

УДК 551.324

## МАЛЫЕ ЛЕДНИКИ ПЛАТО ПУТОРАНА НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕН

© 2023 г. Н. В. Коваленко<sup>1,\*</sup>, В. В. Поповнин<sup>1</sup>, А. С. Губанов<sup>1</sup>,  
А. А. Полохов<sup>1</sup>, Е. И. Успенская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: kovalko\_n@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2022 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

По итогам экспедиционных исследований снежников и ледников Ламских гор на плато Путорана в 2002–2004 и 2019 гг. для суждений об их современном состоянии получены новые сведения о режиме и эволюции малых форм оледенения на фоне климатических тенденций последних лет. В условиях неблагоприятных климатических перемен малые ледники плато Путорана демонстрируют большую устойчивость по сравнению с крупными ледниками и малыми формами оледенения, существующими в тёплой фирновой зоне льдообразования.

**Ключевые слова:** ледник, снежник, плато Путорана, колебания, мониторинг, абляция, аккумуляция, баланс массы

**DOI:** 10.31857/S2076673423030043, **EDN:** KJXENP

### ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования малых форм оледенения, распространённых в разных районах нашей страны, не адекватны уровню гляциологической изученности крупных ледников. Такие объекты зачастую выпадают из сферы внимания гляциологов. Хотя преобладающая часть водноледовых ресурсов Земли заключена в ледниковых покровах арктических и антарктических областей, роль горного оледенения весьма значима в формировании стокообразующей части гляциосферы (Meier, 1984; Dyurgerov, Meier, 1997). Районы распространения малых форм оледенения арктических регионов и Кавказа были подробно исследованы и каталогизированы в 1970-х годах. Однако содержащиеся в каталогах сведения были получены преимущественно дистанционными методами (в результате дешифрирования аэрофотоснимков), что привело к дискуссиям относительно правомерности отнесения тех или иных объектов к ледникам и полноте интерпретации данных.

Цель исследования – выявить современные особенности режима и динамики малых форм оледенения и изучить их изменения в реалиях современных изменений климата. Рассмотрены результаты экспедиционных изысканий, проведённых на ледниках Ламских гор плато Путорана в августе 2002–2004 и 2019 гг. Исходные данные о параметрах оледенения исследуемого района за-

имствованы из Каталога ледников СССР. Учитывались результаты регулярных наблюдений на ближайших метеостанциях.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Плато Путорана представляет собой базальтовый горный массив, расположенный на северо-западной окраине Среднесибирского плоскогорья. Горы плато Путорана возвышаются в среднем до 900–1200 м, а наивысшая точка (1701 м) находится в их центральной части. На западе, севере и востоке базальтовое плато обрывается резкими уступами до 300–500 м высоты соответственно к Западно-Сибирской и Северо-Сибирской низменностям и к известняковому Котуйскому плато. К югу плато плавно понижается, постепенно переходя к общему уровню плоскогорья с высотами 500–700 м.

Существование современных форм оледенения на плато Путорана предопределено специфическим сочетанием морфологических и климатических факторов. Климат исследуемой территории характеризуется неустойчивостью погоды, резким увеличением континентальности климата восточнее 94° в.д., воздействием атлантических и арктических циклонов в западных, северных и центральных частях, преобладанием ветров южных румбов в восточной половине области и юго-западных – в западной.

Средняя годовая температура воздуха в пределах исследуемого района отрицательна восемь месяцев в году. Средняя температура периода аккумуляции на м/с Норильск достигает  $-18^{\circ}\text{C}$ , а минимальная  $-55.5^{\circ}\text{C}$  (<http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078.htm>).

Максимальные температуры ( $10-15^{\circ}\text{C}$ ) наблюдаются в июле, минимальные — в январе ( $-25...-30^{\circ}\text{C}$ ). Абсолютная амплитуда колебаний температуры воздуха для Норильска равна  $82^{\circ}\text{C}$ . Переход температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  происходит во второй декаде мая и в начале сентября. В горной зоне последняя упомянутая дата смещается на конец августа. Ярко выражены климатическая зональность и высотная поясность (<http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078.htm>).

Западная половина плато Путорана отличается от восточной более сильными ветрами, существенно большим количеством атмосферных осадков ( $700-1000$  мм/год в отличие от  $320$  мм/год на востоке) и более мощным снежным покровом ( $80$  см на западе и  $40-60$  см на востоке). Средняя продолжительность залегания снежного покрова в горной местности достигает  $250-280$  дней, в равнинной части уменьшается до  $226$  дней (Сарана, 2005).

Ледники плато Путорана залегают значительно ниже климатической снеговой линии: по оценкам Г.К. Тушинского (1962 г.) положение снеговой линии в данном районе было приурочено к отметкам  $1600-1900$  м над ур. моря. Учитывая климатические тенденции второй половины XX — начала XXI в. текущее её положение могло сместиться на ещё более высокие уровни. Ледники в основном сосредоточены в западной части плато, где развиты широкие платообразные водораздельные поверхности со ступенчатыми склонами, лежащими на высотах от  $800$  до  $1500$  м. Ледники преимущественно приурочены к склонам (присклоновые, ледники уступов и лощинные) и карам (каровые, карово-присклоновые, карово-висячие, ледники кулуаров).

Области аккумуляции и абляции на ледниках чётко не разграничены. Положение фирновой линии и площади фирновых бассейнов переменчивы. Зоны таяния на каровых ледниках приурочены к языкам, где угол наклона менее  $15^{\circ}$ . На склоновых ледниках и ледниках, лежащих в карах, область абляции чаще всего располагается по их периметру и небольшими пятнами по всей площади.

О современной деградации ледников плато Путорана свидетельствуют отчётливо выраженные в рельефе формы ледникового рельефа — древние, ныне пустующие, кары, достигающие  $500$  и более метров в ширину. В понижениях вдоль задних стенок каров нередко формируются снежники. Их поверхность сильно засорена обло-

мочным материалом, контуры нечёткие. Питание снежников происходит за счёт лавинного и метелевого снега. В многоснежные зимы снегонакопление велико, в результате чего могут образовываться многолетние снежники. Существуют сложности в разделении при использовании дистанционных методов данных многолетних снежников и карово-присклоновых ледников (Коваленко, 2011).

Особый интерес вызывает существование на плато Путорана малых ледников на низких уровнях —  $1000-1600$  м над ур. моря, где средняя летняя температура достигает  $10^{\circ}\text{C}$ . Существуют предположения об опережающих темпах деградации оледенения плато Путорана по сравнению с прочими ледниковыми провинциями (Сарана, 2005). Однако мы наблюдали лишь незначительные межгодовые изменения ледников. В рамках настоящего исследования изучены три нивально-гляциальных образования на северном уступе Ламских гор, круто обрывающемся к акватории оз. Лама: ледники № 30 и № 31 по каталогу В.А. Сараны (2005), названные нами Привес и Мальборо, и многолетний снежник Струдомс, залегающий в глубоком каре.

Ледники Привес и Мальборо — типичные карово-присклоновые ледники (их размеры не превышают  $150 \times 250$  м), залегающие неширокими полосами вдоль подветренных склонов в верхнем орографическом поясе плато. Они характеризуются значительной крутизной поверхности (в среднем  $26^{\circ}$ ), приуроченностью к склонам северной экспозиции, для которых характерны благоприятная ориентировка относительно северо-западного преобладающего направления влагонесущих воздушных потоков и лучшие инсоляционные условия. Поверхность ледников осложнена продольными бороздами таяния, которые более чётко выражены по мере увеличения уклона поверхности. Из-под ледников вытекает множество ручьёв.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспедиционные исследования 2002–2004 гг. на северном уступе Ламских гор, которые были отнесены к категории ледников, получили своё продолжение в конце периода абляции 2019 г. Выполнено снегомерное профилирование; измерены плотность в шурфах плотномером ВС–43; плановое и высотное положение границ каждого объекта по данным дешифрирования космических снимков и наземной топографической съёмки; вычислены некоторые масс-балансовые показатели ледников Привес и Мальборо: водозапас нестаявшего остатка снега в области питания; максимальная сезонная аккумуляция; внутреннее питание и пр.

По материалам полевых исследований установлены основные характеристики баланса малых ледников Привес и Мальборо в периоды 2001–2002, 2002–2003 и 2018–2019 гг. Изменения площади ледников Привес и Мальборо оценивались путём дешифрирования космоснимков Landsat 1 TM (август 1973 г.), Landsat 7 ETM (август 2003 г.) с пространственным разрешением 15 м (с погрешностью  $\pm 0.016$ – $0.018$  км<sup>2</sup>) и Sentinel-2, отснятых в конце периода абляции (август) 2016 и 2019 гг. с пространственным разрешением 10 м (с погрешностью  $\pm 0.008$ – $0.009$  км<sup>2</sup>). Координаты и высотные отметки характерных точек границ малых ледников определены с применением спутниковой геодезической аппаратуры в режиме “быстрая статика” лучевым методом в соответствии с “Инструкцией по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS”. Для производства геодезических измерений использован комплект оборудования EFT M1 GNSS. По результатам уравнивания предельная погрешность определения координат точек в плане составила 0.006 м, по высоте 0.025 м.

Настоящее исследование продолжает серию публикаций коллектива авторов с результатами прямых масс-балансовых наблюдений и контролем площадных изменений малых форм оледенения на плато Путорана в полевые сезоны 2002, 2003, 2004 и 2019 гг. (Коваленко, Поповнин, 2005; Коваленко и др., 2021). В процессе прямых наземных измерений собраны данные по значениям снегозапасов в слое сезонной аккумуляции (снег и фирновый остаток). Снегомерные съёмки выполнены в середине и конце абляционного цикла. Одновременно в шурфах измеряли плотность снежно-фирновой толщ. Из-за недостижимости наблюдаемых объектов в период максимальной аккумуляции значения максимального снегозапаса к концу зимнего сезона реконструированы по ландшафтными маркерам — зонам произрастания чёрных лишайников *Umbilicaria*, окаймляющих верхние и боковые границы ледника на равномерном удалении около 10–15 м, непосредственно ниже фронтов ледников расстояние до данных растительных сообществ увеличено. Такая картина обусловлена невозможностью развития устойчивых колоний данного вида в пределах областей, находящихся под снегом большую часть года. В состоятельности предположения о возможности использования контуров ареалов лишайников для косвенного расчёта максимальной высоты сезонного снежного покрова убеждает биологический эксперимент (Benedict, 1990), проведённый в нивальном поясе Скалистых гор. Он доказал невозможность колонизации литогенных формаций некоторыми быстрорастущими разновидностями лишайников из ро-

дов *Umbilicaria* и *Rhizocarpon* там, где продолжительность залегания снежного покрова превышает первые десятки недель за год. Тогда правомерно предположение о соответствии нижней границы области, лишённой лишайников, максимальным уровням залегания сезонного снега. На верхней бровке плато над исследуемыми объектами устойчивый снежный покров не формируется вследствие активного дефляционного выноса отсюда на поверхность ледников (чем и объясняется их существование ниже климатической снеговой границы). Приняв допущение о квазипараллельности дневной поверхности ледника весной и летом по причине простоты их морфологического строения и установленной в ходе мониторинга слабой изменчивости поля аккумуляции, становится возможным оценить толщину снега в период максимального накопления.

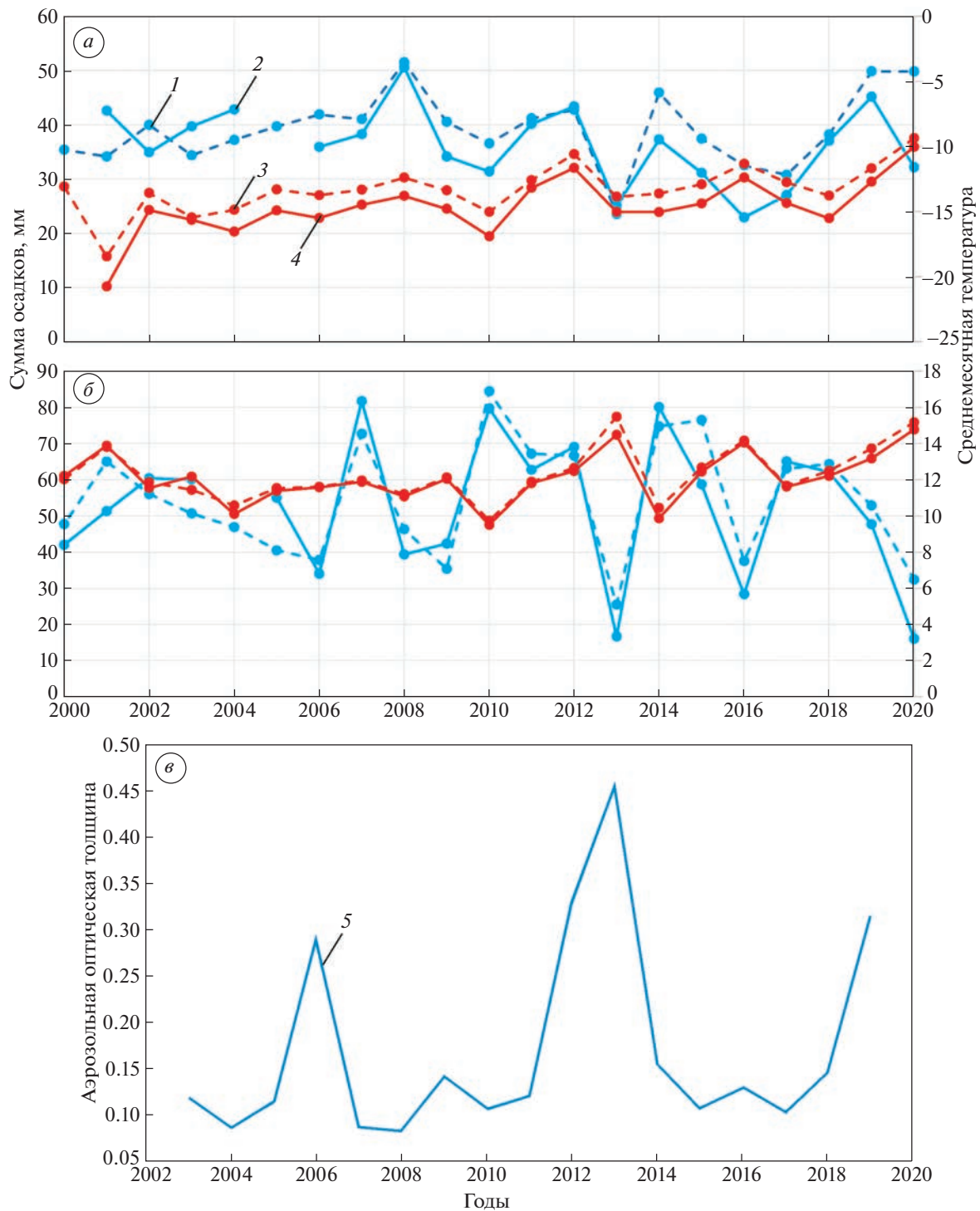
Плотность снежного покрова определяли в опорных шурфах, в которых измерения плотности проводили послойно с помощью плотномера ВС–43. Всего на ледниках Мальборо и Привес плотность была измерена в двух шурфах. С учётом толщины снежного покрова в промерных точках и плотности снега в привязанных к ним шурфах рассчитаны значения снегонакопления за период аккумуляции.

В целях подобных реконструкций измеренный в середине сезона водозапас слоя снега, который в ходе снегомерных работ определяли по нормали к физической поверхности (в соответствии с методикой масс-балансовых расчётов для всего ледника пересчётом через его истинную криволинейную площадь), был увеличен на значение предшествующего сезонного стаивания:

$$\Delta E = \rho L \sin(\alpha - \beta),$$

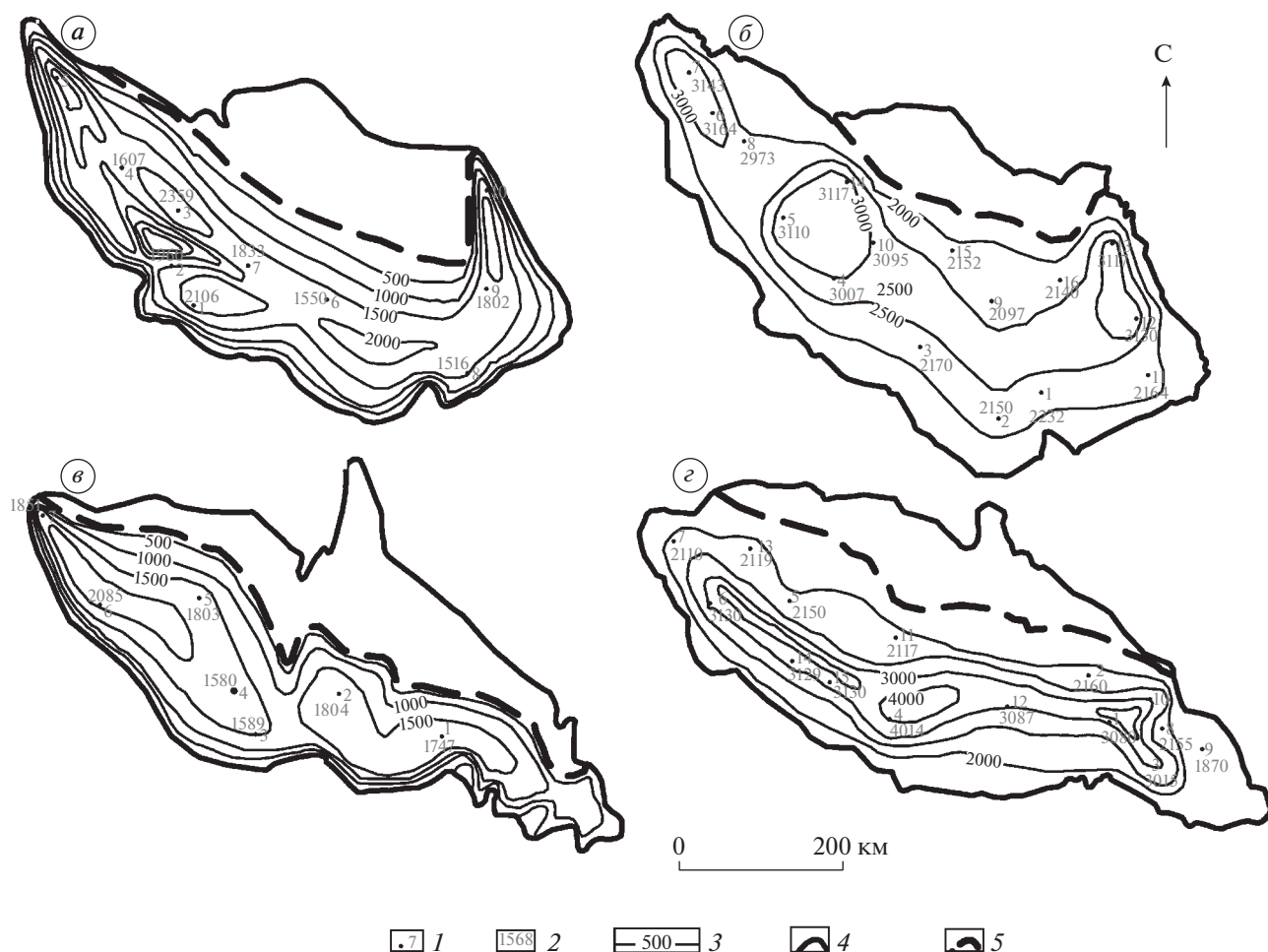
где  $\rho$  — плотность снега (0.61 г/см<sup>3</sup> в среднем по всему разрезу в шурфах);  $\alpha$  и  $\beta$  — углы наклона неледниковой обрешетки и поверхности ледника, соответственно (характерные значения:  $\alpha = 27^\circ$ ,  $\beta = 18^\circ$ );  $L$  — расстояние от нижней границы ареала лишайников до тыловой части ледника. Фоновая величина  $L = 12.6$  м совпала по своей величине на моменты проведения снегомерных работ в 2002 и 2003 гг., что означает приблизительно равное стаивание на начальных отрезках сезонов абляции. Такая параметризация позволяет вычислить  $\Delta E = 1070$  мм (в.э.) с учётом принятого 15%-ого уплотнения снежной толщ в течение тёплого периода, которое отмечается на постоянно наблюдаемых репрезентативных ледниках других горных стран (Малый Актру на Алтае, Джанкуат на Кавказе и др.) (Коваленко, 2011).

Достаточная густота промерных пунктов (рис. 1–3) при проведении снегомерных работ в конце сезона абляции и применение описанной выше расчётной схемы позволили картографировать представленные ниже поля водного эквива-



**Рис. 1.** Основные метеорологические параметры района исследований для сезона аккумуляции (сентябрь–май) (а); для сезона абляции (июнь–август) (б); среднее значение за период абляции аэрозольной оптической толщины атмосферы по данным MODIS для всей территории плато Путорана (в): 1 – сумма осадков ERA5, мм/мес; 2 – сумма осадков м/с Норильск; 3 – температура ERA5, °C; 4 – температура м/с Норильск, °C; 5 – среднее значение за период абляции аэрозольной оптической толщины атмосферы.

**Fig. 1.** Main meteorological parameters of the research area for accumulation season (September–May) (a); for ablation season (June–August) (b); aerosol optical thickness of the atmosphere averaged over the ablation season, according to MODIS data for the entire territory of the Putorana Plateau (v): 1 – precipitation amount ERA 5, mm/month; 2 – precipitation amount, Norilsk weather station, mm/month; 3 – temperature ERA 5, °C; 4 – temperature, Norilsk weather station, °C; 5 – aerosol optical thickness of the atmosphere averaged over the ablation season.



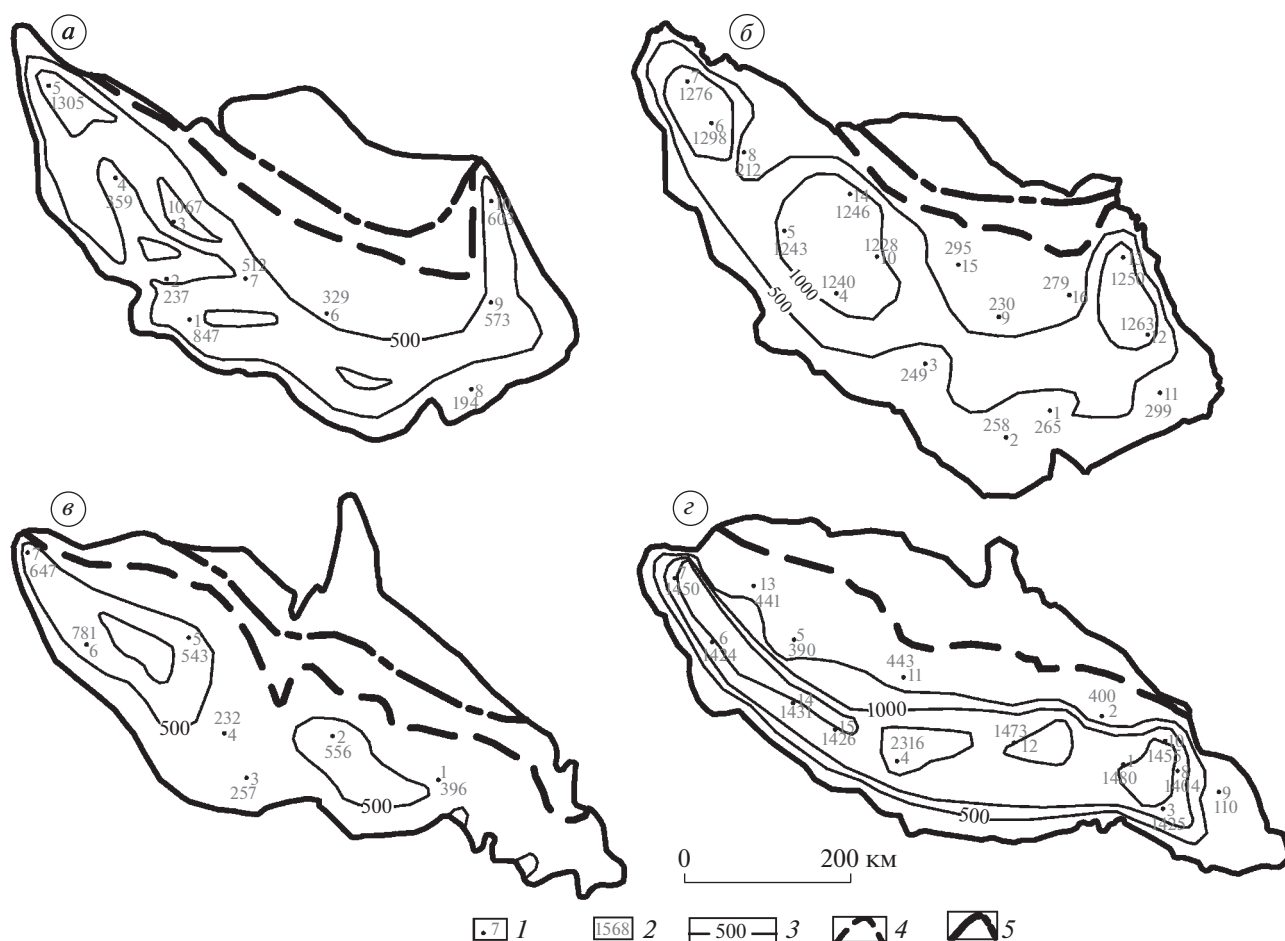
**Рис. 2.** Максимальная аккумуляция в сезоны 2001/02 и 2002/03 гг. для участков выше фирновой линии – ледник Привес 2001–2002 гг. (а) и 2002–2003 гг. (б), ледник Мальборо 2001–2002 гг. (в) и 2002–2003 гг. (г): 1 – точки снегомерных работ; 2 – значение косвенно восстановленной сезонной аккумуляции в точке  $E-\Delta E$  (мм вод. экв.); 3 – изолинии аккумуляции (мм вод. экв.); 4 – граница ледника данного года; 5 – фирновая линия.

**Fig. 2.** Maximum snow accumulation in 2001/02 and 2002/03 balance years for areas above firn line positions – Prives Glacier 2001–2002 (a) and 2002–2003 (б), Marlborough Glacier 2001–2002 (в) and 2002–2003 (г): 1 – snow depth measurements points; 2 – values of indirectly reconstructed seasonal accumulation in point  $E-\Delta E$  (mm w. e.); 3 – accumulation isolines; 4 – the boundary of the glacier of correspondent year; 5 – firn line position.

лента в нестывшем остатке сезонного снега (поля чистой аккумуляции областей питания), для чего использовались стандартные интерполяционные приёмы между балансовыми значениями в точках, а также отчасти свойства подобия полей для последующих сезонов.

Общие тенденции изменения масс-балансовых показателей и площадных параметров рассматриваемых малых форм оледенения представлены в предшествующих публикациях авторов (Коваленко, Поповнин, 2005; Коваленко и др., 2021). В настоящей работе предпринята попытка проанализировать корреляцию обозначенных выше тенденций с наблюдавшимися изменениями ряда метеорологических характеристик.

Для анализа межгодовой изменчивости основных метеорологических величин в период исследований использованы: приземная температура воздуха, месячная сумма осадков (<http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078.htm>) и данные метеорологического реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5 (Hersbach et al., 2020), который является синтезом усвоения математической моделью стационарных, аэрологических, спутниковых данных наблюдений и численного прогноза состояния атмосферы. Данные реанализа представляют собой значения в регулярной сетке с шагом 0.25 градуса по широтам и долготам. Для характеристики рассматриваемого района проведено осреднение данных для области от 68 до 70° с.ш. и от 88 до 92° в.д. По данным из этих источников рассчита-



**Рис. 3.** Водозапас фирнового остатка 2001/02 и 2002/03 гг. — ледник Привес 2001–2002 гг. (а) и 2002–2003 гг. (б), ледник Мальборо 2001–2002 гг. (в) и 2002–2003 гг. (г): 1 — точки снегомерных работ; 2 — значение водозаписа в фирновом остатке Е-Аб; 3 — изолинии водозаписа; 4 — граница ледника данного года; 5 — фирновая линия; 6 — граница питания.

**Fig. 3.** Water equivalent of firn residue in 2001/02 and 2002/03 — Prives Glacier 2001–2002 (а) and 2002–2003 (б), Marlborough Glacier 2001–2002 (в) and 2002–2003 (г): 1 — snow depth measurements points; 2 — values of water equivalent of firn residue Е-Аб; 3 — water equivalent isolines; 4 — glacier border of correspondent year; 5 — firn line position; 6 — equilibrium line.

ны средние значения метеорологических параметров для периода аккумуляции (сентябрь–май) и абляции (июнь–август) с 2000 по 2020 г. (рис. 4, а–б).

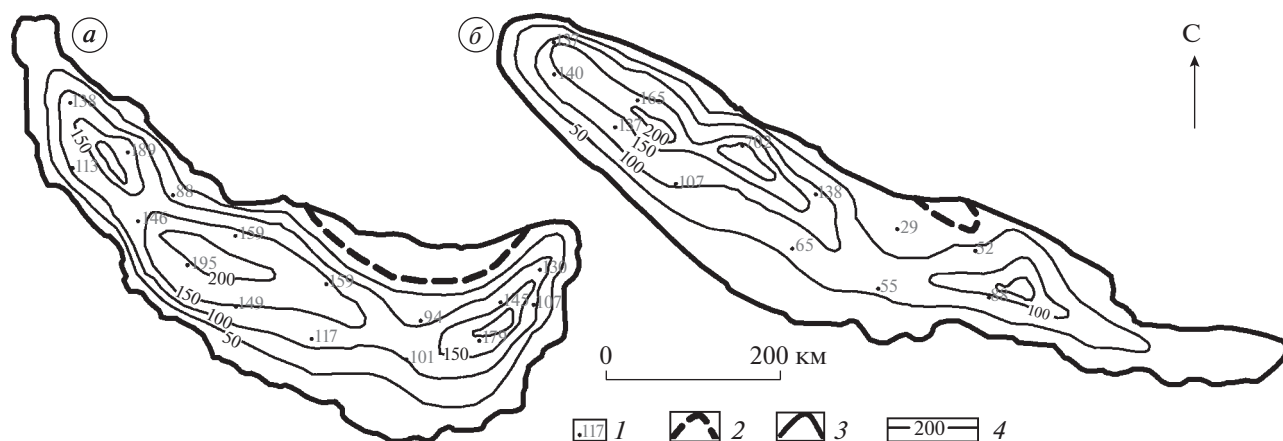
Рассмотрена также изменчивость на территории выполняемых работ такого параметра, как аэрозольная оптическая толщина атмосферы (далее — АОТ), поскольку в 2019 г. отмечалось значительное количество лесных пожаров в северной части Красноярского края и сильное задымление.

Из-за отсутствия данных измерений содержания аэрозоля в воздухе для анализа взяты результаты спутникового мониторинга прибора MODIS (Justice et al., 2002), установленного на спутнике TERRA/AQUA (см. рис. 4, в). Этот прибор позволяет восстанавливать для большей территории комплексную характеристику степени загрязнения воздуха — АОТ, показывающую ослабление солнечной радиации во всём столбе атмосферы. Продукт горения леса — сажа или чёрный углерод —

сильно поглощающее вещество. Следует предположить, что на фоне высоких значений АОТ может уменьшаться приток солнечной радиации и/или уменьшаться приземная температура воздуха. Подобные эффекты достаточно изучены и были оценены для пожаров в Восточной Сибири в 2019 г. (Kirsanov et al., 2020).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Сведения об условиях внешнего массообмена ледников получены в результате анализа данных полевых исследований, выполненных в летний сезон 2002, 2003, 2019 гг. на малых ледниках плато Путорана. При этом в последнем из этих сезонов возможности применения косвенного расчёта были более ограничены по сравнению с предыдущими. Результаты выполненных исследований были частично рассмотрены в предшествующих



**Рис. 4.** Водозапас фирнового остатка на ледниках Привес и Мальборо в 2018/19 г. – ледник Привес 2018–2019 гг. (а), ледник Мальборо 2018–2019 гг. (б): 1 – точки снегомерных работ; 2 – фирновая линия; 3 – граница ледника данного года; 4 – изолинии фирнового остатка г/см<sup>2</sup>.

**Fig. 4.** Water equivalent of 2018/19 firn residue on Prives and Marlborough Glaciers – Prives Glacier (a), Marlborough Glacier (b): 1 – snow depth measurements points; 2 – firn line position; 3 – glacier border of this year; 4 – firn residue isolines, g/cm<sup>2</sup>.

публикациях авторов, посвящённых данному району (Коваленко и др., 2021).

Для 2001/02 и 2002/03 гг. составлены картосхемы восстановленного максимального снегозапаса в сезонном слое аккумуляции (см. рис. 1, а–г) и карты водозапаса фирнового остатка (см. рис. 3, а–г). В табл. 1 приведены итоги расчёта масс-балансовых характеристик, в том числе:  $E$  – текущий водозапас сезонного снежного покрова на дату проведения снегомерных съёмки (18.08.2002 и 14.08.2003);  $E + \Delta E$  – косвенно восстановленное значение сезонного максимума аккумуляции;  $A$  – абляция за период после снегосъёмки до окончания сезона абляции данного балансового года (за 18–23.08.2002 и 14–25.08.2003);  $E - A$  – итоговый водозапас в фирновом остатке (удельный баланс массы). Строго говоря, последняя графа в табл. 1 отличается от истинного значения итогового за год баланса массы фирнового бассейна на величину неучтённого в применённой расчётной схеме водного эквивалента повторного замерзания талых вод ниже слоя текущего накопления  $F$  (внутреннего питания, или декремента абляции). Локальные параметры этой величины в условиях плато Путорана нуждаются в уточнении, основанном на измерениях водозапаса в нескольких последовательных годовых генерациях фирна в верхней части толщи ледника. Подобные измерения в условиях господствующего в Средней Сибири холодного режима оледенения, переходного от холодного фирнового к инфильтрационному, ранее не проводились.

Приблизительно оценить величину  $F$  можно лишь для 2001/02 г., исходя из косвенных соображений и допущения о применимости методики расчёта  $F$  для фирновых зон, предложенной Г.Н. Голубевым (1976). Необходимые для вычислений

значения выраженной в сантиметрах снега толщины зимней аккумуляции текущего и последующего годов ( $h'_s$  и  $h''_s$  соответственно) получаем, переводя в слой снега водный эквивалент максимальной аккумуляции  $E + \Delta E$  через плотность весеннего снега  $\rho_0 = 0.52$  г/см<sup>3</sup>, которая в свою очередь восстанавливается путём уменьшения на 15% плотности снежного покрова в конце периода абляции по результатам выполненного шурфования, которое в обоих годах оказалось равным  $\rho = 0.61$  г/см<sup>3</sup>. Так, на леднике Привес:

$$h'_s = (E + \Delta E)_{2001/02} / \rho_0 = 370 \text{ см,}$$

$$h''_s = (E + \Delta E)_{2002/03} / \rho_0 = 503 \text{ см.}$$

Для ледника Мальборо аналогичные расчёты приводят к значениям  $h'_s = 349$  см,  $h''_s = 520$  см. Сведения же для определения параметра  $h'_t$  (толщина фирнового остатка) также выводятся из материалов прямых полевых измерений:

$$h'_t = (E - A)_{2001/02} / \rho.$$

Искомая величина тогда составляет 99 см для ледника Привес и 80 см для ледника Мальборо. Итоговое вычисление  $F$  по численному равенству (Голубев, 1976)

$$F = 0.06(1000 - h'_s) + 0.3(1000 - h'_t - h''_s)$$

приводит к значению 157 мм водного эквивалента по данным с Привеса и 159 мм по данным с Мальборо. С учётом безусловно имеющей место погрешности косвенного расчёта оба варианта следует признать идентичными. Осреднённую величину  $F$  с округлением до 10 мм можно принять равной 160 мм.

**Таблица 1.** Средние значения масс-балансовых параметров ледников Привес и Мальборо (мм. вод. экв.)

Ледник	Водозапас снежного покрова на момент снегосъёмки ( $E$ )	Косвенно восстановленный весенний максимум водозаписа сезонного снежного покрова ( $E + \Delta E$ )	Абляция за период полевых наблюдений после проведения снегосъёмки ( $A$ )	Водозапас фирнового остатка ("чистая аккумуляция") ( $E - A$ )
2001/02				
Привес	854	1924	251	603
Мальборо	744	1814	256	488
2002/03				
Привес	1546	2606	797	749
Мальборо	1628	2698	690	1185
2018/19				
Привес	1379	2829	198	1181
Мальборо	1040	2490	211	829

Известно, что с усилением континентальности климата возрастает роль внутреннего питания, скачкообразно падающего до нуля при переходе к инфильтрационно-конжеляционной зоне льдообразования, где просачиванию талых вод ниже основания сезонного слоя препятствует ежегодно образующийся на нижнем контакте гидрогенный наложенный лёд. Выведенная величина  $F = 160$  мм находится в полном согласовании с этой закономерностью: на ледниках, расположенных в гораздо более мягких климатических условиях умеренных широт (Актру, Джанкуат), внутреннее питание не превышает 140 мм (Ледники Актру, 1987; Ророvnnin, Naruse, 2005). Таким образом, следует констатировать довольно значимую роль процесса повторного замерзания жидкой воды в толще паторанских ледников. Нельзя утверждать, что водный эквивалент этого процесса количественно соизмерим с аккумуляцией и абляцией на поверхности, но в отличие от ледников сугубо океанического морского типа, его процентное соотношение с основными компонентами баланса составляет не 5–10% (Голубев, 1976), а заметно выше – до 15%. Из-за этого неучёт  $F$  в масс-балансовых расчётах любых сибирских ледников представляется лишённым смысла по причине отнюдь не пренебрежимо малых ошибок. В нашем же случае точное выведение баланса массы для всего ледника ни для одного из объектов невозможно из-за отсутствия информации о годовом стаивании льда ниже границы питания, однако для фигурирующих в табл. 1 областей фирновых бассейнов параметризация удельного баланса массы всё-таки возможна. Для этих целей необходимо увеличить значение водозаписа фирнового остатка  $E - A$  из крайне правой колонки на обозначенную величину в 160 мм, потому

что внутреннее питание в своём физическом смысле играет роль декремента абляции. Поскольку на большинстве объектов гляциологического мониторинга показатель  $F$  очевидно не зависит от времени на данной стадии развития оледенения (в частности – Ледник Джанкуат, 1978; Ледники Актру, 1987), то вполне обоснованно распространить тезис о неизменности величины внутреннего питания от года к году и на оледенение Ламских гор.

Балансовые периоды 2001–2022 и 2002–2003 гг. для исследуемых объектов явно отличаются параметрами бюджета (см. рис. 1–2; табл. 1). Представленные значения чистой аккумуляции, отнесённой ко всей области питания, свидетельствуют о том, что период 2002–2003 гг. был значительно более благоприятен для исследуемых ледников, чем 2001–2022 гг., а именно: на леднике Привес чистый приход вещества (с учётом 160 мм-ой поправки на внутреннее питание) составил в 2001–2022 гг. 763 мм в слое воды, а 2002–2003 гг. – 909 мм, т.е. наблюдается 20%-й прирост данного параметра; для ледника Мальборо данный прирост был ещё более значительным (более чем двукратным): 647 мм в 2001–2022 гг. против 1298 мм в 2002–2003 гг. Благоприятная балансовая обстановка ледников объясняется особенностями циркуляционного режима 2002–2003 г., которые смогли качественно поменять взаимное соотношение между вещественным балансом обоих сравниваемых ледников в пределах одного года. Ледник Привес в 2001–2022 гг. оставался в более выгодном балансовом состоянии, однако в 2002–2003 гг. более благоприятные условия сложились на леднике Мальборо.



Суждение о более благоприятных условиях в 2002–2003 гг. для ледников плато Путорана обосновано сопоставлением значений доли области питания AAR (accumulation area ratio) по годам. На рис. 2 отчётливо прослеживается тот факт, что для всех исследуемых объектов в этот период поверхности, лежащие ниже фирновой линии, занимают значительно меньшие площади. Однако стоит учитывать, что фирновая линия не является точным маркером, разделяющим области аккумуляции и абляции, поскольку под ней расположен ареал распространения наложенного льда, нижний уровень распространения которого предлагается считать истинной границей области питания. Поэтому строгое определение AAR по положению фирновой линии на рис. 3 невозможно. Зато на основании рис. 2 чётко дешифрируется та часть ледника, где сохраняется фирновый остаток. По аналогии с AAR введём родственный и семантически близкий ему символ FBR (firn basin ratio), обозначающий долю фирнового бассейна. Лучше распознаваемый на фотографиях и картографируемый при исследовании на местности (например, при GPS-метрии), этот показатель служит таким же индикатором состояния ледника, как и AAR. В 2001/02 и 2002/03 гг. вычислены значения FBR: для ледника Привес – 70 и 93%; для ледника Мальборо – 75 и 91% соответственно. Естественно, изохронные значения AAR в каждом случае должны превышать эти проценты.

Представляется интересным, что для большинства репрезентативных ледников Земли, на которых ведётся систематический масс-балансовый мониторинг, показатель AAR редко где имеет значения выше, чем показатели FBR для малых присклоновых ледников плато Путорана в те же годы (Glacier mass..., 2005). Причиной представляется сосредоточение регулярных наблюдений преимущественно на ледниках долинного типа, площадь которых значительна и составляет несколько квадратных километров.

Отвечающая стационарному состоянию величина  $AAR_0$  (Glacier mass..., 2005) для данных опорных ледников в сравнении с присклоновыми закономерно отличается в меньшую сторону. Минимальной данная величина теоретически должна была бы быть в случае с классическими каровыми ледниками, где концентрация вещества чаще всего сосредоточена в узкой полосе в тыловых частях под стенкой каров, там, где снег сносится лавинами и перераспределяется метелевым переносом. Там закономерно сохраняются участки с перелетовывающим ежегодно фирновым остатком. Обусловленность же значений AAR морфологическим типом ледника заложена в Гляциологическом словаре (1984) при представлении родственного понятия – ледникового коэффициента. Из выборки ледников глобальной базы данных можно вычленить всего несколько

объектов регулярного мониторинга, которые не являются долинными, а относятся к категории каровых, – такие как ледник Пенденте в итальянских Альпах, Маладета в испанских Пиренеях. Эти ледники, в соответствии с таблицами Бюллетеня за 2002–2003 гг., соотносятся со сформулированной закономерностью и отличаются пониженными значениями  $AAR_0 < 0.4$ . В таком случае присклоновые ледники представляют противоположную крайность.

Массообмен на ледниках плато Путорана значительно ниже по интенсивности, чем, например, на Кавказе. Степень интенсивности массообмена характеризует сумма модулей компонентов уравнивания баланса массы (полный обмен ледника). Для области питания ледника Джанкуат данная величина составляет в среднем многолетнем исчислении 5895 мм в.э., тогда как на ледниках Привес и Мальборо – 3797 и 3470 мм в.э. соответственно, что более чем на треть меньше, чем на Кавказе.

Интересно, что за годы наших изысканий баланс массы областей питания (“чистая аккумуляция”) исследуемых путоранских ледников даже при малых значениях прихода–расхода оказывается вполне сопоставим с репрезентативным кавказским ледником Джанкуат, аккумуляция и абляция на котором значительно выше. Данный факт может свидетельствовать о том, что оледенение плато Путорана пребывает в значительно более выгодной балансовой ситуации, однако для этого необходимо найти опровержения контраргументу, что такое может быть лишь следствием положительной балансовой аномалии 2001/02 и 2002/03 гг.

Для данных целей в настоящем исследовании мы подробно рассматриваем 2018/19 балансовый год, который оказался гораздо более выраженной аномалией. Для этого сезона были также рассчитаны и картографированы значения водозапаса фирнового остатка (см. рис. 3, а–б), а описанным выше фитоиндикационным методом восстановлена максимальная сезонная аккумуляция – 2829 мм в.э. для ледника Привес и 2490 мм для Мальборо. Таким образом (см. табл. 1–2), 2018/19 год превзошёл по многоснежности предыдущие годы наблюдений на леднике Привес (на 47 и 9%), но на леднике Мальборо экстремум всё же создан не был: хотя по сравнению с 2001/02 г. приход вещества здесь был также больше на 37%, и он, хотя и ненамного – на 8%, даже уступил 2002/03 г. Вместе с тем по итогам всего 2018/19 балансового года состояние обоих ледников следует однозначно признать наилучшим за три года натурных наблюдений. Это проявилось хотя бы в том, что в середине августа почти вся их поверхность всё ещё была покрыта сезонным снегом. лёд в нижних частях обоих ледников стал только-только обнажаться из-

**Таблица 2.** Изменение площадей (км<sup>2</sup>, в ортогональной проекции) малых ледников плато Путорана

Годы	Ледник Привес		Ледник Мальборо	
1973	0.160		0.150	
2003	0.148		0.136	
2016	0.083		0.082	
2019	0.100		0.089	
1973–2019		–0.060 (–37%)		–0.061 (–41%)
2016–2019		+0.013 (+20%)		+0.007 (+9%)

под него. Показатели FBR по состоянию на 12 августа составляли 93% у ледника Привес и 97% у ледника Мальборо. Исключительность ситуации особенно наглядно иллюстрируется сопоставлением фотографий ледников и снежника, сделанных примерно в одни и те же календарные сроки 2002 и 2019 гг. (рис. 5). Очевидно, что немалую роль в подобной аномалии сыграла и повышенная снежность предшествующей зимы, и беспрецедентно низкая абляция летом 2019 г. (см. рис. 4; табл. 1).

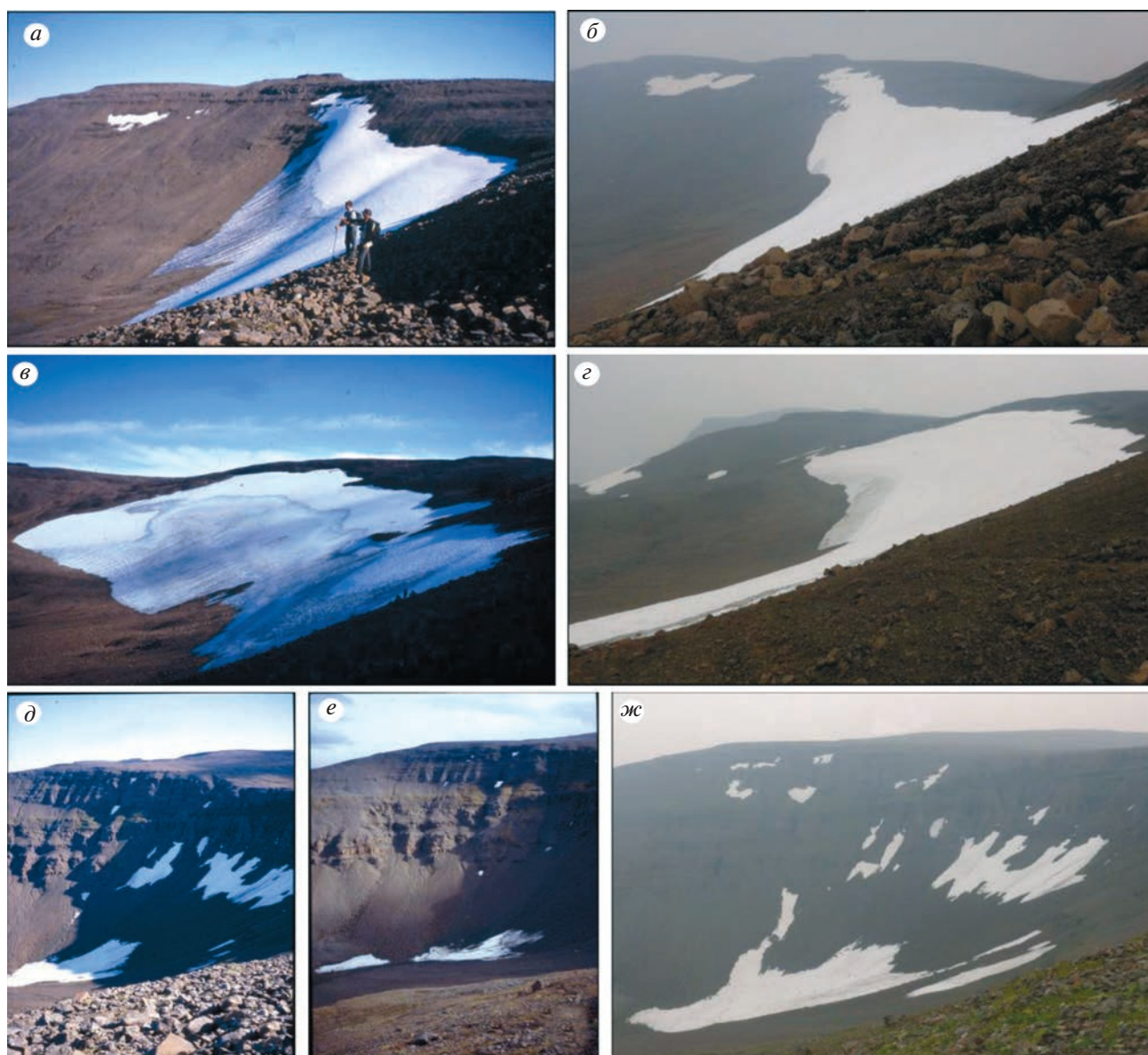
Современные эволюционные тенденции должны проявиться и в размерах ледниковых тел. Нельзя констатировать, что малые формы оледенения на плато быстро сокращаются по площади (Коваленко и др., 2021). Если бы это было так, то за многолетний отрезок времени ситуация была бы схожа с ледником МГУ на Урале, который полностью исчез к 2019 г. (Носенко и др., 2020). Здесь же контуры малых форм год от года могут то несколько сжаться, то несколько расширяться в отдельных своих секторах, но у обоих изучаемых ледников потери площади с 1973 по 2019 г. (см. табл. 2) примерно одинаковы (по 0.060 км<sup>2</sup>), хотя в процентном отношении убыль площади ледника Мальборо несколько выше – 41 против 37%. Иными словами, ледник Привес, изначально превосходящий по размерам своего соседа, сокращается более медленными темпами.

В данном исследовании мы также проанализировали изменения конфигурации и размеров многолетнего снежника Струдомс (см. рис. 5, *д–ж*), в результате чего выяснили что его контуры оказались гораздо менее стабильны по сравнению с ледниками. Балансовая специфика каждого года приводит к кардинальным переменам в его контуре, очертания снежника полностью теряют свои свойства подобия в плане, а его площадь варьирует кратно. Более того, не выдерживается и сама геометрическая целостность нивального образования: в отдельные неблагоприятные годы снежник вообще распадается на не контактирующие между собой фрагменты. Вероятно, в способности

нивального-гляциального тела сохранять относительное подобие своей конфигурации независимо от балансового состояния в каждом конкретном году можно усмотреть один из критериев разграничения таких малых снежно-ледовых образований на категории снежников и ледников. Динамичной геометрической трансформации ледников мешает наличие более мощного и монолитного ледяного ядра несмотря на то, что в условиях Средней Сибири основание даже перелетовывающих снежников сложено льдом. Холодный режим местного нивально-гляциального пояса обуславливает формирование слоя, наложенного на промёрзшее ложе снежника гидрогенного льда, выход которого на дневную поверхность зачастую прослеживается вдоль нижней и боковой кромок по периметру снежника, отступающих по мере прогрессирующего летнего таяния. Впрочем, этот слой весьма маломощен (первые дециметры) и не в состоянии создать того запаса устойчивости к метеорологическим возмущениям, который в какой-то степени помогает ледникам поддерживать свои контуры в относительной стабильности.

Флуктуации границ ледников Привес и Мальборо (рис. 6; см. табл. 2) тем не менее выявляют картину хоть и медленной, но всё же господствующей дегляциации. Правда, они могут быть вызваны не только колебаниями климатических условий год от года, но и погрешностями дешифрирования. В целом же, несмотря на очевидное уменьшение ледников в размерах с 1973 г., их очертания за последние 17 лет изменились незначительно (см. рис. 6) (Коваленко и др., 2021). Особенно благоприятным для них оказался заключительный отрезок времени с 2016 по 2019 г. За этот период оба ледника даже стали крупнее приблизительно на 10%.

Впервые проанализировав тенденции изменений климатических параметров в данном исследовании, мы можем констатировать, что графики температуры и суммы осадков, полученные по данным ERA-5 и м/с Норильск, обладают подобием (см. рис. 4). На графике суммы осадков для сезона аккумуляции наблюдается локальный пик значений данной величины для сезона 2019 г., что повлияло на рост положительной составляющей баланса массы исследуемых ледников. Тем не менее в сезон 2002/03 г. максимальная сезонная аккумуляция на ледниках Привес и Мальборо была сопоставима со значениями 2018/19 балансового года, несмотря на меньшие показатели суммы осадков за сезон аккумуляции. Повышенный приход вещества в сезон 2002/03 г. происходил на фоне относительно более низких температур в ординарных условиях поступления осадков и, вероятно, благоприятных направлениях ветров, способствующих метелевому переносу.



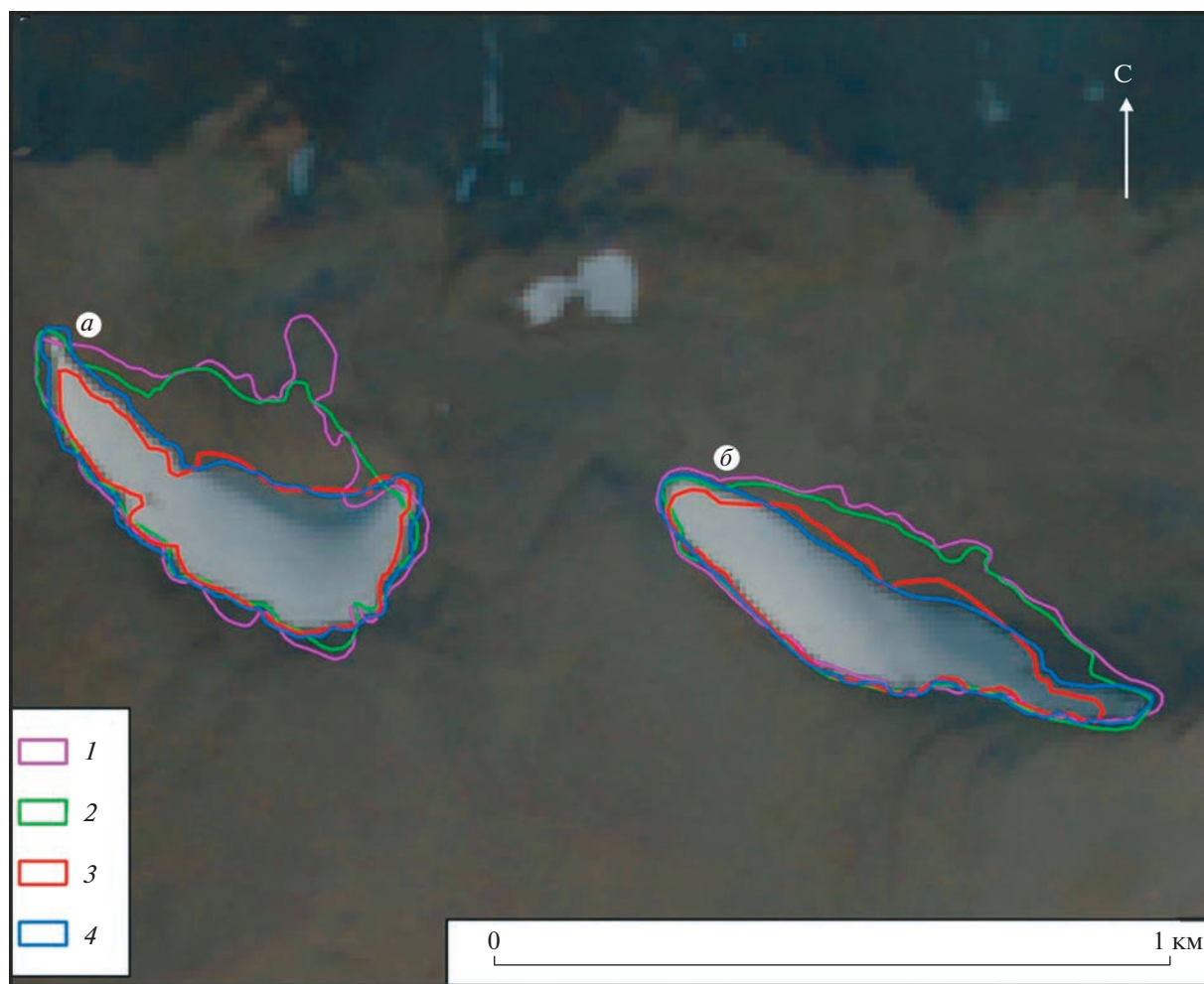
**Рис. 5.** Изменение ледника Привес (№ 30): *a* – 2002 г.; *б* – 2019 г. Изменение ледника Мальборо (№ 31): *в* – 2002 г.; *г* – 2019 г. Изменение многолетнего снежника Струдомс: *д* – 2002 г.; *е* – 2003 г.; *ж* – 2019 г.

**Fig. 5.** Prives Glacier (No. 30) change: *a* – in 2002; *b* – in 2019. Marlborough Glacier (No. 31) change: *v* – in 2002; *z* – in 2019. Strudoms perennial snow patch change: *d* – in 2002; *e* – in 2003; *zh* – in 2019.

Интересен также тот факт, что упомянутая выше положительная балансовая аномалия 2019 г. была сформирована на фоне отмечавшихся среднемесячных температур как сезона аккумуляции, так и сезона абляции, близких к максимальным значениям за двадцатилетний период.

Разрастание ледников в этом балансовом году, согласующееся с проведёнными снегомерными съёмками и с визуальным фиксируемым крайне низким положением снеговой границы на заключительной фазе периода таяния, произошло во многом вследствие очень низкой абляции на фоне зимней аккумуляции, не сильно превышаю-

щей среднемноголетние нормы суммы осадков по данным м/с Норильск (см. рис. 4, *a–б*). Главной причиной резкого уменьшения абляции 2019 г. видится высокая степень задымлённости атмосферы на севере Красноярского края из-за лесных пожаров окрестных таёжных массивов (см. рис. 4, *в*). Степень ослабления прозрачности атмосферы была столь высокой, что смотреть на солнечный диск невооружённым глазом нельзя было лишь в течение 1–2 дней за весь экспедиционный сезон. Этот феномен наглядно виден и на фотографиях 2019 г. (см. рис. 5, *a–б*). Именно усиливающаяся в последние годы интенсивность



**Рис. 6.** Смещение границ малых ледников (подложка – снимок Sentinel-2 от 21.08.2019) – ледник Привес (а), ледник Мальборо (б): 1 – 1973 г.; 2 – 2003 г.; 3 – 2016 г.; 4 – 2019 г.

**Fig. 6.** Contour displacement of reference small glaciers (Sentinel 2 satellite image of 21.08.2019 as a background) – Prives Glacier (a), Marlborough Glacier (b): 1 – 1973; 2 – 2003; 3 – 2016; 4 – 2019.

лесных пожаров на севере Сибири и сопредельных территориях, а также откровенная кульминация этих неблагоприятных явлений в 2019 г., отмечались в многочисленных научных сообщениях последних лет (Бондур и др., 2020; Воронова и др., 2020). По спутниковым данным и данным ренализа доказана значимость площадей природных пожаров в Сибири с перестройками региональной атмосферно-циркуляционной системы. Логична и выявленная значимая связь площадей горения с интенсивностью эмиссии в воздушную среду продуктов сгорания биомассы, ключевой вклад в которую принадлежит углеродсодержащим газовым компонентам типа CO и CO<sub>2</sub>. Существенное ослабление потока прямой солнечной радиации почти постоянно висящей дымкой объясняет ослабление расходного компонента баланса массы и, следовательно, некоторое улучшение балансовых условий оледенения Путора-

ны в 2019 г. Разумеется, известную усугубляющую роль сыграл и отмеченный выше повышенный вклад в аккумуляцию 2018/19 г. зимних осадков, в том числе и за счёт большего дефляционного переноса снега в кары и на подветренные склоны ниже бровок структурных уступов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малые ледники плато Путорана обнаруживают относительную устойчивость на современном этапе, несмотря на явный рост среднегодовой температуры и уменьшение среднегодового количества осадков в данном регионе: гораздо большую значимость приобретают сезонные тенденции метеодетерминантов. В период исследований зафиксирован рост количества зимних осадков и определённое иссушение летом при том, что летние сезоны в целом становятся про-

хладнее. В связи с этим ледники получают больше питания и теряют меньше массы в период абляции. Кроме того, сохранности ледников благоприятствует и наличие многолетнемерзлых пород на ложе.

Расчёт ряда масс-балансовых параметров малых ледников Путораны за 2001/02, 2002/03 и 2018/19 гг. показал, что на фоне общей тенденции к деградации ледников возможны значительные положительные отклонения от сформированной линии тренда. Несколько неожиданно благоприятное их состояние в 2019 г., проявляющееся в приросте их площадей, доли площади фирнового бассейна и увеличенного водозапаса фирнового остатка, диссонирует с выдвигавшемся ранее заключением о стойких тенденциях к дегляциации плато Путорана. Не исключено, что выгодная балансовая ситуация связана с уменьшением абляции, вызванным снижением интенсивности инсоляционного потока радиации вследствие редких по своей масштабности лесных пожаров в Сибири.

Своеобразие реакции на глобальное изменение гляциосферы именно в районах малого оледенения, подобных плато Путорана, выдвигает рекомендации к учреждению регулярного водно-и теплобалансового мониторинга хотя бы на одном местном репрезентативном объекте. Думается, что комплекс натуральных и дистанционных наблюдений за эволюцией ледовых ресурсов плато Путорана представит не только сугубо научно-теоретический интерес, но и окажет пользу экологическому мониторингу Норильского промышленного района.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственной темы 121051100164-0 “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии”.

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of the state budget theme 121051100164-0 “The cryosphere evolution under climate change and anthropogenic impact”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А.* Космический мониторинг Сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденций 20-летних изменений // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106. <https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>
- Воронова О.С., Зима А.Л., Кладова В.Л., Черепанова Е.В.* Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 г. // Исследования Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82. <https://doi.org/10.31857/S0205961420010121>
- Гляциологический словарь / Ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
- Голубев Г.Н.* Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 247 с.
- Каталог ледников СССР / Корякин В.С. Плато Путорана. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. Ч. 6. Л.: ГИМИЗ, 1981. 46 с.
- Коваленко Н.В., Поповнин В.В.* Современное состояние малых форм оледенения на северном уступе Ламских гор (плато Путорана) // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 214–219.
- Коваленко Н.В.* Режим и эволюция малых форм оледенения: М.: МАКС Пресс, 2011. 240 с.
- Ледники Актру. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 117 с.
- Ледник Джанкуат. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 184 с.
- Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Сеницкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А.* Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // Лёд и Снег. 2020. № 60 (1). С. 42–57. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010022>
- Сарана В.А.* Современное состояние ледников плато Путорана // МГИ. 2004. Вып. 96. С. 137–142.
- Сарана В.А.* Ледники плато Путорана // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 19–29.
- Тушинский Г.К., Малиновская Н.М.* Положение уровня 365 над территорией СССР и связь этого уровня с оледенением // Информ. сб. о работах по ММГ. М.: Изд-во МГУ, 1962. № 9. С. 19–23.
- Benedict J.B.* Lichen mortality due to late-lying snow: results of a transplant study // Arctic and Alpine research. 1990. V. 22. № 1. P. 81–89.
- Dyrgerov M.B., Meier M.F.* Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes // Arctic and Alpine Research. 1997. V. 29. Is. 4. P. 392–402.
- Glacier mass balance bulletin, 2002–2003. Zürich, IUGG (CCS)–UNEP–UNESCO Publ., VIII. 2005. 100 p.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A. et al.* The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
- Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T.* An overview of MODIS Land data processing and product status // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. № 1–2. P. 3–15.
- Kirsanov A., Rozinkina I., Rivin G., Zakharchenko D., Olchev A.* Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia. Atmosphere. 2020. V. 11. № 10. P. 1133.
- Kovalenko N.V., Popovnin V.V., Uspenskaya E.I., Gubanov A.S.* Actual conditions of the arctic small glaciers (on the example of the Putorana plateau) // Intern. Conf. “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Pt. 2. Participants’ reports in English. Beijing, PRC. 2021. P. 129–136.
- Meier M.F.* Contribution of small glaciers to global sea level. Science. 1984. V. 226. P. 1418–1421.
- Popovnin V.V., Naruse R.A.* 34-year-long record of mass balance and geometric changes of the Djankuat Glacier, Caucasus. Bull. of Glaciological Research. Tokyo. 2005. V. 22. P. 113–125.

Copernicus Publications // Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078.htm> (Дата обращения 06.02.2023)

Copernicus Publications // Электронный ресурс. URL: [http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078\\_2.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078_2.htm) (Дата обращения 06.02.2023)

**Citation: Kovalenko N.V., Popovnin V.V., Gubanov A.S., Polyhov A.A., Uspenskaya Ye.I. Small glaciers of the Putorana Plateau under climatic changes. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 332–346 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030043**

## Small Glaciers of the Putorana Plateau under Climate Change

N. V. Kovalenko<sup>a,#</sup>, V. V. Popovnin<sup>a</sup>, A. S. Gubanov<sup>a</sup>, A. A. Polyhov<sup>a</sup>, and Ye. I. Uspenskaya<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: kovalko\_n@mail.ru*

Received November 14, 2022; revised May 24, 2023; accepted June 27, 2023

The characteristic feature of the Putorana Plateau is that the glaciological objects here are mostly represented by small glaciers and perennial snow patches. Their regime and morphology have so much common features that separation of these two categories of nival glacial formations from one another is extremely difficult problem. The distinctions between results of earlier studies carried out in the 1970s (the USSR Glacier Inventory estimated local resources at 22 glaciers with a total area of 2.5 km<sup>2</sup>) and at the beginning of the current century (in 2005, V.A. Sarana identified 61 glaciers with a total area of 7 km<sup>2</sup>) are too large to make any reliable conclusions about the current trends of the Putoran glaciation. In such conditions, the materials of rare field monitoring work performed on individual nival-glacial bodies become very valuable. Three expedition seasons of 2002–2004 included thorough geodetic and mass-balance measurements on 3 reference objects on the northern ledge of Lama Mts. – Prives (No. 30) Glacier, Marlborough (No. 31) Glacier and Strudoms snow patch. Similar field monitoring was repeated in summer 2019. The change in their configuration according to digital photography data, including the results of the analysis of satellite images, make possible to reveal that interannual fluctuations in the area of each glacier occur due to different vector displacements of its different sections along their entire perimeters. In 2019, the somewhat unexpected good budget state of all 3 monitored objects was detected. It manifested itself in growth of their areas and increased fraction of firn basin as well as in larger water equivalent of the firn residue as this followed from results of snow surveys. This fact contradicts the previous conclusion about the steady trend of deglaciation on the Putorana Plateau. The favourable condition for small glaciers occurred here in 2019 was mainly caused by reduced ablation owing to the weakened insolation that resulted from tremendous forest fires in Siberia, remarkable by their abnormal intensity in this year.

**Keywords:** glacier, snow patch, Putorana Plateau, fluctuations, monitoring, ablation, accumulation, mass balance

### REFERENCES

- Bondur V.G., Voronova O.S., Mokhov I.I., Sitnov S.A.* Satellite monitoring of Siberian wildfires and their effects: features of 2019 anomalies and trends of 20-year changes. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk*. Reports of the Russian Academy of Sciences. 2020. 492 (1): 99–106. <https://doi.org/10.31857/S2686739720050047> [In Russian].
- Voronova O.S., Zima A.L., Kladova V.L., Cherepanova E.V.* Anomalous wildfires in Siberia in summer 2019. *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa*. Earth explorations from space. 2020, 1: 70–82. <https://doi.org/10.31857/S0205961420010121> [In Russian].
- Glyaciologicheskiy slovar*. Glossary of glaciology. Ed. V.M. Kotlyakov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
- Golubev G.N.* *Gidrologiya lednikov*. Hydrology of glaciers. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1976: 247 p. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 16. Is. 1. Pt. 6. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 46 p. [In Russian].
- Kovalenko N.V., Popovnin V.V.* The current state of small forms of glaciation on the northern ledge of the Lamsky Mountains (Putorana plateau). *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 214–219 [In Russian].
- Kovalenko N.V.* *Rezhim i evolyutsiya malyykh form oledeniya*. Mode and evolution of small glacier bodies. Moscow: MAKS press, 2010: 240 p. [In Russian].
- Ledniki Aktru*. Aktru Glaciers. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 117 p. [In Russian].

- Lednik Dzhankuat*. Djankuat Glacier. Leningrad: Hydro-meteoizdat, 1978: 184 p. [In Russian].
- Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Ivanov M.N., Sinitsky A.I., Kobelev V.O., Nikitin S.A.* Response of the Polar Urals glaciers to the modern climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 42–57. <https://doi.org/10.31857/S2076673420010022> [In Russian].
- Sarana V.A.* The current state of the glaciers of the Putorana plateau. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2004, 96: 137–142 [In Russian].
- Sarana V.A.* Glaciers of the Putorana plateau. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 19–29 [In Russian].
- Tushinskiy G.K., Malinovskaya M.N.* The position of level 365 over the territory of the USSR and the connection of this level with glaciation. Information collection on the works of MMG. Moscow: Moscow University Press. 1962, 9: 19–23 [In Russian].
- Benedict J.B.* Lichen mortality due to late-lying snow: results of a transplant study. *Arctic and Alpine research*. 1990, 22 (1): 81–89.
- Dyurgerov M.B., Meier M.F.* Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes. *Arctic and Alpine Research*. 1997, 29 (4): 392–402.
- Glacier mass balance bulletin, 2002–2003. Zurich, IUGG (CCS)—UNEP—UNESCO Publ. 2005, VIII: 100 p.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A. et al.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, 146 (730): 1999–2049.
- Justice C.O., Townshend J.R.G., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T.* An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*. 2002, 83 (1–2): 3–15.
- Kirsanov A., Rozinkina I., Rivin G., Zakharchenko D., Olchev A.* Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia. *Atmosphere*. 2020, 11 (10): 1133.
- Kovalenko N.V., Popovnin V.V., Uspenskaya E.I., Gubanov A.S.* Actual conditions of the arctic small glaciers (on the example of the Putorana plateau). International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 2 Participants’ reports in English. Beijing. PRC 2021: 129–136.
- Meier M.F.* Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*. 1984, 226: 1418–1421.
- Popovnin V.V., Naruse R.A.* 34-year-long record of mass balance and geometric changes of the Djankuat Glacier, Caucasus. *Bull. of Glaciological Research*. Tokyo. 2005, 22: 113–125.
- Copernicus Publications. Retrieved from: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078.htm> (Last access 06 February 2023).
- Copernicus Publications. Retrieved from: [http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078\\_2.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/23078_2.htm) (Last access 06 February 2023).