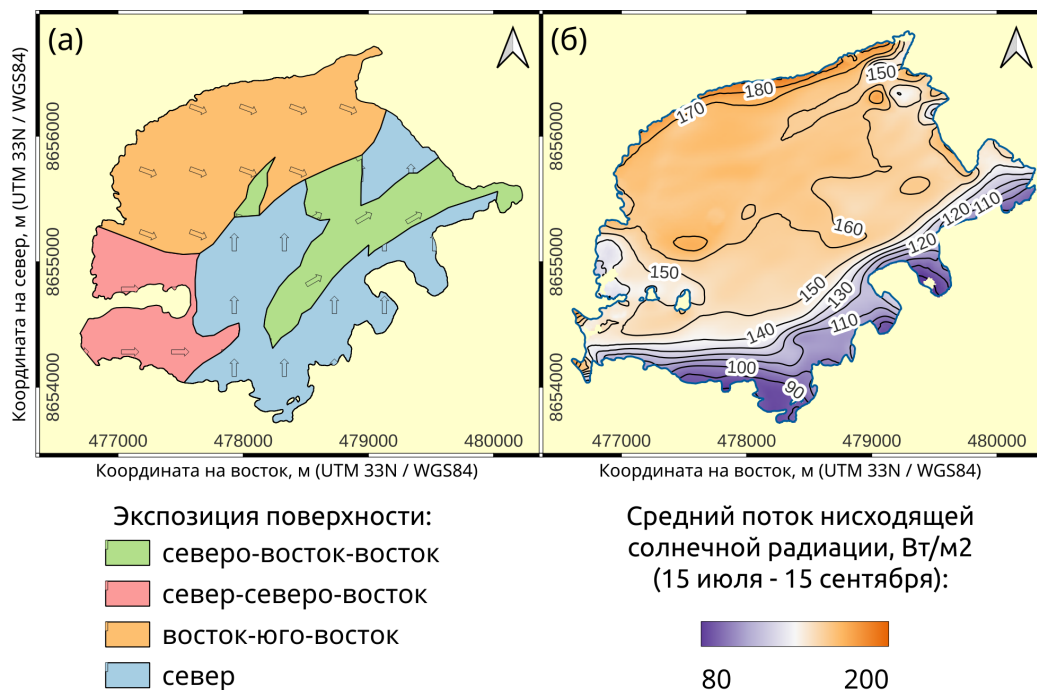


Рисунок 5. Экспозиция поверхности ледника Альдегонда (а) и средний потенциальный поток коротковолновой радиации при ясном небе за сезон абляции льда (б)

По данным о снижении поверхности ледника для двух пятилетних периодов (2008–2013, 2013–2018 гг.), разница в величине таяния в пределах северной и южной частей ледника оказалась примерно одинаковой для обоих периодов, составив 2,1 м за пять лет или 0,40 м льда в год, что соответствует 0,36 м в.э. в год. Чтобы растопить такое количество льда на протяжении усредненного сезона таяния в 60 суток (15 июля–15 сентября), нужен дополнительный поток тепла в 23 Вт/м². Полученное значение хорошо согласуется с приведенной ранее оценкой (26 Вт/м²), характеризующей различие в рассчитанных потоках для северной и южной частей ледника.

Регрессионная оценка зависимости распределения значений абляции от высоты довольно высока и составляет $R^2 = 0,70$ и $0,74$ для периодов 2008–2013

и 2013–2018 гг., соответственно. Вклад солнечной радиации также играет заметную роль — $R^2 = 0,34$ и $0,29$. Это позволило построить модель множественной регрессии, где снижение поверхности рассчитывается по высоте поверхности и значению потока солнечной радиации. Коэффициент детерминации такой модели составил $R^2 = 0,73$ и $0,75$. Таким образом, из объясненной регрессионной зависимостью части пространственного распределения значений абляции по поверхности ледника Альдегонда, примерно на $\frac{1}{4}$ обусловлена приходом коротковолновой радиации, однако большая часть (или $\frac{1}{2}$) связана с компонентами теплового баланса, зависящими от высоты. Оставшаяся необъясненной часть дисперсии абляции или $\frac{1}{4}$ — это вклад в изменчивость факторов, не зависящих от высоты, таких как альbedo поверхности.

Основным выводом из анализа, приведенного в данной главе, является то, что ориентация ледников архипелага Шпицберген крайне важна для их теплового баланса и абляции поверхности. Коротковолновый баланс поверхности является наибольшим из положительных компонентов теплового баланса ледника Альдегонда, при том, что ни одна из частей ледника не имеет собственно южной экспозиции, и лишь треть поверхности ориентирована на восток-юго-восток. При ориентации поверхности ледника на юг вклад солнечной радиации в абляцию может быть существенно выше оцененного нами для ледника Альдегонда.

В **Заключении** приведены основные результаты исследования и сформулированы выводы. В работе были обобщены результаты тепловых балансовых наблюдений, проводившихся на леднике Альдегонда с 2018 по 2022 гг.; разработана математическая модель, позволившая с часовым разрешением рассмотреть процесс абляции ледника Альдегонда, получить пространственно распределенные значения компонентов теплового баланса и оценить процентное соотношение их вклада в абляцию. В модели использованы методики расчета составляющих теплового баланса, основанные на физических и эмпирических закономерностях. В заключении приведены формулировки основных результатов, полученных в рамках исследования:

1. С помощью модели теплового баланса рассмотрен внутрисезонный ход компонентов баланса и посуточно оценен их вклад в абляцию ледника Альдегонда на основе данных 2021 г.;
2. Рассмотрены частные случаи увеличения вклада в абляцию турбулентных потоков в конце сезона абляции в 2021 г.;
3. На основе установленных в работе зависимостей рассмотрена межгодовая изменчивость таяния ледника Альдегонда за период 2018–2022 гг. и оценено влияние основных метеорологических факторов, определяющих сезонную абляцию поверхности ледника;

4. Продемонстрировано, насколько различия в потоке солнечной радиации, вызванные экспозицией и уклоном поверхности, влияют на таяние за счет разницы в потоке приходящей солнечной радиации;
5. Получены оценки вклада потока приходящей солнечной радиации и суммарно компонентов баланса, которые зависят от высоты в пространственную изменчивость величины абляции ледника Альдегонда.

Список публикаций по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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. – Т. 35. – №. 1. – С. 29878.
2. Ivanov B. V., Prokhorova U. V., Sviashchennikov P. N. Analysis of continentality and anomaly of Svalbard climate according to observations of surface air temperature in the second half of the XX century // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 606. – №. 1. – С. 012021.
3. Священников П. Н., Прохорова У. В., Иванов Б. В. Сравнение атмосферной циркуляции в районе архипелага Шпицберген во время потепления 1920–1950 гг. и в современный период // *Метеорология и гидрология*. – 2020. – №. 1. – С. 36–44.
4. Прохорова У. В., Священников П. Н., Иванов Б. В. Исследование временной изменчивости характеристик атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2017. – Т. 63. – №. 4. – С. 47–56.
5. Журавский Д. М., Прохорова У. В., Иванов Б. В., Янжура А. С., Куприков Н. М., Курапов М. В. Полевые испытания методики фотограмметрической оценки альbedo снежно-ледниковых поверхностей // *Исследование Земли из космоса*. – 2019. – №. 4. – С. 18–28.
6. Прохорова У. В., Терехов А. В., Иванов Б. В., Веркулич С. Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // *Криосфера Земли*. – 2021. – Т. 25. – №. 3. – С. 50–60.
7. Ivanov B. V., Zhuravskiy D. M., Prokhorova U. V., Bezgreshnov A. M., Terekhov A. V., Kurapov M. V., Kashkova V. S. The studies of the Svalbard glacial surfaces albedo by an unmanned aerial vehicle // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1040. – №. 1. – С. 012002.
8. Терехов А.В., Прохорова У.В., Демидов В.Э, Борисик А.Л, Веркулич С.Р. Изменения объёма и геометрии ледника Восточный Дальфонна (Шпицберген) в 2008–2019 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68. № 4. С. 370-383

9. Terekhov A. V., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Prokhorova U., Romashova K et al. Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grønfjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20 //Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2022. – Т. 54. – №. 1. – С. 584–602.
10. 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, DOI: 10.1080/15230430.2023.2190057
11. Прохорова У.В., Терехов А.В., Демидов В.Э, Веркулич С.Р., Иванов Б.В. Внутрисезонная изменчивость абляции ледника Альдегонда (Шпицберген)//Лёд и снег. – 2023. – Т. 63. – №. 2. – С. 62–72, DOI: 10.31857/S2076673423020138

Опубликованы 3 базы данных:

1. Иванов Б. В., Священников П. Н., Уразгильдеева А. В., Прохорова У. В., Весман А. В., Пантелеев В. В., Тисленко, Д. И. Среднемесячная температура приземного слоя воздуха на архипелаге Шпицберген по данным норвежских и российских метеорологических станций за период 1898–2014 гг.(SAT). Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2016621093 – 2016.
2. Иванов Б. В., Священников П. Н., Прохорова У. В., Зотова Е. В. Среднесуточная температура приземного слоя воздуха в поселке Баренцбург (архипелаг Шпицберген) за период 1932–2015 гг.(SAT_BBG). Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2019620404 – 2019.
3. Иванов Б. В., Безгрешнов, А. М., Прохорова У. В., Куприков Н. М., Журавский Д. М. Данные измерений отражательных характеристик поверхности ледника Эсмарк (Шпицберген) с помощью БПЛА (грант РФФИ№ 05-18-00471). Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2020620600 – 2020.

Разработана программа для персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ): Прохорова У. В., Терехов А. В., Иванов Б. В. Теплобалансовая модель таяния поверхности ледников ENRGY. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021664075 – 2021.

Результаты диссертационного исследования также вошли в отчеты Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (ФГБУ "ААНИИ") по научно-исследовательским работам, выполнявшимся в рамках ЦНТП и в рамках темы 5.1.4 плана НИТР Росгидромета.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ

Волошина А. П. Метеорология горных ледников //Материалы гляциологических исследований. – 2002. – №. 92. – С. 3.

Волошина А.П. Тепловой баланс поверхности высокогорных ледников в летний период: на примере Эльбруса. – Наука, 1966.

Карандашева Т. К., Демин В. И., Иванов Б. В., Ревина А. Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы //Российская Арктика. – 2021. – №. 2 (13). – С. 26–39;

Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // Материалы гляциол. исслед. – 1966. – №. 12. – С. 153-164.

Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли. – 2021. Т. XXV. – № 3. – С. 50-60. doi: 10.15372/KZ20210305.

Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В. Моделирование таяния поверхности горного ледника // Лёд и снег. – 2011. – №. 4. – С. 24-31..

Священников П.Н., Рагулина Г.А. Оценка поверхностного таяния ледника Альдегонда, арх. Шпицберген // Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики. Комплексные исследования природы Шпицбергена, 2010, с. 469–474.

Торопов П.А., Шестакова А.А, Смирнов А.М., Поповнин В.В. Оценка компонентов теплового баланса ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) в период абляции в 2007–2015 годах // Криосфера Земли, 2018, т. 22, №4, с. 42–54.

Чернов Р.А., Кудиков А.В., Вшивцева 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.

Aas, K. S., Dunse, T., Collier, E., Schuler, T. V., Berntsen, T. K., Kohler, J., Luks, B. 2016. The climatic mass balance of Svalbard glaciers: a 10-year simulation with a coupled atmosphere–glacier mass balance model //The Cryosphere. – 2016. – Т. 10. – №. 3. – С. 1089-1104.

Arnold N. S., Rees W. G., Hodson A. J., Kohler J. Topographic controls on the surface energy balance of a high Arctic valley glacier //Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2006, Т. 111, №. F2.

Førland E. J., Isaksen K., Lutz J. et al. Measured and Modeled Historical Precipitation Trends for Svalbard // *Journal of Hydrometeorology*. – 2020. – T. 21. – №. 6. – C. 1279-1296. doi:10.1175/JHM-D-19-0252.1.

Fu P. A geometric solar radiation model with applications in landscape ecology. – University of Kansas, 2000.

Gjelten H.M., Nordli Ø., Isaksen K. Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen // *Polar Research*. – 2016. – T. 35. – №. 1. – C. 29878. doi: 10.3402/polar.v35.29878.

Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling // *Progress in physical geography*. – 2005. – T. 29. – №. 3. – C. 362-391.

Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas // *Journal of hydrology*. – 2003. – T. 282. – №. 1-4. – C. 104-115.

Hofierka J., Suri M. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications // *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*. – 2002. – T. 2002. – C. 51–70.

Isaksen K., Nordli Ø., Førland E. J., Łupikasza E., Eastwood S., Niedźwiedz T. Recent warming on Spitsbergen—Influence of atmospheric circulation and sea ice cover // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2016. – T. 121. – №. 20. – C. 11913–11931;

Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Køltzow M., Aaboe S., Gjelten H., Mezghani A., Eastwood S., Førland E., Benestad R., Hanssen Bauer I., Brækkan R., Sviashchennikov P., Demin V., Revina A., Karandasheva T. Exceptional warming over the Barents area // *Scientific reports*. – 2022. – T. 12. – №. 1. – C. 1–18.

Karner F., Obleitner F., Krismer T. et al. A decade of energy and mass balance investigations on the glacier Kongsvegen, Svalbard // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2013. – T. 118. – №. 10. – C. 3986-4000. doi:10.1029/2012JD018342.

Klok E., Oerlemans J. Model study of the spatial distribution of the energy and mass balance of Morteratschgletscher, Switzerland // *Journal of Glaciology*. – 2002. – T. 48. – №. 163. – C. 505-518. doi:10.3189/172756502781831133.

König-Langlo G., Augsteine E. Parameterization of the downward long-wave radiation at the Earth's surface in polar regions // *Meteorologische zeitschrift*, 1994, Vol. 3, No. 6., pp. 343–347.

Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms // *Remote sensing of environment*. – 2001. – T. 76. – №. 2. – C. 213-238.

Munro D.S. Comparisons of melt energy computations and ablatometer measurements on melting ice and snow // *Arctic and Alpine Research*. – 1990. – T. 22. – №. 2. – C. 153-162.

Naegeli K., Damm A., Huss M. et al. Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data // *Remote Sensing*. – 2017. – T. 9. – №. 2. – C. 110.

Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A.E.G., Isaksen K. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 // *Polar research*. – 2014. – T. 33. – №. 1. – C. 21349. doi: 10.3402/polar.v33.21349.

Ohmura A. Physical basis for the temperature-based melt-index method // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2001. – T. 40. – №. 4. – C. 753-761.

Rohrer, M. B. Braun, L. N. Long-term records of snow cover water equivalent in the Swiss Alps: 2. Simulation // *Hydrology Research*. – 1994. – T. 25. – №. 1-2. – C. 65-78..

Schuler T.V., Kohler J., Elagina N., Hagen J.O.M., Hodson A.J., Jania J.A., Kääh A.M., Luks B., Małeckı J., Moholdt G., Pohjola V.A., Sobota I., Van Pelt W.J. Reconciling Svalbard glacier mass balance // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – C. 156.

Shestakova, A. A. Chechin, D. G. Lüpkes, C. Hartmann, J. Maturilli, M. The foehn effect during easterly flow over Svalbard // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2022. – T. 22. – №. 2. – C. 1529-1548.

Terekhov A., Prokhorova U., Verkulich S., Demidov V., Sidorova O., Anisimov M., Romashova K. Two decades of mass-balance observations on Aldegondabreen, Spitsbergen: Interannual variability and sensitivity to climate change // *Annals of Glaciology*. – 2023. – C. 1-11. doi:10.1017/aog.2023.40

Van Pelt W.J.J., Oerlemans J., Reijmer C.H. et al. Simulating melt, runoff and refreezing on Nordenskiöldbreen, Svalbard, using a coupled snow and energy balance model // *The Cryosphere*. – 2012. – T. 6. – №. 3. – C. 641-659.

Wheler B. A., Flowers G. E. Glacier subsurface heat-flux characterizations for energy-balance modelling in the Donjek Range, southwest Yukon, Canada // *Journal of Glaciology*. – 2011. – T. 57. – №. 201. – C. 121-133.