

## УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ ВНЕШНЕГО МАССООБМЕНА ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ

© 2025 г. А. М. Чеховских\*, В. В. Поповнин, А. С. Губанов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: chehovskiy.medved@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.04.2025 г.

После доработки 17.06.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

Выявлены пространственные закономерности распределения баланса массы и его компонентов на леднике Джанкуат. На примере пятилетнего интервала 2019/20–2023/24 гг. количественно оценены подобие полей и устойчивость их внутренней структуры во времени при допущении о неизменности ледникового рельефа.

**Ключевые слова:** ледник, Кавказ, аккумуляция, абляция, баланс массы, структура поля, пространственно-временная изменчивость, межгодовая устойчивость

DOI: 10.7868/S2412376525030029

### ВВЕДЕНИЕ

Ключевыми показателями массообмена ледников и эволюции наземного оледенения являются баланс массы и его компоненты – аккумуляция и абляция. Исследование распределения этих величин по поверхности горного ледника имеет научную значимость в контексте изучения пространственно-временной устойчивости их полей, а с прикладных позиций существенно облегчает косвенную экстра/интерполяцию измеренных значений на недоступные участки для точного определения вещественного баланса. Применительно к гляциологическим полям устойчивость заключается в постоянстве взаиморасположения абсолютных и нормированных экстремумов балансовых параметров, а также относительной стабильности нормированных значений в одних и тех же точках пространства в разные годы.

Схожее межгодовое распределение величин компонентов баланса массы проявляется из-за доминирующего влияния рельефа ледника и медленного изменения его характеристик (высота, крутизна, экспозиция, кривизна) во времени. Аккумуляция и абляция зависят от множества факторов и процессов, которые ежегодно создают неповторимую картину распределения

максимальных и минимальных значений балансовых величин. Несмотря на единый набор факторов, межгодовые различия полей компонентов баланса массы решающим образом зависят от изменчивости внешних процессов: метелевого и лавинного перераспределения, обвального-осыпных процессов, летних снегопадов и др. Вышеперечисленные динамические процессы приводят не только к ежегодному колебанию локальных величин снегозапасов и таяния, но и к смещению ареалов повышенных и пониженных величин от года к году.

Основоположник работ по исследованию полей массообмена отдельных горных ледников и оценке их устойчивости – А.Н. Кренке (Гросвальд и др., 1973). На леднике Марух (Западный Кавказ) по данным многолетних наблюдений для каждой точки ледника был рассчитан коэффициент вариации набора нормированных (по общеледниковому для данного года) значений. В результате расчётов сделан вывод о большей устойчивости поля аккумуляции в фирновой области, чем на языке ледника, а также о меньшей изменчивости поля абляции относительно поля аккумуляции. Последующие отечественные наблюдения подтвердили актуальность проблемы устойчивости внутренней структуры полей внешнего массообмена (см., например,

Меншутин, 1977; Волошина, 1981; Ледник ..., 1988; Кунахович, 1989).

Исследования устойчивости балансовых полей проводились и на кавказском леднике Джанкуат, где наиболее изученным полем внешнего массообмена является поле аккумуляции (Поповнин, 2000; Петраков, 2000; Пастухов, 2011; Чеховских, 2021). Методика оценки устойчивости полей ледника Джанкуат, разработанная В.В. Поповниным (1989), основана на функциональной связи балансовой величины в точке снегосъёмки с общеледниковым и зональным (по учрежденной системе высотно-морфологических зон (ВМЗ)) значением.

Исследования зарубежных авторов, посвящённые пространственной устойчивости полей снегонакопления и таяния на горных ледниках, встречаются значительно реже (Wamsley, 2015). Фокус многих работ сконцентрирован на оценке влияния характеристик рельефа, метелевого переноса и солнечной радиации на межгодовую изменчивость локальных значений компонентов баланса массы без анализа изменений внутренней структуры их полей во времени (Hodgkins et al., 2006; Dadic et al., 2010; McGrath et al., 2015; Florentine et al., 2018).

Изучение пространственно-временной изменчивости полей по архивам картографических материалов, накопленных в ходе многолетних масс-балансовых измерений, актуально и в настоящее время. Одним из аспектов практического применения результатов является определение местоположения участков поля с минимальной вариацией нормированных значений для вспомогательных косвенных расчётов при экстраполяции прямых измерений на 100% территории ледника. Классификация полей по снежности зим и радиационным особенностям периодов абляции позволит определить особенности внутренней структуры полей внутри каждой группы лет, облегчит процедуру расчётов и увеличит точность оценок. Кроме того, использование полей внешнего массообмена в качестве входных параметров масс-балансового блока современных гляциологических моделей и теория устойчивости этих полей во времени явно повысят качество прогноза эволюции ледников, поскольку недоучёт факта быстрых изменений в их морфологии, нарушающих полученные ранее закономерности, может привести к неверным итогам моделирования (Florentine et al., 2018).

Наблюдаемое сокращение оледенения происходит на фоне климатических колебаний,

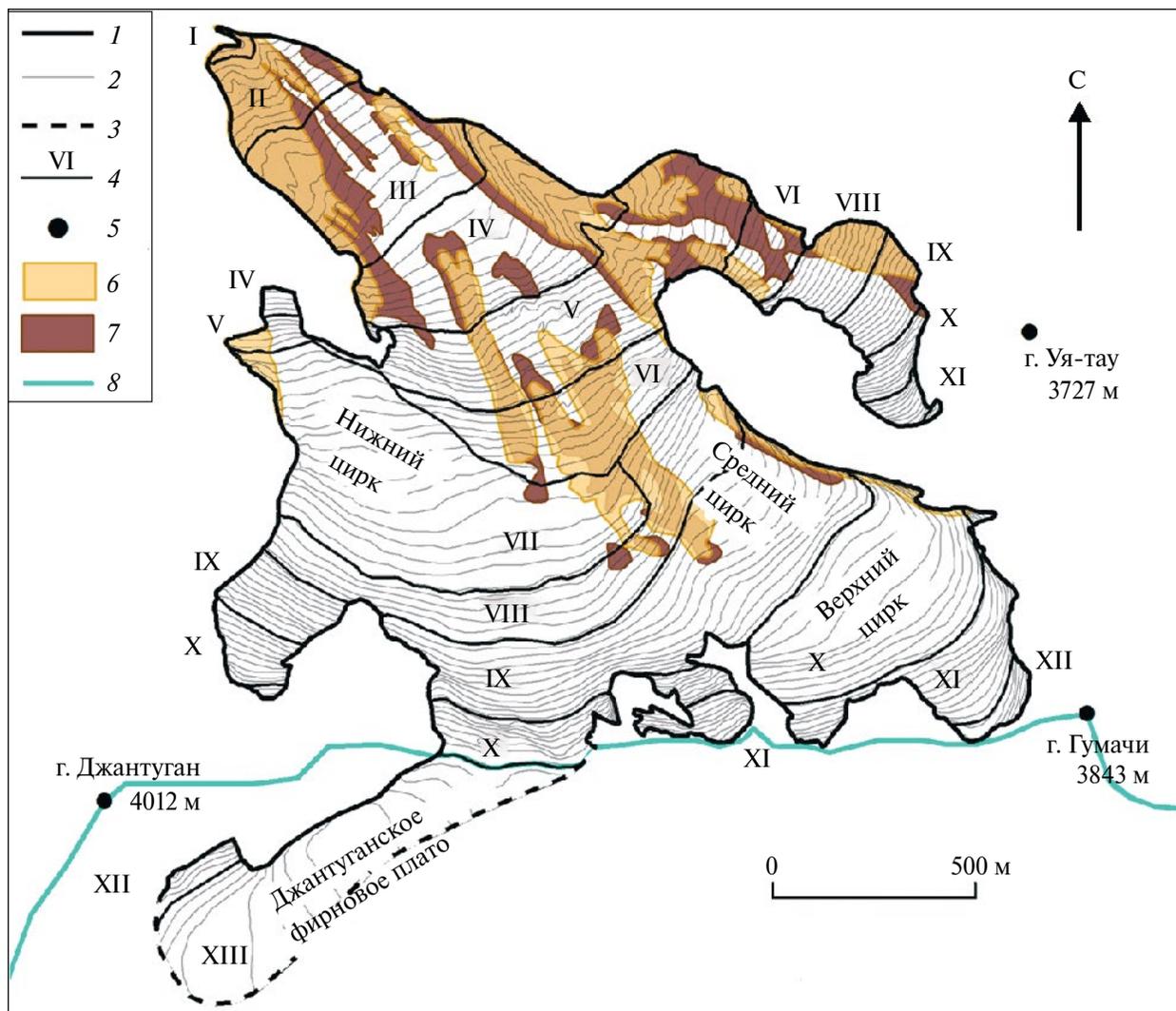
приводящих к значительным переменам облика ледников и изменению величин приходной и расходной частей баланса массы. Изменение морфометрии ледника сопровождается сменой условий аккумуляции и абляции и отражается на очертаниях полей масс-балансовых характеристик. В ходе полевых наблюдений на леднике Джанкуат и для последующего построения полей компонентов баланса массы используются топографические карты ледника, которые обновляются с периодичностью 4–10 лет. В балансовые расчёты вводится допущение о стационарности рельефа ледника между съёмками и временном отсутствии влияния изменений рельефа на устойчивость полей. В работе проведён пространственно-временной анализ распределения величин аккумуляции, абляции и баланса массы и оценена устойчивость полей внешнего массообмена ледника Джанкуат в 2019/20–2023/24 гг.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ

Ледник Джанкуат находится в Кабардино-Балкарской Республике в верховьях долины Адыл-су на северном макросклоне центрального сектора Главного Кавказского хребта в интервале абсолютных высот 2740–3670 м. Он относится к типу долинных ледников и объединяет ледовые потоки из верхнего и нижнего цирков, со склонов горы Уя-тау и с Джантуганского фирнового плато (рис. 1). Результаты непрерывных с 1967 г. масс-балансовых наблюдений свидетельствуют о прогрессирующей деградации ледника и отрицательном кумулятивном балансе массы (WGMS, 2023).

Общая черта 2019/20–2023/24 балансовых лет, как и всех прочих после 2004/05 г., – отсутствие положительных значений вещественного баланса ледника Джанкуат (табл. 1). Величины аккумуляции и абляции ежегодно превышали многолетнее значение (с 1967/68 г.), что отражает господствующие тренды за весь период мониторинга. Балансовые годы значительно отличались друг от друга по условиям снегонакопления, продолжительности периода абляции и интенсивности таяния.

Сезон 2019/20 г. характеризовался резко отрицательным балансом массы ледника. Положительная аномалия летней температуры воздуха и нехарактерно длительный период таяния с мая по октябрь значительно превысили эффект мягкой и многоснежной зимы (+21% к многолетней



**Рис. 1.** Схема ледника Джанкуат по топооснове 2018 г.: 1 – граница ледника; 2 – горизонтали (через 10 м); 3 – ледораздел; 4 – границы высотно-морфологических зон (ВМЗ) и их нумерация (I–XIII); 5 – вершины и их абсолютная высота, м; 6 – чехол поверхностной морены в 2018 г.; 7 – приращение площади поверхностной морены за 2018–2022 гг.; 8 – Главный Кавказский хребет

**Fig. 1.** Djankuat Glacier, status 2018: 1 – glacier boundary; 2 – 10 m isohypses; 3 – ice divide; 4 – numeration, I–XIII, of the alti-morphological zones and their boundaries; 5 – summits and their elevation, m a.s.l.; 6 – debris cover in 2018; 7 – debris cover areal increment in 2018–2022; 8 – Main Caucasus Ridge

**Таблица 1.** Значения аккумуляции, абляции и баланса массы ледника Джанкуат в 2019/20–2023/24 гг.

Балансовый год	Аккумуляция, мм вод. экв.	Абляция, мм вод. экв.	Баланс массы, мм вод. экв.
2019/20 г.	2990	–4360	–1370
2020/21 г.	3290	–3460	–170
2021/22 г.	2960	–3550	–590
2022/23 г.	3040	–3110	–70
2023/24 г.	3070	–3660	–590
Среднее с 1967/68 г.	2530	–2866	–335

норме), в результате чего был установлен абсолютный рекорд абляции за все годы мониторинга с 1967/68 г. (Popovnin et al., 2024).

Особенность 2020/21 г. – интенсивный сход снежных лавин в весенний период и раннее окончание балансового года (23.09.2021). Этот сезон стал третьим по многоснежности с начала наблюдений на леднике Джанкуат. Тем не менее из-за интенсивного таяния в мае–июне абляция ледника была заметно выше среднемноголетней и превысила аккумуляцию на 170 мм вод. экв.

В 2021/22 г. величина аккумуляции была близка к среднемноголетней норме, а абляция превысила её на четверть. Зима была относительно мягкая и тёплая, весеннее межсезонье продолжалось дольше обычного, из-за чего водоотдача из снежного покрова началась лишь к концу первой декады июня.

Баланс массы в 2022/23 г. был наиболее близок к положительному; этот год был самым благоприятным для ледника за весь пятилетний период. В условиях пониженного фоновое снегонакопления отложения лавинного снега сохранялись в течение всего сезона абляции даже на языке. Абляция в 2022/23 г. была наименьшей за 5 лет и максимально приближалась к среднемноголетней величине. 2023/24 год по балансовым показателям был близок к медианному значению последних 15 лет. Распределение величин максимального водозапаса соответствовало многолетнему, а сезон абляции отличался положительной аномалией температуры воздуха в сентябре.

Таким образом, рассматриваемые годы довольно сильно различаются между собой: рекордный по абляции 2019/20 г., относительно благоприятные 2020/21 и 2022/23 гг., когда величина баланса массы максимально приближалась к положительным значениям, и “средние” 2021/22 и 2023/24 годы.

### МЕТОДИКА МАСС-БАЛАНСОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

За весь 57-летний период мониторинговых работ на леднике Джанкуат методика измерений принципиально не менялась, отличаясь детальностью и комплексностью (Popovnin et al., 2024). Параллельное использование в ледниковом бассейне гляциологических, геодезических и гидрометеорологических методов расчёта массоэнергообмена ледника предоставляет возможность критического анализа результатов и корректного

вычисления показателей эволюции опорного ледника Центрального Кавказа (Rets et al., 2019). Необходимость получения достоверных данных о геометрии ледника на разные временные срезы требовала периодического обновления его топоосновы. За период наблюдений с 1967 по 2024 г. создано девять детальных топооснов масштаба 1:10 000 с охватом площади всего ледника. С 2019/20 балансового года для всех балансовых расчётов применяется топооснова 2018 г., построенная по стереопарам космических снимков Pleiades и SPOT-6.

Расчёт баланса массы  $b_n$  на леднике Джанкуат традиционно следует стратиграфической системе STR, исходя из алгебраической суммы зимнего  $b_w$  и летнего  $b_s$  балансов. Измерения аккумуляции включают площадную снегомерную съёмку (ручное зондирование или георадарное профилирование) и плотномерные работы в шурфах. В период 2019–2024 гг. количество пунктов снегомерной съёмки варьировало в пределах 318–429 точек, плотность снежного покрова измерялась в II, IV (область абляции), VII, X (область аккумуляции) областях высотно-морфологической зоне (далее – ВМЗ). Абляцию измеряли по 40–55 рейкам, что превышает рекомендуемую густоту реек 10–20 км<sup>-2</sup> для высшего класса наблюдений (Hoinkes, 1964). Для получения истинных значений в расчёт аккумуляции и абляции вводилась серия поправок на декремент абляции (внутреннее питание), обтаивание стенок трещин, подморенное таяние (Popovnin et al., 2024). Ошибка определения сезонной абляции в точке не превышает 1% (Дюргеров, 1986), точность измерения аккумуляции в пункте зондирования составляет 2.5 см снега, или ≈12.5 мм вод.экв. (Пастухов, 2011).

### МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЕЙ ВНЕШНЕГО МАССООБМЕНА

Маршрутные снегосъёмки и сеть абляционных реек не покрывают всю площадь ледника из-за недоступности и опасности некоторых участков. Их суммарная доля не превышает 8–10% общей площади ледника. Для распространения на них значений максимальных водозапасов ранее был разработан и до сих пор применяется физико-географический подход, основанный на картографировании подъёма сезонной снеговой линии в течение периода абляции (Поповнин, 1989). Экстраполяция абляционных данных на недоступные участки производится методами

факторного анализа по рекомендации М.Б. Дюргера (Ледник ..., 1978).

Несмотря на то что схема размещения шурфов, абляционных реек и (в меньшей степени) снегомерных пунктов по возможности наследуется из года в год, она лишена ежегодной жёсткой привязки к местности. Для построения полей и получения континуальных поверхностей используется сетка со стороной квадрата 50×50 м на местности, ориентированная по осям географических координат и покрывающая 100% площади ледника. Для получения значений балансовых параметров в узлах сетки применяются описанные выше методы интерполяции/экстраполяции значений из пунктов измерения водозапаса и таяния. Далее выполняется визуализация пространственного распределения аккумуляции, абляции и баланса массы с применением программы ESRI ArcMap Desktop 10.6, в которой методом Kriging (Spatial Analyst Tools – Interpolation – Kriging) интерполируются значения между узлами регулярной сетки. На заключительном этапе построенная карта корректируется вручную с учётом многолетних закономерностей распределения балансовых величин, так как автоматическое проведение изолиний программными инструментами не всегда верно отражает особенности локального распределения величин вблизи моренных валов, ледопадов и других форм мезорельефа поверхности ледника. Построение поля баланса массы производится взаимным наложением полей обоих его компонентов.

Впервые картографирование полей аккумуляции ледника Джанкуат выполнено в 1976 г., а с 1987/88 г. в практику масс-балансовых расчётов внедрено использование регулярной сетки для систематизации полевых измерений (Поповнин, 1989). В 1988 г. ледник покрывали 1246 узлов, тогда как на топооснове 2018 г. насчитывается только 925 узлов, что вызвано сокращением площади ледника.

Анализ подобия и оценка устойчивости полей за 2019–2024 гг. выполнены по значениям аккумуляции, абляции и баланса массы в узлах сетки.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЕЙ 2019–2024 ГГ.

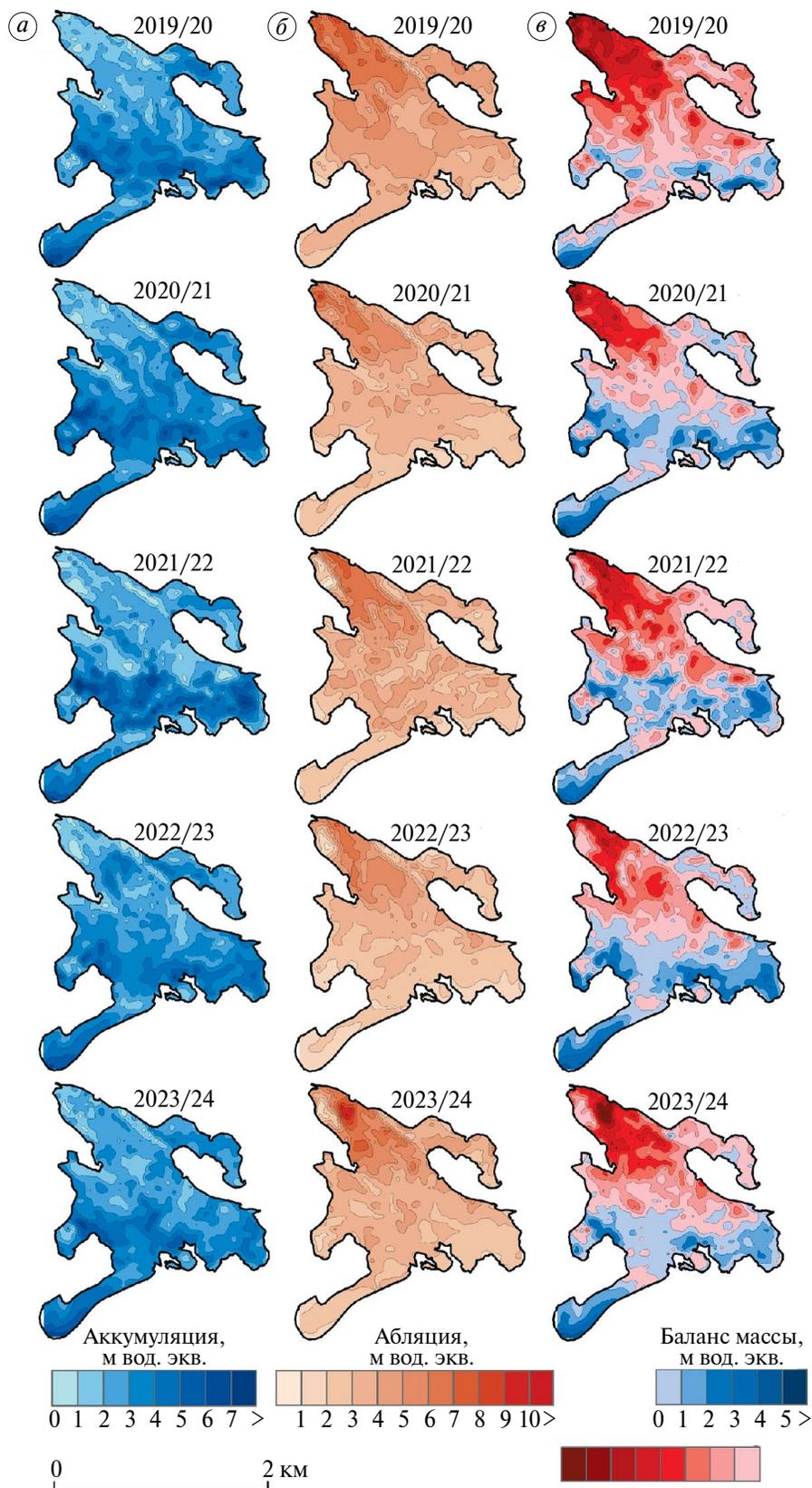
Визуальный анализ масс-балансовых полей ледника Джанкуат обнаруживает черты их подобия и выявляет некоторые закономерности пространственного распределения исследуемых параметров (рис. 2). Очевидно, что главный фактор

изменения величин максимального водозапаса и суммарного таяния — абсолютная высота местности: с ростом высоты наблюдается увеличение значений аккумуляции и уменьшение значений абляции.

**Поле аккумуляции** ледника Джанкуат характеризуется повышенным водозапасом у подножья крутого скального обрамления ледника (вершины Уя-тау, Джантуган, Гумачи, пик Деберля, скалы Аристовы), в тыловых частях и на днищах верхнего и нижнего цирков, где накапливаются значительные объёмы лавинного снега (см. рис. 2, а). Джантуганское плато (XIII ВМЗ), расположенное к югу от Главного Кавказского хребта и соединяющееся с основным телом ледника через ледопад, отличается крайне высокими значениями аккумуляции (в среднем за 2019–2024 гг. около 4050 мм вод. экв., за 57 лет — порядка 3900 мм вод. экв. при максимуме 5610 мм вод экв. в 2017/18 г.).

Пониженные водозпасы присущи участкам ледника над уступами скального ложа и ригелями, проявляющимися в рельефе ледника как зоны трещин и ледопады. К ним относятся участок между Джантуганским плато и остальной частью ледника, область разломов между верхним и средним цирками, ниже среднего цирка, между нижним цирком и языком ледника. Постоянный дефицит снеготранспорта отмечен в левой части языка, занятого поверхностной мореной, в краевой части ледника в низовьях нижнего цирка, на срединной морене между ледовым потоком из-под горы Уя-тау и языком ледника. Причина этого — интенсивная дефляция свежевыпавшего снега с положительных форм рельефа и нечётких бровок на переходе от пологих поверхностей к крутопадающим участкам.

**Поле абляции** имеет меньшие пространственные градиенты таяния по сравнению с полем аккумуляции (см. рис. 2, б). После высоты второй по значимости фактор интенсивности абляции — толщина поверхностной морены, распространённой вплоть до IX ВМЗ ледника. Моренный покров имеет двойное влияние на абляцию: при толщине слоя морены менее 7–9 см величина подморенного таяния превышает абляцию чистого льда, при дальнейшем увеличении толщины морены происходит уменьшение таяния до его полного прекращения (Bozhinskiy et al., 1986; Verhaegen et al., 2024). Эффект усиления либо ослабления абляции в зависимости от мощности моренного чехла накладывается на закономерность уменьшения абляции с высотой и нарушает её, приводя к существенной



**Рис. 2.** Поля аккумуляции (а), абляции (б) и баланса массы (в) ледника Джанкуат с 2019/20 по 2023/24 г.  
**Fig. 2.** Accumulation (a), ablation (b) and mass balance (c) fields of the Djankuat Glacier in 2019/20–2023/24

дифференциации поля абляции по темпам убыли вещества. Так, в 2023/24 г. в III ВМЗ максимальные значения абляции чистого льда достигали 10 000 мм вод. экв., тогда как в области распространения мощной поверхностной морены не превышали 4000 мм вод. экв.

Малые величины абляции (менее 1000 мм вод. экв.) отмечены вдоль срединной морены, в левой части языка ледника и на затенённой фирново-ледяной облицовке, имеющей преимущественно северную экспозицию и крутизну поверхности более 30°. В очертаниях поля абляции визуально распознаются моренные гребни, тянущиеся несколькими параллельными полосами от IX до IV ВМЗ (см. рис. 1) и образованные мощными скальными обвалами с Главного Кавказского хребта в 2000-х годах. Мореносъёмка, проведённая в августе 2022 г., показала существенное увеличение площади (+16% за 2018–2022 гг.) и средней толщины (с 54 до 60 см за 2010–2022 гг.) морены.

Структура *полей баланса массы* ледника Джанкуат сочетает обоюдные тенденции подобия полей аккумуляции и абляции: постепенный переход от отрицательных к положительным значениям баланса массы с увеличением высоты, особо положительный баланс в зонах лавинного снегонакопления и максимальную потерю льда на фронте ледника (см. рис. 2, в).

Исследуемые поля баланса массы в части потока со склона горы Уя-тау характеризуются преимущественно отрицательными значениями и их малой вариацией. В этой части ледника влияние лавинной аккумуляции отражается только на подножии склона, тогда как подавляющая площадь склона относится к зоне транзита снежных лавин, где пониженные в итоге снегозапасы усугубляются интенсивной абляцией снега в течение поздней весны и первой половины лета. Вследствие господствующих из года в год отрицательных значений баланса на этом склоне логично ожидать здесь в ближайшие сезоны кардинального сокращения площади оледенелых участков вплоть до полного их стаивания либо до отчленения от основного тела ледника Джанкуат. В основании же склона круглогодичное поступление коллювия с лавинами и обвальными процессами приводит к интенсивному разрастанию по площади и мощности чехла поверхностной морены и, как следствие, к ослаблению убыли вещества и консервации глетчерного льда под литогенным покровом. В результате гипсометрическое превышение низовьев ледниковой ветви с горы Уя-тау над остальной

частью языка Джанкуата достигает 50 м и продолжает увеличиваться.

Второй участок, обладающий особым распределением и ежегодными ледниковыми максимумами баланса массы, — дивергентное Джантуганское фирновое плато между Джанкуатом и Лекзыром, крупнейшим ледником Грузии на южном макросклоне Кавказа. К ледосбору Джанкуата относится его северо-западный сектор (XIII ВМЗ), примыкающий к крутым юго-восточным склонам горы Джантуган. Поступление массы в эту зону, помимо снегопадов, происходит за счёт небольших по объёму и частых снежных лавин. Особым фактором увеличенной здесь аккумуляции и, соответственно, баланса массы являются метели, для которых гребень Главного Кавказского хребта на участке гора Башкара — гора Джантуган — служит орографическим барьером. Он способствует как концентрации снега после адвекций воздушных масс с юга, так и созданию эффекта шлейфа повышенной снежности благодаря подветренному положению на пути ветров северо-западных румбов. При этом значения баланса массы увеличиваются по направлению от подножия горы Джантуган к ледоразделу Джанкуат–Лекзыр. Структура поля баланса массы XIII ВМЗ в большей степени определяется рисунком изолиний аккумуляции, чем абляции.

Поле баланса массы, наименее благоприятного для ледника 2019/20 г., отличается аномальным превышением абляции над аккумуляцией почти на 82% площади ледника ( $AAR = 0.18$ ) и самым высоким положением границы питания с 2006/07 г. ( $ELA = 3470$  м). Помимо плато, участки положительного баланса лишь спорадически сосредоточены под лавиноопасными склонами. 2021/22 и 2023/24 годы характеризуются одинаковыми значениями баланса,  $ELA$  и  $AAR$ . Тем не менее в расположении локальных экстремумов баланса разных лет отмечаются значительные различия, для выявления которых, собственно, и строятся поля внешнего массообмена.

**Типы подобия.** Впервые детальные исследования временного подобия масс-балансовых параметров были проведены М.Б. Дюргеровым (Дюргеров, 1993). Критерий подобия применялся им относительно устойчивости во времени балансовых кривых, т.е. графиков распределения величин баланса по высоте. Концепция подобия исходит из предположения о функциональной связи максимальных водозапасов или суммарной абляции на любом гипсометрическом уровне со среднемноголетним значением на той же высоте. М.Б. Дюргеровым введены понятия

мультипликативного и аддитивного подобия. Если распределение балансового параметра отвечает гауссовому (нормальному), то любой тип подобия будет основан на линейной зависимости вида

$$Y = kx + b,$$

где для любого высотного уровня переменная  $Y$  – искомое для данного года значение параметра, а  $x$  – его фоновое (среднепогодное) значение. При  $k = 1$  подобие классифицируется как аддитивное, при  $b = 0$  – как мультипликативное. Тогда при использовании аддитивного закона подобие поля оценивается по величине колебаний свободного члена  $b$ , при мультипликативном законе – по вариации регрессионного коэффициента  $k$ . Идеально подобной балансовая кривая определённого года будет в случае постоянства на всех её уровнях коэффициента  $k$  (для мультипликативного типа) или  $b$  (для аддитивного).

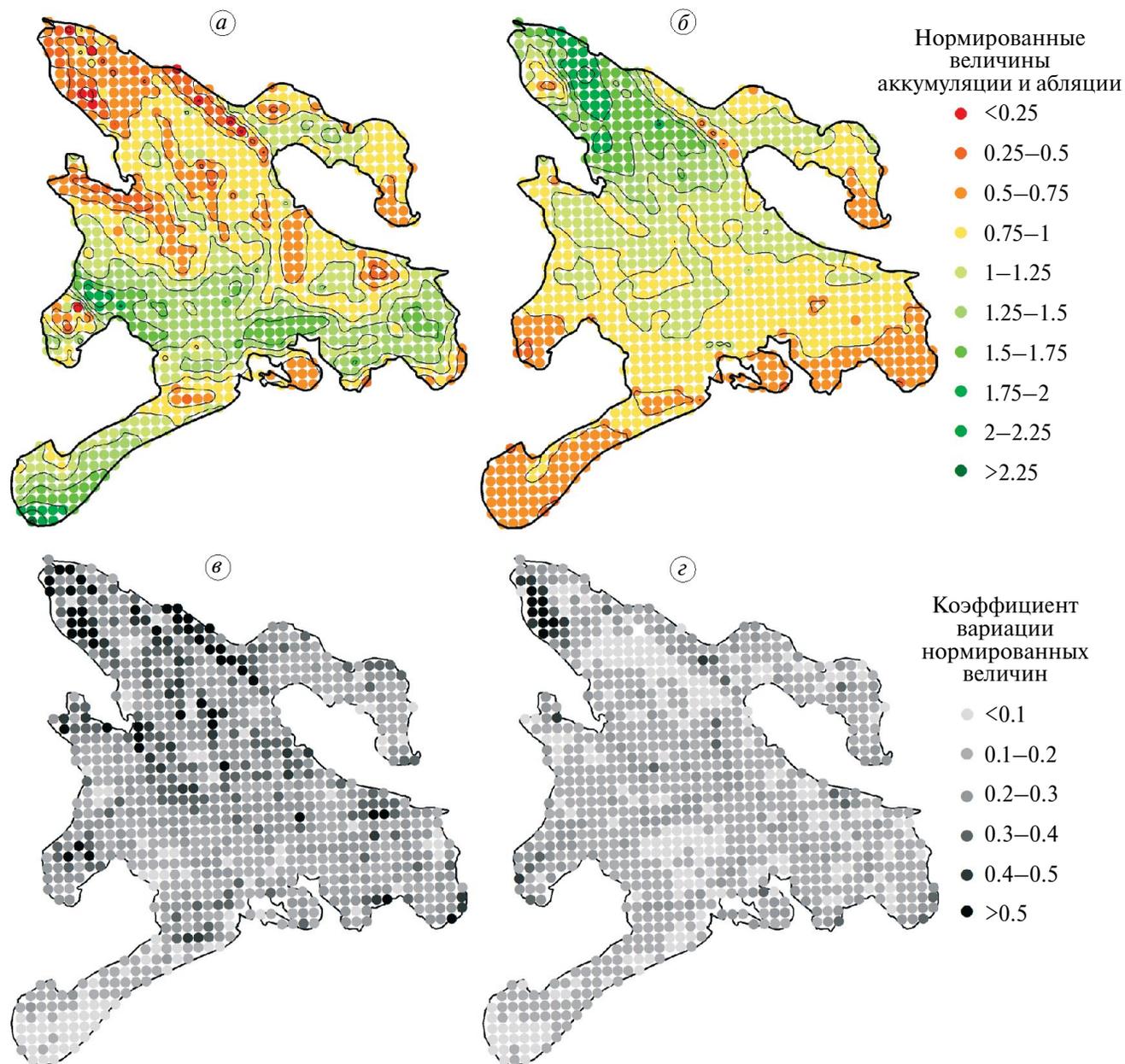
Аналогичный подход применим к анализу подобия не только балансовых кривых, но и полей внешнего массообмена горных ледников. Определение ведущего типа подобия, по мнению М.Б. Дюргерова (1993), основано на закономерностях формирования летнего, зимнего и годового балансов массы. Идеальные условия для проявления аддитивного подобия полей находятся на ледниках с полным отсутствием летних снегопадов и равной продолжительностью периода аккумуляции во всех частях ледника. Мультипликативное подобие наилучшим образом проявляется в случае одновременного формирования зимнего, летнего и годового балансов ледника в течение сезона абляции и выпадения значительной части годовых осадков в жидкой фазе на языке и в твёрдой – в области питания. Теоретически “невысокие ледники гор умеренного пояса” характеризуются аддитивным подобием (Кунахович, 1991), однако исследование ведущего типа подобия поля аккумуляции ледника Джанкуат за период 1977–1997 гг. показало преимущество мультипликативного закона при расчёте ледниковой величины водозапаса (Петраков, 2000). В связи с этим в работе устойчивость поля аккумуляции Джанкуата рассматривается с позиции мультипликативного типа подобия.

**Мультипликативность подобия полей аккумуляции и абляции на леднике Джанкуат.** Исследование устойчивости любого поля базируется на расчёте вариации показателей внешнего массообмена в узлах учреждённой сетки квадратов.

Для узлов рассчитаны нормированные коэффициенты аккумуляции и абляции, равные отношению узлового значения к среднеледниковой величине данного года, после чего для каждого из них вычисляется соответствующий коэффициент вариации ( $C_v$ ) за 5 лет. Эта процедура не может быть произведена относительно результирующего параметра баланса массы в силу требований к такой нормировке только для величин одного знака. Если набор значений нормированной аккумуляции или абляции в каждом узле позволяет выявить локальные аномалии параметра относительно фоновой общеледниковой величины в данном году, то вариации их нормированных величин количественно характеризуют их временную устойчивость. Такой подход к анализу подобия полей аккумуляции и абляции по сути дела и соответствует концепции мультипликативности.

Площадное распределение осреднённых за 2019/20–2023/24 гг. нормированных величин аккумуляции и абляции и их коэффициентов вариации для каждого узла сетки квадратов представлено на рис. 3.

Поле нормированной аккумуляции (см. рис. 3, а) характеризуется значительными пространственными градиентами даже между смежными узлами. Кроме того, зачастую это приводит к соседству узлов даже с качественно разными ( $<1$  и  $>1$ ) аномалиями снегонакопления, т.е. могут соседствовать узлы, скажем, с нормированной аккумуляцией  $>2$  и  $<0.25$ , что, в частности, отмечается на склоне горы Джантуган над нижним цирком. В этом вскрывается влияние факторов перераспределения вещества на локальную величину водозапаса. Моренные гряды – причина пониженных снегозапасов только в центральном сегменте среднего течения ледника (IV–VI ВМЗ). Ближе к фронту ледника, где преобладание линейных форм моренного мезорельефа уступает формированию сплошного холмисто-западного моренного чехла, рельеф поверхностной морены постепенно перестаёт оказывать влияние на величину аккумуляции, из-за чего величины аккумуляции на ледовой и заморененной поверхностях различаются слабо. Поле нормированной абляции (см. рис. 3, б) в большей степени отражает высотную зависимость величин таяния по сравнению с полем нормированной аккумуляции. Нарушение этой закономерности ярче всего проявляется разве что в области распространения поверхностной морены и на ледяной облицовке фирнового бассейна.



**Рис. 3.** Распределение средних за 2019–2024 гг. значений, нормированных аккумуляции (а) и абляции (б), а также соответствующих коэффициентов их вариации во времени (в, г) по узлам регулярной сетки

**Fig. 3.** Gridded pattern of normalized accumulation (а) and ablation (б) values, averaged over 2019/20–2023/24, and correspondent coefficients of their temporal variation (в, г)

Что же касается коэффициентов вариации нормированных показателей, то для поля аккумуляции (см. рис. 3, в) единственная крупная устойчивая часть – Джантуганское плато. Для поля абляции (см. рис. 3, г) отмечены три устойчивые области: правая половина языка ледника (III–V ВМЗ), центр VIII–IX ВМЗ и основная часть Джантуганского плато. Среднеледниковый коэффициент вариации нормированной аккумуляции

составляет 0.24 с диапазоном значений 0.02–1.68, а для нормированной абляции – 0.16 и 0.02–0.86 соответственно. Для обоих полей произведено районирование ледника по узловым значениям коэффициентов вариации, после чего по топооснове 2018 г. определены участки с разной степенью изменчивости этих полей (табл. 2). Подавляющая площадь ледника (78% для поля аккумуляции и 96% для поля абляции) характеризуется

**Таблица 2.** Доли участков с различной вариацией нормированных величин аккумуляции и абляции (% площади ледника)

Доли участков	Коэффициент вариации					
	<0.1	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.4	0.4–0.5	>0.5
Поля аккумуляции, %	10	38	30	14	3	5
Поля абляции, %	22	58	16	2	1	1

сравнительно небольшими значениями  $C_v < 0.3$ . Таким образом, абляция оказывается более устойчивой во времени по сравнению с приходным компонентом баланса массы, т.е. подобие для неё выражено сильнее, чем для аккумуляции.

**Скоррелированность балансовых параметров в точке с зональными и общеледниковыми значениями.** Устойчивость полей компонентов баланса массы может быть основана и на анализе тесноты связи аккумуляции, абляции и баланса массы в произвольной точке со всем ледником или его частью, соответствующей ВМЗ. Мерой тесноты связи “точка–ледник” выступает коэффициент ледниковой корреляции  $r_1 = r\{E_{ai}; E_i\}$ , где  $E_{ai}$  – значение балансового показателя в точке  $a$  в  $i$ -ый год,  $E_i$  – ледниковое значение того же показателя в тот же год. Теснота связи точечных значений с морфометрически схожим участком ледника (“точка–зона”) описывается коэффициентом зональной корреляции  $r_2 = r\{E_{ai}; E_{ji}\}$ , связывающим значение в узле сетки  $a$  с соответствующей ВМЗ ( $j$ ) как оптимальной таксономической единицей дробной части ледника.

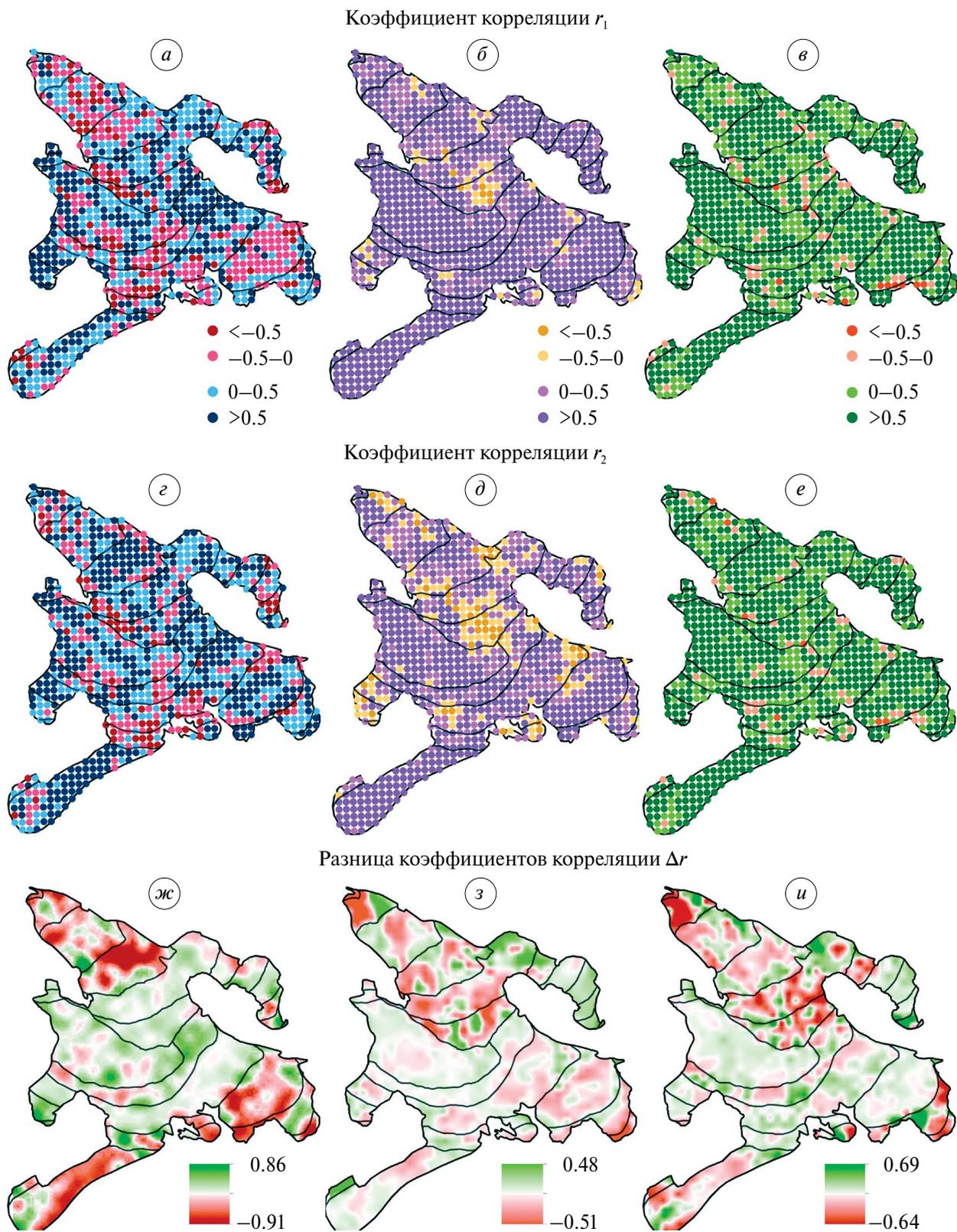
Разница модулей величин  $r_1$  и  $r_2$  ( $\Delta r = |r_1| - |r_2|$ ) определяет те участки ледника, где свойства подобия поля выражены лучше на ледниковом либо зональном уровне. В случае  $|r_1| > |r_2|$  (т.е.  $\Delta r > 0$ ) устойчивость в большей степени проявляется относительно общеледникового поля, если  $|r_1| < |r_2|$  (т.е.  $\Delta r < 0$ ) – относительно зонального. Также существуют узлы, где  $r_1$  и  $r_2$  принимают близкие, но противоположные по знаку величины. В этих пунктах изменение балансового параметра в равной мере соотносится с изменением зонального и ледникового полей, но характеризуются зависимостями разного знака. На рис. 4 показано распределение значений  $r_1$ ,  $r_2$  и  $\Delta r$  применительно к полям аккумуляции, абляции и баланса массы за период 2019–2024 гг. Более насыщенный красный цвет (см. рис. 4, *ж–и*) присущ участкам ледника, на которых корреляция значений параметра с зональными величинами выше, нежели с общеледниковыми; более

насыщенный зелёный цвет – участки с противоположным соотношением.

Среднее по модулю значение  $r_1$  для всех узлов поля аккумуляции составляет 0.45, поля абляции – 0.67, поля баланса массы – 0.62. Аналогичные значения  $r_2$  полей аккумуляции, абляции и баланса массы равны 0.51, 0.69 и 0.65 соответственно. Из сопоставления этих значений следует, что большей степенью пространственной устойчивости обладает поле абляции. Поле аккумуляции имеет наибольший размах узловых значений  $\Delta r$  ( $-0.91 \leq \Delta r \leq 0.86$ ), тогда как для поля абляции  $\Delta r$  изменяется от  $-0.51$  до  $0.48$ , а для поля баланса массы – в интервале  $-0.64$ – $0.69$ .

В табл. 3 показаны значения коэффициентов линейной корреляции точечных значений с соответствующими зональными и общеледниковыми, осреднённые внутри каждой ВМЗ. Как правило,  $\Delta r$  принимает отрицательные значения для подавляющего числа ВМЗ. Данная закономерность демонстрирует, что за редким исключением на большей части ледника Джанкуат свойства подобия показателей внешнего массообмена оказываются выше, если в качестве таксономической единицы берётся ВМЗ, а не весь ледник: почти всегда  $r_1 < r_2$  (т.е.  $\Delta r < 0$ ). Такой вывод логичен и вполне ожидаем, поскольку система ВМЗ была изначально (Ледник ..., 1978) учреждена на леднике Джанкуат именно как набор относительно однородных по своей морфологии участков, в которых предполагалось единство условий снегонакопления и таяния.

**Внутренняя структура полей показателей внешнего массообмена.** Наиболее устойчивая связь с общеледниковой величиной аккумуляции отмечена у точек в VIII и IX ВМЗ, в пределах которых в последние годы чаще всего залегает граница питания. Наоборот, наименее устойчива аналогичная связь с узлами сетки I и II ВМЗ, где изменение мезорельефа ледника особенно динамично в силу прогрессирующего с каждым годом вытаивания моренного материала. При этом продолжающееся накопление литогенного материала в виде преимущественно линейных форм



**Рис. 4.** Распределение значений  $r_1$ ,  $r_2$  и  $\Delta r$  (пояснения в тексте) для полей аккумуляции (*a*, *г*, *ж*), абляции (*б*, *д*, *з*) и баланса массы (*в*, *е*, *и*)

**Fig. 4.** Gridded and spatial patterns of  $r_1$ ,  $r_2$  and  $\Delta r$  (see explanation in the text) for accumulation (*a*, *г*, *ж*), ablation (*б*, *д*, *з*) and mass balance (*в*, *е*, *и*) fields

**Таблица 3.** Среднезональные и среднеледниковые значения  $r_1$ ,  $r_2$  и  $\Delta r$  полей аккумуляции, абляции и баланса массы ледника Джанкуат

ВМЗ	Аккумуляция			Абляция			Баланс массы		
	$r_1$	$r_2$	$\Delta r$	$r_1$	$r_2$	$\Delta r$	$r_1$	$r_2$	$\Delta r$
I	0.23	0.58	-0.35	0.62	0.86	-0.24	0.54	0.85	-0.31
II	0.32	0.49	-0.17	0.59	0.64	-0.05	0.48	0.64	-0.16
III	0.38	0.46	-0.08	0.61	0.64	-0.03	0.58	0.62	-0.04
IV	0.37	0.61	-0.24	0.60	0.63	-0.03	0.63	0.65	-0.02
V	0.48	0.48	0.00	0.58	0.61	-0.04	0.57	0.61	-0.04
VI	0.48	0.49	-0.01	0.54	0.57	-0.03	0.50	0.58	-0.08
VII	0.48	0.47	0.01	0.79	0.80	-0.01	0.70	0.70	0.00
VIII	0.50	0.48	0.02	0.67	0.68	-0.01	0.57	0.59	-0.02
IX	0.51	0.51	0.00	0.64	0.66	-0.02	0.62	0.62	0.00
X	0.39	0.47	-0.08	0.70	0.72	-0.02	0.67	0.67	0.00
XI	0.40	0.52	-0.12	0.59	0.62	-0.03	0.58	0.57	0.01
XII	0.46	0.58	-0.12	0.54	0.52	0.02	0.58	0.68	-0.10
XIII	0.45	0.62	-0.17	0.89	0.92	-0.03	0.75	0.80	-0.05
Ледник	0.45	0.51	-0.06	0.67	0.69	-0.02	0.62	0.65	-0.03

(валов, вытянутых вдоль направления течения ледника) приводит к усиливающейся со временем геоморфологической дифференциации на участках скопления поверхностной морены. Такой рост гипсометрических контрастов между гребнями морен и ложбинами неизбежно вызывает гравитационное перераспределение материала, что запускает механизм трансформации линейных форм в рельеф холмисто-западинного типа. В результате участки с положительными или отрицательными аномалиями мощности чехла способны динамично превращаться в свою противоположность. Этот процесс Eyles and Rogerson (1978) называют топографическими инверсиями моренного мезорельефа. Подобное качественное чередование морфометрических элементов на одном и том же участке ледника, разумеется, в минимальной степени способствует устойчивости полей балансовых характеристик.

Что же касается связи значений аккумуляции в узлах с зональными величинами, то она слабее выдержана в III, VII и X ВМЗ, а сильнее в IV и XIII ВМЗ. Роль индикатора единообразия полей играет величина  $r_2$ . Различия между величинами  $r_1$  и  $r_2$  увеличиваются по мере отдаления от средних зон ледника и достигают максимума в I и XIII ВМЗ, что вызвано неодинаковым

соотношением между факторами снегонакопления в разных высотных интервалах (Петраков, Поповнин, 2000).

По распределению узловых значений  $r_1$  и  $r_2$  обнаружены крупные участки поля аккумуляции, обладающие наибольшей устойчивостью относительно ледниковых и зональных величин. Для  $r_1$  такие области находятся в левой части ледника на ледовом потоке из-под горы Джантуган и в правой части VI–VIII ВМЗ ниже среднего цирка. Ареалы с высокими значениями  $r_2$ , кроме перечисленных выше, находятся в IV и XIII ВМЗ, а также на выположенной части верхнего цирка (X ВМЗ).

Поле *абляции* и поле *баланса массы* характеризуются меньшей изменчивостью по сравнению с полем аккумуляции и большими величинами  $r_1$  и  $r_2$ . Наибольшая стабильность полей отмечается в одних и тех же зонах: теснота связи точечных значений с общеледниковыми, судя по показателю  $r_1$ , максимальна в VII и XIII ВМЗ, а теснота связи с зональными значениями (через  $r_2$ ) – в I, VII, XIII ВМЗ. Отсюда следует, что высокая степень подобия поля баланса массы в перечисленных зонах достигается в первую очередь за счёт устойчивости поля абляции. Распределение  $r_1$  и  $r_2$  для абляции и баланса массы указывает на то, что на их полях участки с повышенной

устойчивостью прослеживаются в пределах гораздо более обширных полигонов, чем на полях аккумуляции.

Распределение значений  $\Delta r$  у полей абляции и баланса массы схоже, причём лишь в I–II ВМЗ величины  $r_1$  и  $r_2$  различаются больше, чем на 0.10. Кроме этого, на полях абляции и баланса массы обнаружены зоны, в которых фактически отсутствуют различия между  $r_1$  и  $r_2$ . Для поля абляции участки с равной степенью тесноты связи локальных величин как с зональными, так и ледниковыми полями отмечены в VII и VIII ВМЗ, а для баланса массы – в VII, IX и X ВМЗ (за исключением ветви из-под горы Уя-тау).

**Подобие полей во времени.** Устойчивость полей внешнего массообмена может быть оценена на основе построения корреляционной матрицы их годовых реализаций, что позволяет анализировать межгодовое подобие полей как цельных объектов. Критерий устойчивости данной связи – коэффициент парной корреляции, который может иметь вид  $r_3 = r\{E_i; E_k\}$ , где  $E_i$  и  $E_k$  – массы значений балансовых параметров по всем узлам регулярной сети в годы  $i$  и  $k$ , или  $r_4 = r\{E_i; E_0\}$ , где  $E_0$  представляет собой осреднённый за весь период наблюдений шаблон поля. Тем самым  $r_3$  отражает искажённость поля в данном сезоне относительно любого другого произвольного балансового года, а  $r_4$  – относительно фоновой (среднепогодной) картины распределения балансовой величины по леднику.

Величины  $r_3$  и  $r_4$  выражают временную устойчивость поля и по своему смыслу – не картографируемые показатели. Они рассчитываются по единым массивам из 925 узловых значений и отражают степень близости внутренней структуры пары балансовых полей.

Установлено, что уровень корреляции единичного годового и среднепогодного поля выше корреляции между отдельными годами, т.е.  $r_3 < r_4$  (табл. 4–6). Этот вывод применим и для расчёта корреляции с полями, осреднёнными не только за 2019–2024 гг., но и за весь период картографирования с 1987/88 г. Осреднённое за любой временной интервал поле обычно сохраняет дислокацию наблюдаемых ежегодно аномалий параметра в пределах ледниковых границ. Подобие годового поля относительно среднепогодного 2019/20–2023/24 гг. наилучшим образом проявляется для параметра баланса массы: среднее значение  $r_4$  поля баланса массы составляет 0.93, тогда как у поля аккумуляции оно равно 0.87, а у поля абляции – 0.89.

Более низкие величины корреляции между парами годовых полей ( $r_3$ ) по сравнению с корреляциями относительно среднепогодного шаблона ( $r_4$ ) в первую очередь вызваны значительной вариацией метеопараметров соответствующих сезонов. Другими причинами неустойчивости связей между произвольно взятой парой лет являются факторы перераспределения вещества (метели, лавины) и механизм прогрессирующего разрастания моренного чехла, чьё влияние на величины снегонакопления и таяния в каждой точке может проявляться по-разному от года к году.

## ДИСКУССИЯ

Исследуемый период продолжает тенденцию увеличения массообмена ледника Джанкуат, что является косвенным признаком ослабления континентальности климата высокогорья Кавказа (Poroynin et al., 2024). Кроме того, аномалии бюджетных показателей в 2019–2024 гг. регистрировались чаще, чем за предшествующий период мониторинга. Ежегодные величины аккумуляции и абляции в эти годы превышали средние значения за 57 лет непрерывного мониторинга, в 2019/20 г. был обновлен рекорд ледниковой абляции, 2020/21 г. занял 3-е место по величине аккумуляции с 1967/68 г., а в 2022/23 г. модуль отрицательного баланса массы был вторым по минимуму за последние 19 лет наблюдений.

Выявленное сходство полей аккумуляции, абляции и баланса массы в 2019–2024 гг. в целом подтверждает гипотезу об их подобии во времени, качественно согласуясь с выводами предыдущих исследований (Поповнин, 1989; Петраков, 2000; Пастухов, 2011; Чеховских, 2021). Местоположение абсолютных экстремумов балансовых величин, а также зон их повышенных и пониженных значений в масштабе всего ледника в данном году, как правило, слабо меняется во времени и не зависит от абсолютных значений параметра конкретного сезона для ледника в целом.

В рамках данного исследования, как и в традиционной схеме расчёта масс-балансовых величин, рельеф ледника между сроками обновления топоосновы считается неизменным. По сравнению с факторами перераспределения снеготопосновы и изменения свойств моренного чехла именно рельеф – наиболее стабильный фактор снегонакопления и таяния, поэтому влияние фоновой снежности, чьи колебания на Кавказе детально оценивают А.Д. Олейников и Н.А. Володичева (2019), и радиационных особенностей летних

**Таблица 4.** Парные корреляции годовых полей аккумуляции ледника Джанкуат и их связь с полем, осреднённым за 2019/20–2023/24 гг. и весь период построения полей с 1987/88 г.

Годы	2019/20 г.	2020/21 г.	2021/22 г.	2022/23 г.	2023/24 г.	Среднее за 2019/20– 2023/24 гг.	Среднее с 1987/88 г.
2019/20 г.	1	0.74	0.68	0.69	0.70	0.88	0.81
2020/21 г.	0.74	1	0.67	0.68	0.70	0.87	0.78
2021/22 г.	0.68	0.67	1	0.64	0.70	0.86	0.75
2022/23 г.	0.69	0.68	0.64	1	0.70	0.85	0.77
2023/24 г.	0.70	0.70	0.70	0.70	1	0.87	0.76
Среднее за 2019/20–2023/24 гг.	0.88	0.87	0.86	0.85	0.87	1	0.89
Среднее с 1987/88 г.	0.81	0.78	0.75	0.77	0.76	0.89	1

**Таблица 5.** Парные корреляции годовых полей абляции ледника Джанкуат и их связь с полем, осреднённым за 2019/20–2023/24 гг. и весь период построения полей с 1987/88 г.

Годы	2019/20 г.	2020/21 г.	2021/22 г.	2022/23 г.	2023/24 г.	Среднее за 2019/20– 2023/24 гг.	Среднее с 1987/88 г.
2019/20 г.	1	0.82	0.67	0.76	0.71	0.89	0.87
2020/21 г.	0.82	1	0.63	0.73	0.70	0.86	0.85
2021/22 г.	0.67	0.63	1	0.80	0.79	0.88	0.71
2022/23 г.	0.76	0.73	0.80	1	0.85	0.93	0.8
2023/24 г.	0.71	0.70	0.79	0.85	1	0.91	0.79
Среднее за 2019/20–2023/24 гг.	0.89	0.86	0.88	0.93	0.91	1	0.90
Среднее с 1987/88 г.	0.87	0.85	0.71	0.8	0.79	0.90	1

**Таблица 6.** Парные корреляции годовых полей баланса массы ледника Джанкуат и их связь с полем, осреднённым за 2019/20–2023/24 гг. и весь период построения полей с 1987/88 г.

Годы	2019/20 г.	2020/21 г.	2021/22 г.	2022/23 г.	2023/24 г.	Среднее за 2019/20– 2023/24 гг.	Среднее с 1987/88 г.
2019/20 г.	1	0.89	0.78	0.82	0.82	0.93	0.91
2020/21 г.	0.89	1	0.80	0.81	0.83	0.93	0.91
2021/22 г.	0.78	0.80	1	0.81	0.85	0.91	0.84
2022/23 г.	0.82	0.81	0.81	1	0.86	0.93	0.87
2023/24 г.	0.82	0.83	0.85	0.86	1	0.94	0.88
Среднее за 2019/20–2023/24 гг.	0.93	0.93	0.91	0.93	0.94	1	0.95
Среднее с 1987/88 г.	0.91	0.91	0.84	0.87	0.88	0.95	1

сезонов (Тогоров et al., 2019) не нарушает внутреннюю структуру полей балансовых величин. Главной причиной подобия полей остаётся высотная зависимость распределения каждой величины, но степень влияния высоты на пространственное распределение балансовых величин в числе прочих факторов меняется от года к году. Абсолютная высота объясняет бóльшую долю пространственной изменчивости баланса массы и абляции, но не высокую изменчивость аккумуляции. Среднее за исследуемый период значение коэффициента детерминации  $R^2$  между абсолютной высотой узла и значением балансовой величины в нём для поля баланса массы составляет 0.57, абляции — 0.54, а аккумуляции — лишь 0.19. Несмотря на то, что влияние высоты в последнем случае относительно невелико, устойчивость поля аккумуляции во многих его секторах достигается благодаря более или менее схожести расположению лавинных конусов и зон выноса снежного материала. Даже при том, что доля лавинного питания ледника на современном этапе не очень велика ( $\leq 10\%$  в разные годы), лавинные аппараты могут покрывать более  $\frac{1}{4}$  площади отдельных ВМЗ и свыше 15% площади ледника (Поповнин, Пылаева, 2015; Поповнин, Сергиевская, 2018).

Самые серьёзные нарушения внутренней структуры поля аккумуляции происходят преимущественно на языке из-за ежегодного прироста толщины моренного покрова и расширения его границ, динамично меняющих локальный мезорельеф. Неустойчивость структуры поля абляции также отмечена на участках распространения моренного чехла, однако здесь его эффект связан с изменением локального теплового баланса поверхности и резкими перепадами интенсивности таяния на малых расстояниях.

Выраженная через коэффициенты вариации и корреляции устойчивость полей выступает в качестве объективной количественной меры их подобия. Если принимать во внимание существование двух законов подобия (мультипликативного и аддитивного), то выбор оптимального из них зависит от особенностей сезонных режимов баланса массы горного ледника. Несмотря на географическую предрасположенность Джанкуата к аддитивному типу (Кунахович, 1991), мультипликативный точнее описывает устойчивость полей компонентов баланса массы (Петраков, 2000). Поэтому в настоящей работе оценка устойчивости полей внешнего массообмена выполнена также исходя из допущения о мультипликативности с использованием пяти

показателей: вариаций нормированных величин в узлах сетки ( $C_v$ ), корреляций узловых, зональных и общеледниковых значений ( $r_1, r_2$ ), а также парной корреляции годовых реализаций поля каждой балансовой величины ( $r_3, r_4$ ). Первые три отражают пространственный аспект устойчивости полей, последними двумя исследуется их устойчивость во времени.

Из сопоставления значений  $C_v, r_1$  и  $r_2$  следует, что поле абляции обладает наивысшей устойчивостью среди показателей внешнего массообмена. На пространственное распределение абляции влияет меньшее количество факторов и процессов по сравнению с полем аккумуляции, а поле баланса массы объединяет закономерности полей обоих его компонентов. На одних участках очертания балансового поля в большей мере наследуют особенности распределения величин аккумуляции, на других — величин абляции. Распределение баланса массы приблизительно в равной степени определяется каждым из его компонентов: осреднённое значение коэффициента его корреляции  $r$  с абляцией равно 0.77, с аккумуляцией —  $-0.78$ . Почти для каждого года исследуемой пятилетки корреляция между узловыми массивами аккумуляции и абляции не выходит за пределы диапазона  $-0.22 - -0.28$ , за исключением 2021/22 г., когда она приняла значение  $r = 0.00$ . Таким образом, выявляется паритет влияния аккумуляции и абляции на подобие поля баланса массы.

В отличие от пространственной, временная устойчивость, напротив, лучше проявляется у поля баланса массы как относительно осреднённого поля (и за пентаду, и за период с 1987/88 г.), так и в межгодовом отношении. Этот результат — неожиданный на фоне преобладания пространственной устойчивости поля абляции и, вероятно, заключается в самом подходе к расчёту устойчивости. Показатели устойчивости в пространстве  $r_1$  и  $r_2$  отражают степень согласованности изменения параметра в конкретном узле сетки с изменением общеледникового или зонального значения того же параметра величины на протяжении временного отрезка. Временные же показатели  $r_3$  и  $r_4$  описывают взаимосвязь двух массивов узловых значений. Судя по их значениям, поле баланса массы обладает более устойчивой структурой, чем поля его компонентов.

На устойчивость поля первостепенное влияние оказывает выбор таксономической единицы: ледника в целом или каждой ВМЗ по отдельности. Малые среднеледниковые значения

$\Delta r$  ( $-0.02$  —  $-0.06$ ) полей аккумуляции, абляции и баланса массы не показывают наглядно, при выборе какой единицы поля устойчивость годового поля максимальна. Однако узловые значения  $r_1$  и  $r_2$  внутри каждой ВМЗ показывают почти повсеместное превышение устойчивости зонального поля над общеледниковым. Разумеется, устойчивость поля будет тем выше, чем на более дробные участки с однородным рельефом и близким набором воздействующих факторов будет разделён ледник.

## ВЫВОДЫ

Ценность картографирования полей заключается не столько в дополнении численных результатов полевых измерений графическими материалами, сколько в возможности анализа сходства в распределении балансовых величин за разные годы или относительно среднего за длительный срок.

Устойчивость исходит из гипотезы подобия полей во времени и пространстве. Её исследование основано на пяти различных критериях, каждый из которых по-своему характеризует устойчивость распределения аккумуляции, абляции и баланса массы на леднике Джанкуат. Применяемая методика была разработана ранее и до сих пор не имеет аналогов, позволяющих количественно оценивать межгодовую изменчивость полей балансовых величин. К сожалению, короткий пятилетний период анализа ограничивает статистическую значимость полученных корреляционных полей. Выявленные корреляции следует рассматривать как приблизительные и гипотезообразующие, требующие подтверждения на более длинных временных рядах. Несмотря на ограниченность выборки, полученные поля демонстрируют согласованную структуру, потенциально отражающую физические процессы. Использование статистических показателей (коэффициентов корреляции и вариации) позволило с разных сторон подойти к оценке устойчивости полей, и получить следующие результаты.

1. Среди полей внешнего массообмена ледника Джанкуат наибольшей пространственной устойчивостью обладает поле абляции, тогда как поле аккумуляции характеризуется наименьшей устойчивостью.

2. Главная причина нарушения внутренней структуры полей аккумуляции и абляции, а следовательно, и баланса массы — моренный чехол на языке ледника.

3. Категория высотно-морфологической зоны в большей мере удовлетворяет гипотезе подобия поля, чем весь ледник, хотя в некоторых ВМЗ (особенно в средней части ледника) различия в устойчивости общеледникового и зонального полей минимальны или отсутствуют. Преобладание устойчивости зонального поля возрастает по мере удаления от среднего течения ледника.

4. Корреляция между годовым и среднемноголетним полем в подавляющем числе случаев превышает тесноту связи между полями двух произвольных сезонов.

5. Временная устойчивость структуры поля баланса массы выше, чем у полей его компонентов.

Использование полученных результатов позволяет повысить точность как косвенных масс-балансовых расчётов при ограниченном количестве полевых измерений, так и прогнозов пространственного распределения величин. В данном контексте весьма важным остаётся вопрос о том, как меняется временная устойчивость поля при изменении длительности анализируемого периода и как влияет трансформация геометрии ледника на пространственную устойчивость полей. Прогнозирование распределения величин внешнего массообмена на основе оценки устойчивости полей актуально для моделирования колебания ледников и ледникового стока.

**Благодарности.** Настоящая работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-17-00133). Авторы выражают благодарность волонтерам и студентам за помощь в проведении полевых работ.

**Acknowledgments.** The study was supported by Russian Science Foundation (grant No. 22-17-00133). The authors are grateful to the volunteers and students for their assistance in the fieldwork.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волошина А.П.* Колебания внешнего массообмена ледников Полярного Урала в 1959/60–1976/77 гг. // МГИ. 1981. Вып. 41. С. 149–162.
- Гросвальд М.Г., Кренке А.Н., Виноградов О.Н., Маркин В.А., Псарева Т.В., Разумейко Н.Г., Суходровский В.Л.* Оледенение Земли Франца-Иосифа. Результаты исследований по программе МГГ. М.: Наука, 1973. 348 с.
- Дюргеров М.Б.* Расчёт баланса массы ледниковых систем // МГИ. 1986. Вып. 57. С. 8–15.
- Дюргеров М.Б.* Мониторинг баланса массы горных ледников. М.: Наука, 1993. 127 с.
- Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ) / Ред. И.Я. Боярский. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 184 с.

- Ледник Марух (Западный Кавказ) / Отв. ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 254 с.
- Кунахович М.Г. Формирование годового баланса массы ледника плоской вершины // МГИ. 1989. Вып. 67. С. 163–169.
- Кунахович М.Г. Подobie полей внешнего массообмена и расчёт баланса массы горных ледников / Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 1991. 70 с.
- Менишутин В.М. Баланс массы Марухского ледника и изменчивость его составляющих // МГИ. 1977. Вып. 31. С. 38–44.
- Олейников А.Д., Володичева Н.А. Современные тенденции изменения снеголавинного режима Центрального Кавказа (на примере Приэльбрусья) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 191–200. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-400>
- Пастухов В.Г. Полный массообмен ледника Джанкуат: дипломная работа. М.: Изд-во МГУ, 2011. 185 с.
- Петраков Д.А. Устойчивость полей внешнего массообмена горного ледника / Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2000. 218 с.
- Петраков Д.А., Поповнин В.В. Поле аккумуляции горного ледника и его устойчивость во времени // Криосфера Земли. 2000. Т. 2. № 4. С. 67–76.
- Поповнин В.В. Бюджетная эволюция репрезентативного ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) / Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1989. 305 с.
- Поповнин В.В. Поле аккумуляции горного ледника // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 16–29.
- Поповнин В.В., Сергиевская Я.Е. Об обратной связи доли лавинного питания с аккумуляцией ледника // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 437–447. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-437-447>
- Поповнин В.В., Пылаева Т.В. Лавинное питание ледника Джанкуат // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 2. С. 21–32. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-21-32>
- Чеховских А.М. Устойчивость полей аккумуляции и абляции на леднике Джанкуат: выпускная работа магистра. М.: МГУ, 2021. 84 с.
- Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V. Role of debris cover in the thermal physics of glaciers // J. Glaciology. 1986. V. 32. № 111. P. 255–266.
- Dadic R., Mott R., Lehning M., Burlando P. Wind influence on snow depth distribution and accumulation over glaciers // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2010. № 115. F01012. <https://doi.org/10.1029/2009JF001261>
- Florentine C., Harper J., Fagre D., Moore J., Peitzsch E. Local topography increasingly influences the mass balance of a retreating cirque glacier // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 2109–2122. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2109-2018>
- Eyles N., Rogerson R.J. A framework for the investigation of medial moraine formation: Austerdalsbleen, Norway, and Berendon Glacier, British Columbia, Canada // J. Glaciology. 1978. V. 20. № 82. P. 99–113.
- Hodgkins R., Cooper R., Wadham J., Tranter M. Interannual variability in the spatial distribution of winter accumulation at a high-Arctic glacier (Finsterwalderbreen, Svalbard), and its relationship with topography // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 243–248. <https://doi.org/10.3189/172756405781812718>
- Hoinkes H.C. Glacial meteorology. In: Solid Earth and Interface Phenomena // Research in Geophysics. 1964. V. 2. P. 391–424.
- McGrath D., Sass L., O'Neel S., Arendt A., Wolken G., Gummeroli A., Kienholz C., McNeil C. End-of-winter snow depth variability on glaciers in Alaska // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2015. V. 120. № 8. P. 1530–1550. <https://doi.org/10.1002/2015JF003539>
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V., Toropov P. Recent mass balance anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus // Atmosphere. 2024. V. 15. № 1. P. 107–129. <https://doi.org/10.3390/atmos15010107>
- Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A., Smirnov A.M., Tokarev I.V., Chizhova J.N., Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K., Kireeva M.B., Ekaykin A.A., Veres A.N., Aleynikov A.A., Frolova N.L., Tsyplenkov A.S., Poliukhov A.A., Chalov S.R., Aleshina M.A., Kornilova E.D. Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017 // Earth System Science Data. 2019. V. 11. № 3. P. 1463–1481. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1463-2019>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20<sup>th</sup>–21<sup>st</sup> century // International Journal of Climatology. 2019. V. 39 (12). P. 4703–4720. <https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Verhaegen Y., Rybak O., Popovnin V.V., Huybrechts P. Quantifying supraglacial debris-related melt-altering effects on the Djankuat glacier, Caucasus, Russian Federation // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2024. V. 129. № 4. e2023JF007542. <https://doi.org/10.1029/2023JF007542>
- Walmsley A.P.U. Long-term observations of snow spatial distributions at Hellstugubreen and Gråsubreen: MS Thesis. Norway, 2015. 141 p.
- WGMS (2023): Global glacier change bulletin No. 5 (2020–2021) / Ed. by M. Zemp, I. Gartner-Roer, S.U. Nussbaumer, E. Welty, I. Dussailant, J. Banwart. Zurich, Switzerland: ISC(WDS)/IUGG(I-ACS)/ UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, 2023. 134 p. <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>

Citation: *Chekhovskikh A.M., Popovnin V.V., Gubanov A.S. Structure stability of external mass turnover fields of the Djankuat Glacier. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (3): 378–396. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030029*

## Structure Stability of External Mass Turnover Fields of the Djankuat Glacier

© 2025 A. M. Chekhovskikh<sup>#</sup>, V. V. Popovnin, A. S. Gubanov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: chehovskiy.medved@yandex.ru*

Received April 17, 2025; Revised June 17, 2025; Accepted June 26, 2025

The regularity and variability of accumulation, ablation, and mass balance distribution on the Djankuat Glacier were investigated to assess the spatio-temporal stability of its external mass turnover fields. A 2019/20–2023/24 time span, characterized by varying degrees of abnormality in the annual budget parameters, was selected as a case pentad for testing. Interannual differences in snow accumulation and melting patterns affect the spatial structure of the fields – obvious shifts of maxima and minima areas are noticed, inter alia. Nevertheless, persistent structural similarities across years indicate a certain degree of temporal and spatial stability. The present analysis employs the field similarity hypothesis originally developed by V.V. Popovnin (1989), which evaluates the variability of the functional relationship between gridded balance parameters and those averaged either over corresponding alti-morphological zones or over the entire glacier. For each grid node, variation coefficients of normalized values are calculated, followed by correlation analysis between the normalized node values and the corresponding zonal and glacier-wide averages. Concerned are both year-to-year correlations and the stability of annual fields relative to the long-term average pattern. Eventually the plots with the highest and lowest stability indices are identified within the glacier area. The alti-morphological zonation is found to align more consistently with the similarity hypothesis than glacier-wide averages. Among the three studied mass-balance parameters, the ablation field demonstrates the greatest stability, whereas the accumulation field exhibits the highest variability. Correlations between annual and multi-year fields exceed those between two arbitrary years. Obtained results can be applied for indirect mass-balance plotting and calculations as well as for predicting accumulation, ablation and overall mass balance patterns.

**Keywords:** glacier, Caucasus, accumulation, ablation, mass balance, field structure, spatio-temporal variability, inter-annual consistency

### REFERENCES

- Voloshina A.P.* Variations of external mass-exchange of the Polar Urals' glaciers in 1959/60–1976/77. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1981, 41: 149–162 [In Russian].
- Groswald M.G., Krenke A.N., Vinogradov O.N., Markin V.A., Psareva T.V., Razumeyko N.G., Sukhodrovsky V.L.* *Oledenenie Zemli Frantsa-Iosifa. Rezultaty issledovaniy po programme MGG*. Franz Josef Land glaciation. Research results by IGY programme. Moscow: Nauka, 1973: 348 p. [In Russian].
- Dyurgerov M.B.* Computations of mass balance in glacier systems. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1986, 57: 8–15 [In Russian].
- Dyurgerov M.B.* *Monitoring balansy massy gornyykh lednikov. Mass balance monitoring on alpine glaciers*. Moscow: Nauka, 1993: 127 p. [In Russian].
- Lednik Dzhankuat (Tsentralnyy Kavkaz)*. Djankuat Glacier (Central Caucasus). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 184 p. [In Russian].
- Lednik Marukh (Zapadnyy Kavkaz)*. Marukh Glacier (Western Caucasus). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 254 p. [In Russian].
- Kunakhovich M.G.* Annual mass balance formation on a flat summit glacier. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1989, 67: 163–169 [In Russian].
- Kunakhovich M.G.* *Podobiye poley vneshnego massoobmena i raschot balansy massy gornyykh lednikov*. Similarity of external mass turnover fields and mass balance

- calculations of alpine glaciers. PhD thesis. Moscow: IGRAS, 1991: 70 p. [In Russian].
- Menshutin V.M.* Mass-balance of the Marukh glacier and variability of its components. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1977, 31: 38–44 [In Russian].
- Oleynikov A.D., Volodicheva N.A.* Recent trends of snow avalanche regime in the Central Caucasus (Elbrus region as an example). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (2): 191–200.  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-400> [In Russian]
- Pastukhov V.G.* *Polnyy massoobmen lednika Dzhankuat*. Full mass exchange of the Djankuat Glacier. Moscow: Moscow University Press, 2011: 185 p. [In Russian].
- Petrakov D.A.* *Ustoychivost poley vneshnego massoobmena gornogo lednika*. Stability of the fields of external mass exchange of an alpine glacier. PhD thesis. Moscow: MSU, 2000: 218 p. [In Russian].
- Petrakov D.A., Popovnin V.V.* Accumulation field of an alpine glacier and its stability over time. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2000, 2 (4): 67–76 [In Russian].
- Popovnin V.V.* *Byudzhethnaya evolyutsiya reprezentativnogo lednika Dzhankuat (Tsentralnyy Kavkaz)*. Budget evolution of the Djankuat Glacier, representative of the Central Caucasus. PhD thesis. Moscow: MSU, 1989: 305 p. [In Russian].
- Popovnin V.V.* Accumulation field of an alpine glacier. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2000, 88: 16–29 [In Russian].
- Popovnin V.V., Sergievskaya Ya.E.* On a feedback of the share of avalanche alimentation with a glacier accumulation. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (4): 437–447.  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-437-447> [In Russian].
- Popovnin V.V., Pylaeva T.V.* Avalanche feeding of the Djankuat Glacier. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (2): 21–32  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-21-32> [In Russian].
- Chekhovskikh A.M.* *Ustoychivost poley akkumulyatsii i ablyatsii na lednike Dzhankuat*. Stability of accumulation and ablation fields of the Djankuat Glacier. MS thesis. Moscow: MSU, 2021: 84 p. [In Russian].
- Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V.* Role of debris cover in the thermal physics of glaciers. *J. Glaciology*. 1986, 32 (111): 255–266.
- Dadic R., Mott R., Lehning M., Burlando P.* Wind influence on snow depth distribution and accumulation over glaciers. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2010, 115: F01012.  
<https://doi.org/10.1029/2009JF001261>
- Florentine C., Harper J., Fagre D., Moore J., Peitzsch E.* Local topography increasingly influences the mass balance of a retreating cirque glacier. *The Cryosphere*. 2018, 12: 2109–2122.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-2109-2018>
- Eyles N., Rogerson R.J.* A framework for the investigation of medial moraine formation: Austerdalsbreen, Norway, and Berendon Glacier, British Columbia, Canada. *J. Glaciology*. 1978, 20 (82): 99–113.
- Hodgkins R., Cooper R., Wadham J., Tranter M.* Interannual variability in the spatial distribution of winter accumulation at a high-Arctic glacier (Finsterwalderbreen, Svalbard), and its relationship with topography. *Annals of Glaciology*. 2005, 42: 243–248.  
<https://doi.org/10.3189/172756405781812718>
- Hoinkes H.C.* Glacial meteorology. In: *Solid Earth and Interface Phenomena*. Research in Geophysics. 1964, 2: 391–424.
- McGrath D., Sass L., O'Neel S., Arendt A., Wolken G., Gummeroli A., Kienholz C., McNeil C.* End-of-winter snow depth variability on glaciers in Alaska. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2015, 120 (8): 1530–1550.  
<https://doi.org/10.1002/2015JF003539>
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V., Toropov P.* Recent mass balance anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus. *Atmosphere*. 2024, 15 (1): 107–129.  
<https://doi.org/10.3390/atmos15010107>
- Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A., Smirnov A.M., Tokarev I.V., Chizhova J.N., Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K., Kireeva M.B., Ekaykin A.A., Veres A.N., Aleynikov A.A., Frolova N.L., Tsyplenkov A.S., Poliukhov A.A., Chalov S.R., Aleshina M.A., Kornilova E.D.* Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017. *Earth System Science Data*. 2019, 11 (3): 1463–1481.  
<https://doi.org/10.5194/essd-11-1463-2019>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20<sup>th</sup>–21<sup>st</sup> century. *International Journal of Climatology*. 2019, 39 (12): 4703–4720.  
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Verhaegen Y., Rybak O., Popovnin V.V., Huybrechts P.* Quantifying supraglacial debris-related melt-altering effects on the Djankuat glacier, Caucasus, Russian Federation. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2024, 129 (4): e2023JF007542.  
<https://doi.org/10.1029/2023JF007542>
- Walmsley A.P.U.* Long-term observations of snow spatial distributions at Hellstugubreen and Gråsubreen. MS thesis. Norway, Oslo, 2015. 141 p.
- WGMS (2023): Global glacier change bulletin No. 5 (2020–2021). Zurich, Switzerland: ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, 2023: 134 p.  
<https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>