

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЫСОКОГОРНОЙ ЗОНЫ ЭЛЬБРУСА В ПЕРИОД АККУМУЛЯЦИИ

© 2024 г. Е. Д. Дроздов^{*1,2}, П. А. Торопов^{1,2}, В. К. Авилон³, А. Ю. Артамонов⁴,
А. А. Полухов^{2,5}, И. В. Железнова², Ю. И. Ярынич^{2,4}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия

⁴Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁵Гидрометцентр России, Москва, Россия

*e-mail: drozdov.jeka@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.09.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Ключевые слова: горная метеорология, высокогорные метеорологические наблюдения, климат Эльбруса, ледник Гарабаши, метелемер FlowCapt, реанализ ERA5

В высокогорной части эльбрусского ледника Гарабаши проведены уникальные автоматизированные метеорологические наблюдения, охватывающие весь сезон аккумуляции 2021/22 г. Получены подробные данные о температурно-влажностном, ветровом, метелевом и радиационном режиме на высоте более 4700 м над ур. моря. Эти данные позволили показать, что реанализ ERA5 успешно воспроизводит основные характеристики метеорологического режима в условиях высокогорья, а для оценки средних скоростей ветра может применяться акустический метелемер ISAW FC4.

DOI: 10.31857/S2076673424010022

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия горное оледенение стремительно сокращается по всей планете, что является одним из самых ярких примеров отклика природных систем на глобальные и региональные изменения климата (Marzeion et al., 2014; High..., 2019). Регион Большого Кавказа не является исключением: средняя величина тренда площади оледенения составляет здесь 1%/год (Tielidze, Wheate, 2018). Сохранение таких темпов таяния ледников может привести к их полному исчезновению к концу XXI века, что хорошо согласуется с общепланетарной тенденцией и в итоге может привести к существенному дефициту пресной воды в прилегающих к горам районах (Huss, Hock, 2018). Важно отметить, что перестройка гидрологического режима рек южных районов России, связанная с деградацией оледенения, началась уже сейчас (Rets et al., 2020). Существенные изменения горной криосферы на Кавказе будут способствовать также росту числа опасных гляциологических явлений, прежде всего связанных с прорывами ледниковых озёр, потенциал которых существенно увеличивается по мере деградации оледенения (Лаврентьев и др., 2020). В то же время существенным ограничением для оценок

и прогноза баланса массы ледников и динамики речного стока служит отсутствие продолжительных метеонаблюдений.

На Кавказе станции регулярной сети Росгидромета расположены преимущественно в предгорной зоне, а выше 2000 м над ур. моря функционируют лишь три метеостанции: Сулак высокогорная (Республика Дагестан), Шаджатмаз (Республика Карачаево-Черкесия) и Терскол (Республика Кабардино-Балкария) (Торопов et al., 2019). Южный макросклон Эльбруса, в том числе ледник Гарабаши, с 2018 г. входящий в Международную гляциологическую сеть (WGMS..., 2021), находится в непосредственной близости от метеорологической станции Терскол, поэтому в многочисленных исследованиях данные этой станции активно привлекались для интерпретации гляциологических результатов (Рототаева и др., 2019; Олейников и др., 2019; Куксова и др., 2021). Вместе с тем различными исследователями, в том числе и по району Эльбруса, представлялось, что в условиях сложного рельефа далеко не всегда можно экстраполировать результаты даже близко расположенной метеостанции на какой-либо высотный уровень (Barry, 2008;

Ледники..., 2020), особенно это касается осадков (Barry, 2008; Торопов и др., 2022). Поэтому развитие и полноценная верификация гляциологических и гидрологических моделей предполагает наличие натуральных данных высокого качества, полученных непосредственно на поверхностях горных ледников за максимально длительный промежуток времени (Дроздов и др., 2023). Такие наблюдения активно реализовывались и продолжают реализовываться в горных районах в рамках международной задачи мониторинга и моделирования снежного покрова (Essery et al., 2020), а также в высокогорных районах в ходе гляциологических и гляциоклиматических исследований, среди которых прежде всего можно выделить измерения на Килиманджаро (Mölg et al., 2008) и в Боливийских Андах на вулкане Сахама (Hardy et al., 2003). Особенно впечатляют масштабы высокогорных метеорологических наблюдений в Гималаях, где уже 10 лет назад силами западных и китайских исследователей в рамках международных и национальных исследовательских программ начала формироваться полноценная высокогорная наблюдательская сеть (Shea et al., 2015).

На территории России наиболее развитым высокогорным измерительным полигоном является Эльбрус, где первые метеорологические измерения начались ещё в 1934/35 г. (Баранов, Покровская, 1936), а в рамках Международного геофизического года (1957–1959) стартовали уже полноценные комплексные наблюдения вдоль всего южного склона вплоть до высоты 5200 м над ур. моря (Волюшина, 1968). Однако эти наблюдения охватывали лишь летние сезоны и были эпизодическими. Регулярные автоматические наблюдения на ледниках Приэльбрусья стартовали только в 2007–2013 гг. (Rets et al., 2019; Ледники..., 2020), но также проводились только в летние месяцы в областях абляции ледников и не выше 3850 м над ур. моря. Для зимнего периода на эльбрусском леднике Гарабаши доступны лишь короткие (10–20 дней) ряды метеорологических данных для января — февраля, полученные в ходе экспедиций 2017–2022 гг. (Drozdov et al., 2022). В летний сезон автоматические измерения в областях питания ледников Кавказа охватывали лишь короткие периоды на Западном плато Эльбруса (5150 м над ур. моря) в 2018 г., Восточной вершине Эльбруса (5621 м над ур. моря) в 2020 г. (Ледники..., 2020) и Катынском плато (4800 м над ур. моря) в 2021 г. Систематические метеорологические наблюдения в области питания ледников не проводились. Между тем наличие таких наблюдений необходимо и для формирования корректных начальных данных в задачах гляциологического моделирования, и для оценки его результатов, а также для выявления физических механизмов формирования аномалий аккумуляции. Кроме того, эти измерения представляют интерес в рамках задач мониторинга и анализа мезомасштабных

горных циркуляций и радиационного режима высокогорных областей. В-третьих, наличие метеорологического измерительного комплекса в привершинной части Эльбруса актуально в связи с растущей рекреационно-спортивной популярностью этих мест. В наличии обновляемых сведений о погоде на высотах более 4500 м заинтересованы подразделения МЧС и Акционерное общество "Кавказ. РФ" (АО "Кавказ. РФ").

При отсутствии длительных рядов метеорологических наблюдений единственным доступным источником информации о метеорологическом и климатическом режиме горно-ледниковых районов служат данные реанализов. Однако в условиях сложной орграфии эти данные могут содержать серьёзные погрешности. Правда, в некоторых работах результаты сравнения данных реанализов с наблюдениями оказались достаточно оптимистичными, даже в разных регионах земного шара. Так, в работе (Торопов и др., 2016) показано удовлетворительное качество данных реанализа о температуре, характеристиках влажности и скорости ветра на Кавказе; похожая работа проделана по Боливийским Андам (Hardy, 2003). Но в то же время информация о таких величинах, как суточная интенсивность осадков, турбулентные потоки тепла и влаги, порывы ветра и температурно-влажностные характеристики подстилающей поверхности до сих пор использовать некорректно (Торопов et al., 2019). Эти выводы справедливы для областей абляции ледников Эльбруса на высотах порядка 2500–4000 м над ур. моря, поэтому полноценная верификация данных реанализов актуальна и для областей питания ледников Кавказа. На данный момент такая верификация не проводилась. Эти оценки необходимы, в частности, для климатических и строительных изысканий, что особенно актуально при интенсивном развитии инфраструктуры и канатных дорог в Приэльбрусье, а также в исследовательских целях, поскольку данные реанализов служат единственным доступным источником атмосферного форсинга для климатических моделей, в том числе для алгоритмов, описывающих элементы деятельного слоя суши (почву, снежный покров, ледники).

Цель работы — представление и анализ результатов первых длительных метеорологических наблюдений с использованием автоматического оборудования в области питания ледников Большого Кавказа в период аккумуляции. При этом внимание акцентируется на ветровом режиме и условиях метелевого переноса в этот период. Также оценивается точность воспроизведения реанализом ERA5 основных метеорологических величин на высотах более 4500 м над ур. моря в период с сентября 2021 по май 2022 г.

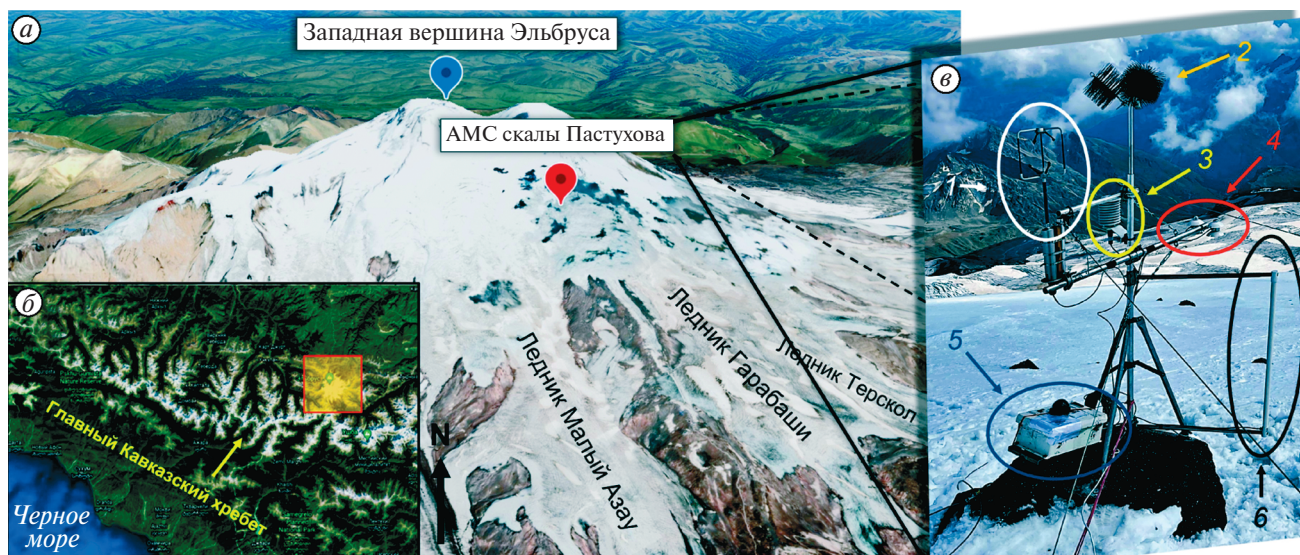


Рис. 1. Район исследований (гора Эльбрус) (а) с положением на территории Кавказа (б) и измерительный комплекс в области аккумуляции ледника Гарабаша (скалы Пастухова) в 2021–2022 годах (в): 1 — акустический анемометр Gill; 2 — “грозо-защитные ершики”; 3 — термогигрометр Rotronic; 4 — балансомер HukseFlux; 5 — ящик с логгером Campbell и устройством мобильной передачи данных; 6 — акустический метелемер ISAW FlowCapt4. Пунсонами показаны: АМС “Скалы Пастухова” — измерительный полигон (высота 4720 м над ур. моря) и западная вершина вулкана Эльбрус (5642 м над ур. моря). Для создания данного рисунка использованы материалы Google Earth (www.earth.google.com).

Fig. 1. Research area (Elbrus Mountain) (a) with the position in the Caucasus (b) and the measuring complex in the accumulation zone of the Garabashi Glacier (Pastukhov rocks) in 2021–2022 (c): 1 — the Gill sonic anemometer; 2 — “lightning protection brushes”; 3 — Rotronic thermo-hygrometer; 4 — HukseFlux net radiometer; 5 — box with Campbell logger and mobile data transmission device; 6 — ISAW FlowCapt4 acoustic driftometer. The punsons show: “AWS Pastukhov Rocks” — a measuring site (height 4720 m a.s.l.) and the Western peak of Elbrus (5642 m a.s.l.). Materials from Google Earth (www.earth.google.com) were used to create this figure.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регион и методика исследования. В качестве полигона для проведения мониторинга метеорологических условий в области аккумуляции ледников Центрального Кавказа был выбран ледник Гарабаша на южном склоне массива вулкана Эльбрус (рис. 1, а–б). В данном регионе этот ледник может считаться опорным для проведения гляциоклиматических исследований, что обусловлено типичными размерами его площади и длины (Каталог..., 2021) и участием в проекте мировой службы наблюдения ледников (WGMS..., 2021) с наличием рядов ежегодных наблюдений за балансом массы (Рототаева и др., 2019). Помимо этого, в области абляции ледника Гарабаша (3800 м над ур. моря) с 2013 г. проводятся метеорологические измерения, охватывающие летний период (Ледники..., 2020), а также короткие эпизоды зимнего периода (Дроздов и др., 2023). Кроме того, существенное преимущество данного ледника заключается в логистической доступности и наличии стабильной мобильной связи на высотах до 5000 м, что позволяет упростить установку, обслуживание метеостанции и постоянную передачу данных.

В данной работе обсуждается измерительная кампания в области питания ледника Гарабаша,

охватывающая весь сезон аккумуляции 2021/22 г. В ходе экспедиции в августе — сентябре 2021 г. была выбрана точка в верхней части скал Пастухова на высоте около 4720 м над ур. моря и установлена автоматическая метеорологическая станция (далее — АМС “Скалы Пастухова”). Измерительная площадка (см. рис. 1, в) представляет собой наклонную снежно-ледовую поверхность южной экспозиции с углом наклона порядка 20 градусов и включениями обломков каменного материала. Установленная АМС состояла из современного высокоточного оборудования; проводились измерения температуры и влажности воздуха на высоте 1.5 м над поверхностью ледника с использованием термогигрометра Rotronic HC-S3 (PST Rotronic, Bassersdorf, Switzerland).

Коротковолновые и длинноволновые компоненты радиационного баланса были получены по данным балансомера Hukseflux NR01 (Hukseflux Thermal Sensors, Delft, Netherlands), вынесенного над снежно-ледовой поверхностью на высоте около 2 м. Кроме того, с помощью трёхкомпонентного акустического анемометра Gill Windmaster (Gill Instruments, Lymington, Hampshire, UK) на уровне 2 м измерялись компоненты скорости ветра и акустическая температура воздуха с частотой 20 Гц,

что позволяет применять метод eddy covariance для оценки турбулентного потока импульса и явного тепла.

Особый интерес представляют первые в России многомесячные высокогорные автоматические измерения интенсивности метелевого переноса, выполненные с помощью акустического метелемера ISAW FlowCapt FC4 (ISAW Products, Tannay, Switzerland). Принцип работы этого прибора основан на детектировании звуковых колебаний при соударении ледяных кристаллов и трении потока воздуха о приёмную поверхность, что позволяет получить данные о скорости ветра, мгновенной и средней интенсивности потока ледяных кристаллов (величине метелевого переноса). Автоматические измерения метелевого переноса с помощью метелемера FlowCapt уже проводились во многих полярных регионах: в Антарктиде (Trouvilliez et al., 2015; Amory, 2020), Швейцарских Альпах (Chritin et al., 1999; Lehning et al., 2002), на Южном Алтае (Zhang et al., 2022), на ледниках архипелага Шпицберген (Jaedicke, 2001) и Канадского Арктического архипелага (Savelyev et al., 2006). Во всех перечисленных работах показано, что акустический метелемер позволяет получить удовлетворительные количественные оценки метелевого переноса. Для Центрального Кавказа нами ранее уже были получены автоматизированные оценки метелевого переноса для зимнего периода в области абляции ледника Гарабаши (Drozдов et al., 2022). В рамках измерительной кампании, обсуждаемой в данной работе, трубка метелемера была расположена на уровне 0.5–1.5 м над поверхностью снежно-ледяного покрова, поэтому можно считать, что полученные сведения о метелевом

переносе относятся к приповерхностному слою толщиной 1.5 м, а о скорости ветра — высоте 1 м над поверхностью.

Кроме того, в целях измерения температуры снежного покрова на глубинах 10 и 20 см были установлены два датчика Tinytag Plus 2 TGP-4017 (Gemini Data Loggers, Chichester, UK). Однако из-за интенсивного метелевого переноса и сдувания снега датчики оказывались на совершенно разных уровнях в снежной толще, в том числе выходили на поверхность, поэтому полученные результаты измерений оказались неудовлетворительными и не будут обсуждаться в данной работе. Полный набор сведений об использованной приборной базе, дискретности и погрешности измерений приведён в таблице.

В рамках данного этапа исследования ставилась задача, чтобы представленный выше комплекс функционировал в течение года. Поэтому важными критериями, особенно в условиях низких температур и высоких скоростей ветра на высокогорье, служат бесперебойность и автономность работы АМС. Установка метеостанции непосредственно на снежно-ледовую поверхность с учётом угла наклона и погодных условий не представляется целесообразной, поэтому тренога с АМС монтировалась на камне с относительно горизонтальной поверхностью (см. рис. 1, в). Автономное питание АМС обеспечивалось аккумулятором ёмкостью 85 Ач, который в дневное время заряжается от поликристаллической панели мощностью 100 Вт, закреплённой на соседнем камне. В то же время на поверхности ледника крайне сложно организовать заземление метеостанции, поэтому для молниезащиты применялся подход с распределением статического электричества с помощью “грозозащитных ёршиков” на верхушке АМС (см. рис. 1).

Таблица. Приборная база и основные характеристики приборов и измерений для АМС “Скалы Пастухова”

Метеорологическая величина	Измерительный прибор	Погрешность измерений	Высота прибора над поверхностью	Дискретность измерений
Температура воздуха	Rotronic HC-S3	± 0.2 °C	1.5 м	1 минута
Влажность воздуха	Rotronic HC-S3	$\pm 1.5\%$	1.5 м	1 минута
Скорость ветра	Gill WindMaster	$< 1.5\%$	2 м	20 Гц
	ISAW FC4	$\pm 15\%$	1 м	1 минута
Коротковолновая радиация	HukseFlux NR01	$< 7\%$	2 м	1 минута
Длинноволновая радиация		$< 2.4\%$	2 м	1 минута
Метелевый перенос	ISAW FC4	$\pm 5\%$	0.5–1.5 м	1 минута
Температура снега на глубинах	Tinytag Plus 2	± 0.5 °C	На глубине 10 и 20 см	1 час

Данные наблюдений записывались на логгер Campbell CR1000X (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) и автоматически отправлялись по мобильной GSM-связи через роутер MikroTik: каждые 5 минут выполнялась выгрузка средних значений по всем датчикам на общедоступный сайт “Народный Мониторинг” (<https://www.narodmon.ru>); раз в сутки контрольные значения поступали на электронную почту участникам проекта, также происходила выгрузка полного объёма данных на закрытый сервер. Автономная АМС функционировала в течение 9 месяцев: с 01.09.2021 по 01.06.2022. Комплекс мог бы работать и дольше, однако его работу прервал камнепад в верхней части скал Пастухова.

При проведении измерений в высокогорной зоне наиболее серьёзными проблемами становятся экстремальные скорости ветра (особенно критична парусность солнечных панелей и логгерных ящиков), обледенение приборов и несущих конструкций, а также высокая грозовая активность. Контроль работоспособности приборов на качественном уровне мог проводиться дистанционно на основе полученных данных, однако ввиду сложной логистической доступности обслуживание приборов производилось лишь по необходимости. Для более полного контроля состояния АМС в будущих проектах рекомендуется применение камер видеонаблюдения.

Контроль качества данных наблюдений. Контроль качества данных проводился на основе результатов осреднения исходных рядов измерений за 30-минутный интервал. С учётом сильных метелей и известных случаев обледенения метеостанции ключевой задачей была фильтрация грубых ошибок радиационных потоков, которая проводилась на основе сравнения с пороговыми значениями известных физических величин. Так, если осреднённые за 30 минут значения суммарной коротковолновой радиации превышали значение солнечной постоянной (1361 Вт/м^2) или расчётное альbedo снежно-ледовой поверхности оказывалось менее нуля или больше единицы, то считалось, что все измерения радиометра в этот момент времени недостоверны. Такие случаи особенно заметны в переходные сезоны (начало октября и апрель), что, вероятно, связано с гололёдными явлениями и частым обледенением метеостанции.

Основным прибором для получения данных о ветровом режиме был акустический анемометр Gill WindMaster. Однако по техническим причинам он проработал лишь 24 дня с начала периода наблюдений — с 01.09.2021 до 24.09.2021. Поэтому полный ряд данных по скорости ветра был получен только по данным акустического метеометра ISAW FlowCapt4. Этот прибор не является стандартным для измерения ветрового режима и имеет высокую заявленную производителем погрешность для значений скорости ветра в 15%.

Известные в литературе результаты верификации данного прибора непосредственно по измерениям скорости ветра неоднозначны: так, в (Savel'yev et al., 2006) показана высокая корреляция результатов метеометра и данных стандартных наблюдений (коэффициент корреляции $R = 0.76$), в то время как в (Trouvilliez et al., 2015), несмотря на ещё более высокую степень согласованности рядов ($R = 0.91$), сделан вывод о том, что показания метеометра существенно завышают значения скорости ветра. Поэтому мы провели оценку данных метеометра в сравнении с данными акустического анемометра Gill за доступный период (24 дня). С помощью программного обеспечения EddyPro была выполнена фильтрация и осреднение данных акустического анемометра за 30 минут, а данные метеометра, установленного на высоте 1 м над поверхностью, были приведены к уровню 2 м по классическому логарифмическому закону, соответствующему распределению скорости ветра в приземном слое при безразличной стратификации (Монин, Обухов, 1954). Полученные результаты приведены ниже и демонстрируют хорошее совпадение данных о скорости ветра по двум приборам. Полученное значение коэффициента корреляции ($R = 0.94$) указывает на очень высокую согласованность полученных рядов, при этом метеометр не завышает значений скорости ветра относительно акустического анемометра. Однако эти оценки справедливы для скоростей ветра не более 20 м/с. Таким образом, можно сделать вывод, что акустический анемометр ISAW FlowCapt4 показывает достоверные значения для средней скорости ветра и может использоваться в данной работе для общего описания ветрового режима в привершинной зоне Эльбруса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности метеорологического режима в привершинной части Эльбруса. Основные результаты этих метеорологических наблюдений с осреднением за 30 минут представлены на рис. 2, а. Полученные данные показывают, что на этих высотах практически во всех случаях преобладает выхолаживание поверхности за счёт длинноволнового излучения. Вблизи даты зимнего солнцестояния максимальные значения суммарной радиации в дневное время редко превышают 600 Вт/м^2 , что примерно вдвое ниже, чем в мае при наблюдавшемся максимуме в 1282 Вт/м^2 .

По данным наблюдений было получено распределение значений температуры воздуха для периода сентябрь — май, близкое к логнормальному (см. рис. 2, в), а характерное значение составило $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. Суровые холода с температурами менее $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаются вплоть до середины марта, и даже в середине апреля при адвекции холодного воздуха значения температуры могут

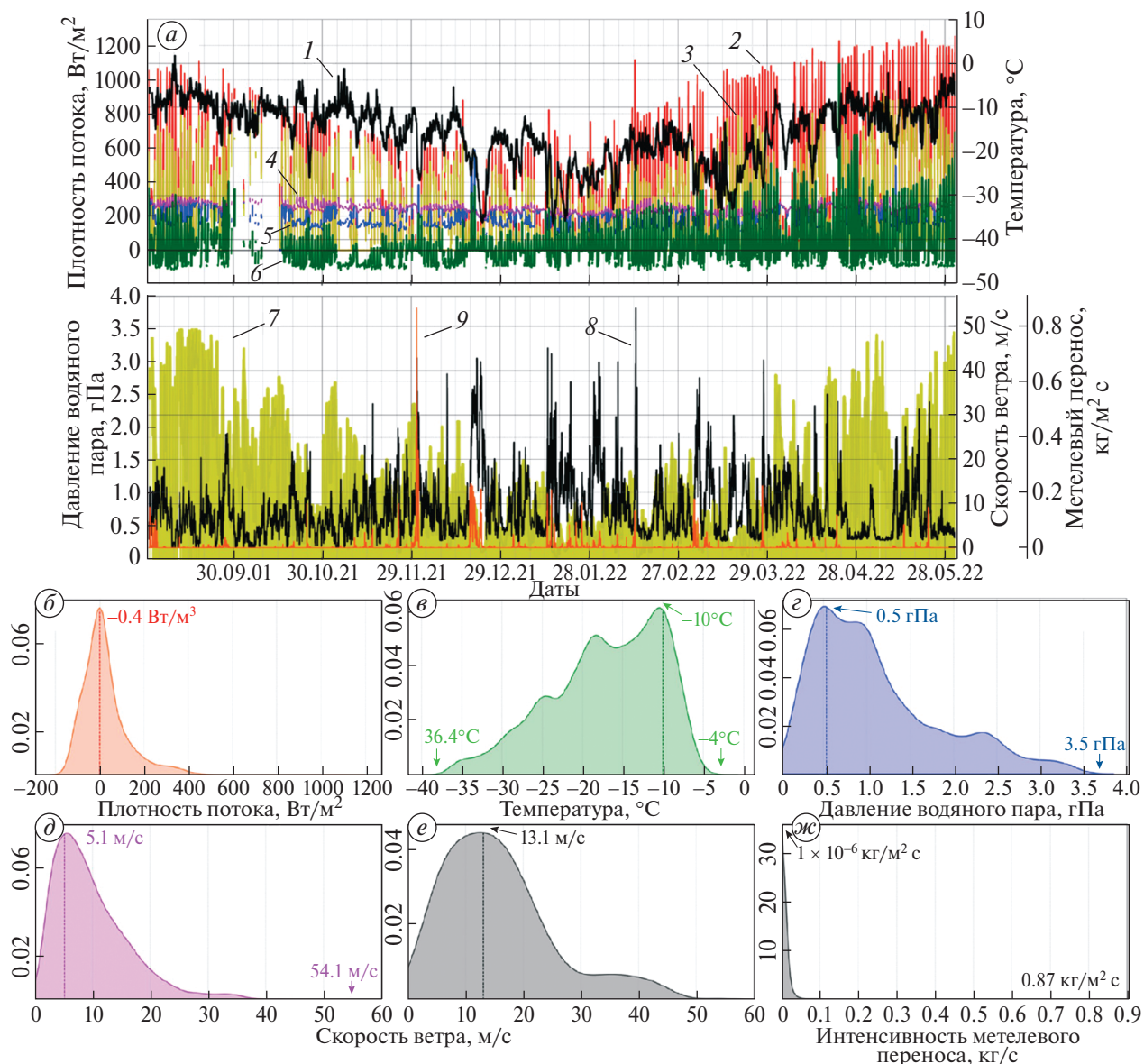


Рис. 2. Ряды данных прямых наблюдений за период с 01.09.2021 по 01.06.2022 по АМС на скалах Пастухова (а): 1 — температура воздуха на высоте 2 м; 2 — плотность потока суммарной коротковолновой радиации; 3 — плотность потока отраженной коротковолновой радиации; 4 — плотность потока восходящей длинноволновой радиации; 5 — плотность потока встречного излучения атмосферы; 6 — радиационный баланс; 7 — парциальное давление водяного пара; 8 — скорость ветра на высоте 2 м; 9 — интенсивность метелевого переноса на уровне 1 м; функции распределения для радиационного баланса (б), температуры воздуха на высоте 2 м (в), парциального давления водяного пара (г), скорости ветра (д), суточного максимума скорости ветра (е), интенсивности метелевого переноса (ж). Стрелками и подписями показаны экстремальные значения величин и значения моды распределения.

Fig. 2. Observation data series for the period from 09/01/2021 to 06/01/2022 from the AWS at Pastukhov Rocks (a): 1 — air temperature at 2 m; 2 — total short-wave radiation flux density; 3 — reflected short-wave radiation flux density; 4 — upward long-wave radiation flux density; 5 — downward long-wave radiation flux density; 6 — radiation balance; 7 — partial pressure of water vapor; 8 — wind speed at 2 m; 9 — snowdrift transfer intensity at 1 m; distribution functions for radiation balance (b), air temperature at 2m (в), partial pressure of water vapor (г), average wind speed (д), daily wind speed maximum (е), snowdrift transfer intensity (ж). Arrows and captions show extreme and distribution mode values.

опускаться ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом минимальное значение оказалось равным $-36.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Положительные температуры на этих высотах в сезон аккумуляции наблюдаются крайне редко: лишь

в начале сентября температура воздуха достигла $+1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Функция распределения парциального давления водяного пара также является логнормальной

(см. рис. 2, *г*) с характерным значением в 0.5 гПа и максимумом 3.5 гПа. При этом наблюдается закономерная сезонная изменчивость влажности воздуха с её уменьшением в зимние месяцы.

На основе данных акустического метелемера были получены функции распределения для средней за 30 минут (см. рис. 2, *д*) и максимальной за сутки (см. рис. 2, *е*) скорости ветра, которые также близки к логнормальному распределению. Характерные значения для средней за 30 минут и максимальной за сутки скорости ветра составили 5.1 и 13.1 м/с. При этом была зафиксирована максимальная скорость в 54.1 м/с, а скорости ветра выше 30 м/с, согласно (Зверев, 1977), служащие критерием струйного течения, оказались не столь редким явлением на высотах порядка 4700 м над ур. моря. Стоит также отметить, что ураганные скорости ветра (> 33 м/с) характерны для зимнего периода и наблюдаются преимущественно с ноября по март, когда циклоническая деятельность в Кавказском регионе наиболее активна.

Также с помощью метелемера ISAW FlowCapt4 были получены оценки интенсивности метелевого переноса в приповерхностном слое. Показано, что интенсивность метелевого переноса подчиняется гамма-распределению (см. рис. 2, *ж*), поскольку преобладает слабый перенос снега при незначительных скоростях ветра. Однако в случаях самых сильных метелей эта величина может превышать 0.2 кг/м^2 — за весь период было выявлено 4 случая таких метелей и 13 случаев метелей с интенсивностью переноса более $0.1 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Экстремальные метели наблюдались с декабря по конец марта, однако сильные метели проявлялись во все месяцы, а максимальное значение интенсивности метелевого переноса составило $0.87 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Достоверность этой величины может быть подвергнута сомнению, так как это был единственный за весь период зарегистрированный случай столь экстремальной метели; кроме того, единственным опорным значением для данного региона служит полученный ранее экстремум, составивший всего $0.076 \text{ г/м}^2 \cdot \text{с}$. Однако это значение оказалось максимальным для месячного периода измерений на границе питания ледника Гарабаша (3850 м над ур. моря) в 2022 г. (Drozdov et al., 2022). Кроме того, на Земле Адели в Восточной Антарктиде при скоростях ветра более 20 м/с были получены значения интенсивности метелевого переноса до $1.15 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (Amory, 2020), что подтверждает разумность полученных нами значений.

Суммарный метелевый перенос за 9 месяцев сезона аккумуляции составил 10^5 кг/м^2 . Это значение согласуется с результатами, полученными в других регионах планеты, где наблюдается интенсивный метелевый перенос. Например, в прибрежной части Антарктиды, в районе станции Дюмон д'Юрвиль по лидарным измерениям была

получена годовая сумма массы перенесённого снега в $6.3 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2$ (Wendler, 1987), а в южной части Алтая, на высотах около 2000 м, это значение составило лишь 589.4 кг/м^2 (Zhang et al., 2022).

Полученные оценки позволяют говорить, что с точки зрения ветрового режима и метелевого переноса условия в области аккумуляции Эльбруса (на высотах более 4500 м над ур. моря) оказываются близки к условиям в прибрежной зоне Антарктиды, где дуют устойчивые стоковые ветры.

Также был выполнен расчёт функций спектральной плотности для рядов температуры, относительной влажности и скорости ветра (рис. 3). Поскольку длина ряда измерений составила около 270 суток при временной дискретности измерений 1 минута, выявленные колебания периодом от нескольких часов до 2–5 суток можно считать достоверными. Колебания с периодом более 15 суток не рассматриваются, поскольку их статистическая значимость требует длину выборки не менее 3 лет. Колебания с периодом от 6 до 14 суток, выявленные по итогам спектрального анализа полученного ряда наблюдений, строго говоря, обеспечены недостаточным объёмом выборки, поэтому к ним следует относиться осторожно.

Характерным результатом спектрального анализа служит высокая степень согласованности спектров температуры и относительной влажности на уровне полусуточной, суточной и короткопериодической синоптической изменчивости (2–3 суток). Это объясняется тесной взаимосвязанностью этих метеорологических параметров: с одной стороны, суточный ход температуры очевидным образом определяет суточный ход относительной влажности, с другой стороны, суточный ход облачности, обусловленный как дневной конвекцией, так и горно-долинной циркуляцией, в значительной степени определяет колебания температуры с периодами 24 и 12 часов (см. рис. 3, *а–б*). При этом в отличие от среднегорных условий суточные и полусуточные колебания никак не проявляются в результате анализа ряда по скорости ветра (см. рис. 3, *в*). По всей видимости, это связано с тем, что выше 4000 м над ур. моря горно-долинная циркуляция и стоковые ветры слабо проявляются в значениях скорости ветра и незаметны по сравнению с вариациями крупномасштабного потока. При этом суточный ход облачности, определяющий как относительную влажность, так и температуру, в значительной степени зависит от горно-долинной циркуляции, развивающейся в среднегорье, и хорошо проявляется на уровне скал Пастухова. Важный результат — выявление суточной и полусуточной гармоник относительной влажности, очевидно связанных с режимом облачности. Это служит доказательством правомерности использования простых подходов для оценки суточной изменчивости облачности над горными ледниками, которая кардинальным

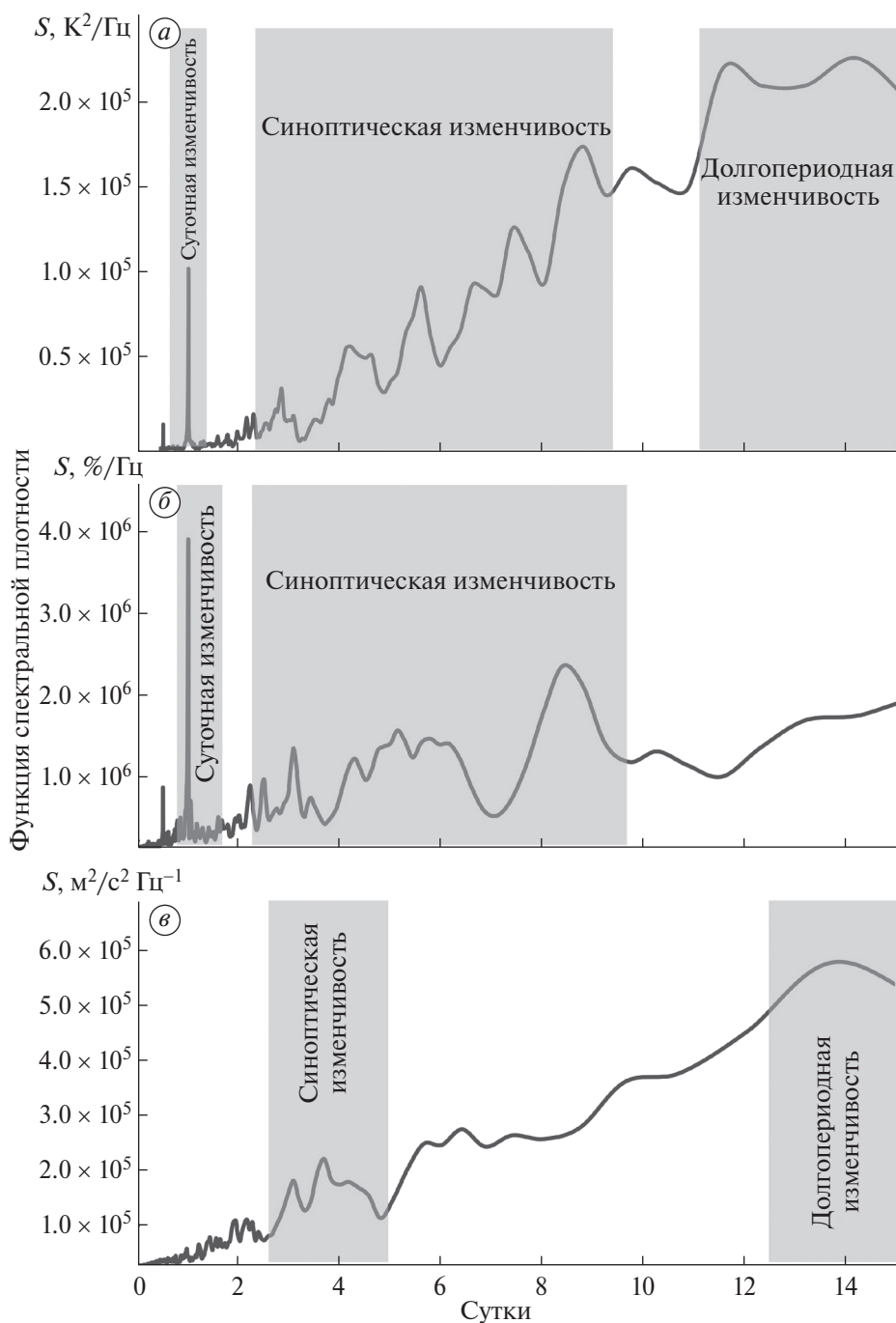


Рис. 3. Функции спектральной плотности для рядов температуры (а), относительной влажности (б) и скорости ветра (в) по данным измерений АМС “Скалы Пастухова” с дискретностью 1 минута с 01.09.2021 по 01.06.2022. Закрашенными областями и подписями показана изменчивость разного масштаба

Fig. 3. Spectral density functions for data series of temperature (a), relative humidity (б) and wind speed (в) according to the Pastukhov Rocks AWS measurements with a discreteness of 1 minute from 09/01/2021 to 06/01/2022. The shaded areas and labels show different scale variability.

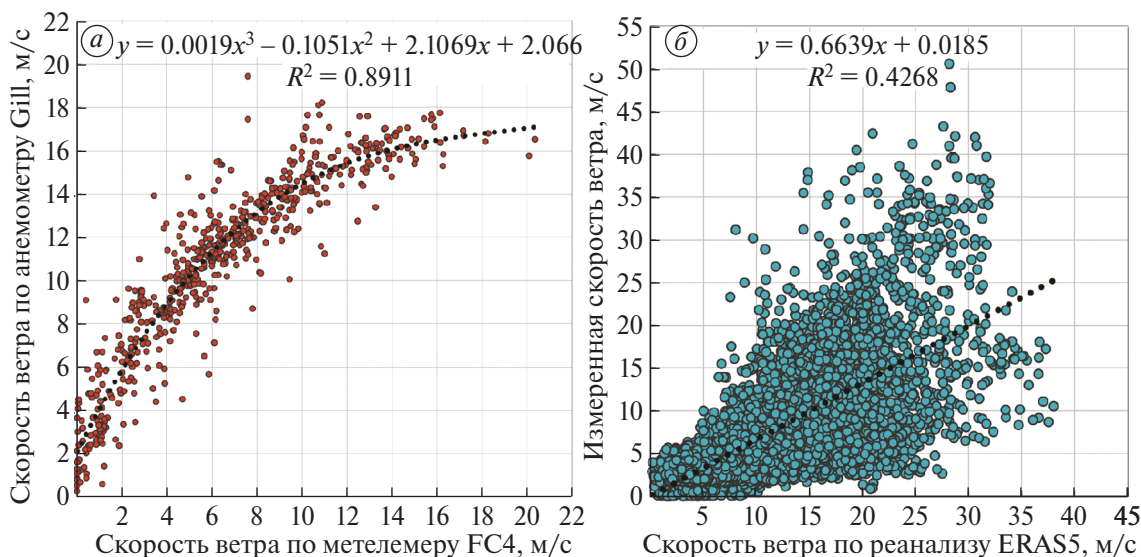


Рис. 4. Диаграмма рассеяния для значений средней за 30 минут скорости ветра по данным измерений по акустическому метелемеру ISAW FC4 и акустическому анемометру Gill WindMaster с 01.09.2021 по 23.09.2021 (а) и диаграмма рассеяния для значений средней за 1 час скорости ветра по данным измерений по акустическому метелемеру ISAW FC4 и данным реанализа ERA5 на уровне 550 гПа с 01.09.2021 по 01.06.2022 (б). Чёрными пунктирными линиями показаны кривые аппроксимации, а во вставках приведены уравнения данных кривых и коэффициенты детерминации.

Fig. 4. Scatter diagram for 30-minute average wind speed values according to measurements using the ISAW FC4 acoustic driftometer and Gill WindMaster acoustic anemometer from 09/01/2021 to 09/23/2021 (a) and scatter diagram for 1-hour average wind speed values according to measurements using ISAW FC4 acoustic driftometer and ERA5 reanalysis data at the 550 hPa pressure level from 09/01/2021 to 06/01/2022 (b). The black dotted lines show the approximation curves, and the insets show the equations for these curves and the determination coefficients.

образом влияет на изменчивость радиационного баланса — ключевого параметра, определяющего тепловой баланс горных ледников.

Колебания масштаба несколько суток для трёх основных метеопараметров проявились по-разному. Анализ отдельных пиков в спектре температуры (2.5, 4, 5.5, 7.5, 9 суток) и относительной влажности (3, 5, 9 суток) не имеет смысла в силу относительно слабой статистической обеспеченности отдельных взятых пиков. Все эти колебания следует отнести к синоптической изменчивости, характерный период которой в атмосфере умеренных широт составляет пять суток (характерное время прохождения типичного циклонического или антициклонического вихря). В скорости ветра колебания синоптического масштаба явно проявились в диапазоне 3–4 суток. К долгопериодной изменчивости (более 10 суток) следует относиться осторожно в силу слабой статистической обеспеченности. Тем не менее следует отметить тенденцию к выявлению колебания с периодом 12–14 суток, которые достаточно чётко проявились в рядах температуры и скорости ветра и соответствуют характерным масштабам смены режимов крупномасштабной атмосферной циркуляции (зональной, зонально-меридиональной, меридиональной). В относительной влажности это явно не проявилось из-за отсутствия однозначной связи режима циркуляции с облачностью:

в горных условиях гораздо более значимым сигналом оказываются местные циркуляции и процессы синоптического масштаба (2–9 суток).

Верификация реанализа ERA5 на основе данных прямых наблюдений. Кроме того, на основе результатов прямых наблюдений была проведена оценка качества воспроизведения атмосферных характеристик на больших высотах по данным сеточных архивов климатических данных (реанализов). Мы выбрали один из наиболее известных и используемых реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA5, и в частности его вариант для различных высотных уровней атмосферы ERA5 Pressure Levels (Hersbach et al., 2023) с горизонтальной сеткой 0.25×0.25 градуса. В данном случае использовался набор данных для высотного уровня 550 гПа в точке сетки, ближайшей к установленной АМС, поскольку в зимний сезон эта изобарическая поверхность соответствует высотам 4650–5000 м над ур. моря и лучше всего отражает высоту установки метеостанции. Поскольку данные реанализа ERA5 доступны только с часовым шагом по времени, то данные АМС осреднялись за каждый час и все приведённые ниже в данном параграфе сравнения выполнялись для данных с часовым разрешением.

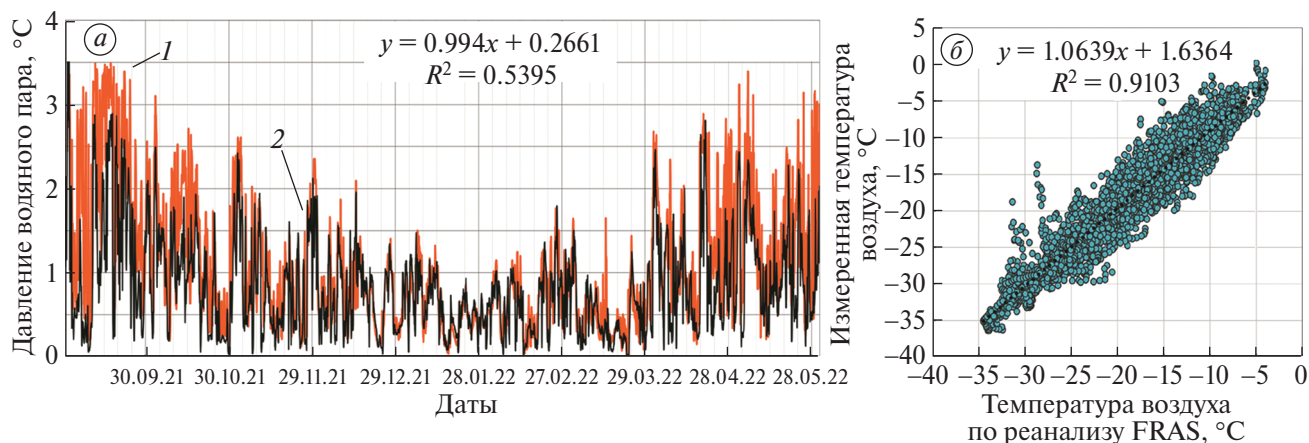


Рис. 5. Парциальное давление водяного пара за весь период наблюдений (а): 1 — по данным прямым наблюдениям по АМС “Скалы Пастухова”; 2 — по данным реанализа ERA5 на уровне 500 гПа. Диаграмма рассеяния для значений средней за 1 час температуры воздуха по данным измерений АМС “Скалы Пастухова” и данным реанализа ERA5 на уровне 550 гПа за весь период наблюдений (б). Чёрной пунктирной линией показаны кривые аппроксимации, а во вставках приведены уравнения данных кривых и коэффициенты детерминации.

Fig. 5. Partial pressure of water vapor for the entire observation period (a): 1 — according to direct observations from the Pastukhov Rocks AWS; 2 — according to ERA5 reanalysis data at the 550 hPa pressure level. Scatter diagram for 1-hour average air temperature according to measurements from the Pastukhov Rocks AWS and ERA5 reanalysis data at the 550 hPa level for the entire observation period (b). The black dotted line shows the approximation curves, and the insets show the equations of these curves and the coefficients of determination.

Верификация реанализа для средних значений скорости ветра проводилась на основе доступных данных акустического метелемера ISAW FlowCapt4 за весь период наблюдений (9 месяцев). Выяснилось, что, с одной стороны, данные наблюдений и модельные результаты удовлетворительно согласуются между собой (см. рис. 4, б), на что указывает значение коэффициента корреляции $R = 0.65$, но, с другой стороны, реанализ существенно занижает экстремальные значения скорости ветра: они не превышали 38 м/с, в то время как фактически наблюдалось несколько случаев метелей со скоростями ветра более 40 м/с при абсолютном максимуме 54.1 м/с. Это лишний раз количественно подтверждает огромную роль орографических усилений скорости ветра на Эльбрусе за счёт подветренных бурь или бокового обтекания, которые не воспроизводятся даже последними версиями реанализа.

Аналогичное сравнение для температуры воздуха показывает высокое качество воспроизведения этой величины реанализом ERA5 (рис. 5, б) — коэффициент корреляции для двух рядов составил 0.95. Однако в модельных расчётах снова наблюдается недооценка экстремальных величин. Так, минимум температуры в зимний период оказался завышен на 2 °С, а максимум занижен на 4 °С.

Качество воспроизведения реанализом ERA5 влажности воздуха также может считаться высоким на основе количественного сравнения значений парциального давления водяного пара (см. рис. 5, а).

Однако, несмотря на высокое значение коэффициента корреляции ($R = 0.73$) заметна неоднородность модельных результатов в зависимости от сезона. Если в зимний период, при наиболее низкой влажности воздуха, реанализ ERA5 достаточно точно воспроизводит изменчивость величины, то в переходные сезоны (сентябрь — октябрь, апрель — май) заметно существенное занижение влажности воздуха. В таком случае можно ожидать занижения значений влажности воздуха в течение всего наиболее тёплого периода (апрель — октябрь).

Таким образом, выполненная верификация данных реанализа ERA5 Pressure Levels показала, что этот климатический архив может применяться для оценок средних значений скорости ветра, температуры и влажности воздуха на высотах более 4500 м над ур. моря, что подтверждает выводы, полученные ранее для Кавказа в (Торопов и др., 2016). Однако для оценок экстремальных значений метеорологических параметров исходные данные реанализа непригодны и требуют корректировки на основе известных рядов прямых наблюдений.

Стоит также отметить, что в данных реанализов на изобарических уровнях отсутствуют сведения о порывах ветра, а доступны лишь значения средней за час скорости ветра. В то же время оценки порывов ветра крайне важны для задач строительной климатологии и оценки текущей погодной ситуации на горнолыжных трассах, линиях канатных дорог и для проведения альпинистских мероприятий. В таком случае значения порывов ветра могут

быть рассчитаны исходя из известной средней скорости ветра, например по данным реанализов. Полученные данные наблюдений по АМС "Скалы Пастухова" позволили установить, что для привершинной части Эльбруса можно использовать следующее эмпирическое соотношение:

$$V_{gust} = 1.8 \cdot \bar{V} + 1.7, \quad (1)$$

где V_{gust} — порыв ветра, м/с; \bar{V} — средняя за час скорость ветра, м/с.

Данная формула не имеет глубокой динамической интерпретации, однако обеспечена неплохим объёмом выборки (порядка 200 000 измерений), поэтому может считаться статистически значимой. Существует много работ, посвящённых анализу и прогнозу максимальной скорости ветра на основе статистических, синоптико-статистических и динамических методов (Курбатова, Рубинштейн, 2018). Статистические методы наиболее применимы в нашем случае, поскольку основаны на анализе временной серии данных в одной точке. Большая часть этих методов сводится к связи максимального порыва ветра с турбулентной кинетической энергией, которая определяется как квадрат среднего квадратического отклонения скорости ветра. Например, один из распространённых и наиболее физически обоснованных вариантов связи максимальной скорости ветра за 10-минутный период наблюдений со средним за этот же период значением предложен в работе (Vorn, 2012) и выглядит следующим образом:

$$V_{gust} = \bar{V} + \sqrt{2TKE} = \bar{V} + \sigma\sqrt{2}, \quad (2)$$

где V_{gust} — максимальная скорость ветра, м/с; \bar{V} — средняя за 10 минут скорость ветра, м/с; TKE — турбулентная кинетическая энергия, Дж/кг; σ — среднее квадратическое отклонение скорости ветра за данный период, м/с. Использование данного соотношения для больших выборок показывает, что наиболее ожидаемым значением порыва является удвоенная средняя скорость ветра. То есть если среднее значение составляет 20 м/с, то наиболее вероятным значением максимального порыва будет 40 м/с, что в целом близко к полученному нами в эмпирической формуле значению. Также в работе (Курбатова, Рубинштейн, 2018) показано, что эта формула позволяет наиболее точно, по сравнению с прочими методами, описывать характерные значения порывов ветра, однако в самой статье предлагается использовать несколько иное соотношение, которое завышает средние оценки, но позволяет описать экстремальные порывы ветра:

$$V_{gust} = \bar{V} + 3\sqrt{TKE} = \bar{V} + 3\sigma. \quad (3)$$

На основе данных наблюдений за скоростью ветра по формуле (2) мы получили оценку среднего

значения среднее квадратического отклонения скорости ветра σ для условий высокогорья при часовом интервале осреднения, которое составило 5.8 м/с. С использованием этого значения могут быть получены значения порывов ветра по данным реанализов с часовым шагом. При проведении инженерно-строительных изысканий для описания средних порывов предлагается использовать соотношение (2), в то время как для оценок пиковых порывов целесообразнее использование формулы (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён первичный статистический анализ самых высокогорных метеорологических измерений на территории России, которые проводились на южном склоне Эльбруса, в области аккумуляции ледника Гарабаши, в районе скал Пастухова (высота 4720 м над ур. моря) в течение 9 месяцев: с 01.09.2021 по 01.06.2022. Получены статистические характеристики основных метеорологических величин и эмпирические функции их распределения.

Анализ полученных рядов показал, что характерное значение температуры в период аккумуляции для данной высоты составляет -10°C при минимальном значении -36.4°C , парциальное давление водяного пара достигает 3.5 гПа при характерном значении в 0.5 гПа. При этом все основные метеорологические характеристики подчиняются логнормальному распределению. Характерные значения для средней за 30 минут и максимальной за сутки скорости ветра составили 5.1 и 13.1 м/с. При этом была зафиксирована максимальная средняя скорость 54.1 м/с. На основе значительной выборки данных предложена простая эмпирическая формула, позволяющая восстанавливать максимальные скорости ветра по средним значениям. Также показано, что для оценки средних порывов ветра нужно к среднему часовому значению скорости добавить полуторное среднее квадратическое отклонение, а для максимального порыва — утроенное. Эти выводы могут быть полезны в рамках инженерных гидрометеорологических изысканий.

Отдельного внимания заслуживают оценки интенсивности метелевого переноса с помощью акустического метелемера ISAW FlowCapt4. Выяснено, что метели с интенсивностью переноса более $0.1 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ весьма распространены в зимний период. Максимальное среднее значение интенсивности метелевого переноса составило $0.87 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$, а суммарный за 9 месяцев перенос снега в верхней части скал Пастухова составил 10^5 кг/м^2 , что близко к условиям прибрежной зоны стоковых ветров в Антарктиде. Сочетание интенсивного метелевого переноса с достаточно высокими значениями радиационного баланса и значительной повторяемости дефицита

влажности может способствовать интенсивной сублимации кристаллов во время метелей, что в свою очередь может вносить существенный вклад в баланс массы ледников. Также была проведена верификация метелемера ISAW FlowCapt4 на основе данных акустического анемометра Gill и показано, что данный прибор может использоваться не только для оценки метелевого переноса, но и для измерений средней скорости ветра.

Выполнены также очередные оценки данных реанализа ERA5 для температуры, парциально-го давления пара и скорости ветра в ближайшем к точке измерений узле сетки и показано их хорошее соответствие данным наблюдений, что позволяет использовать эту информацию и в качестве начальной информации для моделей снежного покрова и горного оледенения, и для верификации результатов моделирования.

Благодарности. Анализ и интерпретация данных метеорологических наблюдений в высокогорной зоне Эльбруса, а также верификация данных реанализа ERA5 для условий зоны аккумуляции ледников Кавказа выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-17-00247; тестирование акустического метелемера ISAW FlowCapt4 и разработка методики оценки максимальных порывов ветра по средним значениям в высокогорных условиях в рамках Госзадания FMGE-2019-0004.

За помощь в подготовке и сборке метеорологического комплекса выражается благодарность сотруднику Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН А. Д. Пашкину, при установке АМС на скалах Пастухова — сотруднику Кабардино-Балкарского научного центра РАН А. А. Керимову.

Acknowledgments. The analysis and interpretation of meteorological observations in the high-altitude zone of Elbrus, as well as verification of ERA5 reanalysis data for the conditions of the Caucasus glacier accumulation zone were carried out with the financial support of the RNF grant No. 23-17-00247; testing of the ISAW FlowCapt4 acoustic metelemeter and development of a methodology for estimating maximum wind gusts by average values in high-altitude conditions within the framework of the FMGE-2019-0004 State Task.

For assistance in the preparation and assembly of the meteorological complex, thanks are expressed to A. D. Pashkin, an employee of the A. M. Obukhov IFA of the Russian Academy of Sciences, and A. A. Kerimov, an employee of the KBNC of the Russian Academy of Sciences, when installing the AMS on the Pastukhov Rocks.

ЛИТЕРАТУРА

Баранов С., Покровская Т. Работа метеорологической группы ЭКНЭ 1935 г. // Тр. Эльбрусской

экспедиции 1934 и 1935 гг. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. С. 199–209.

Волошина А. П. Радиационные условия в период абляции // Оледенение Эльбруса. М.: Изд-во МГУ, 1968. С. 158–168.

Волошина А. П. Метеорология горных ледников // МГИ. 2001. Т. 92. С. 3–148.

Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 360 с.

Дроздов Е. Д., Турков Д. В., Торопов П. А., Артамонов А. Ю. Термический режим снежного покрова зимой в высокогорной части Эльбруса по натурным данным и результатам моделирования // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. Вып. 2. С. 225–242. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020059>

Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 711 с.

Каталог ледников России // Электронный ресурс. <https://www.glacrus.ru> (Дата обращения: 15.07.2023).

Куксова Н. Е., Торопов П. А., Олейников А. Д. Метеорологические условия экстремального лавинообразования в горах Кавказа по данным наблюдений и реанализов // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. Вып. 3. С. 377–390. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030095>

Лаврентьев И. И., Петраков Д. А., Кутузов С. С., Коваленко Н. В., Смирнов А. М. Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. Вып. 3. С. 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044>

Ледники и климат Эльбруса / Под ред. В. Н. Михаленко. М.; СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.

Монин А. С., Обухов А. М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. ГЕОФИАН, 1954. № 24 (151). С. 163–187.

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>

Роттаева О. В., Носенко Г. А., Керимов А. М., Кутузов С. С., Лаврентьев И. И., Никитин С. А., Керимов А. А., Тарасова Л. Н. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. // Лёд и Снег. 2019. Т. 59 (1). С. 5–22. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22>

Торопов П. А., Михаленко В. Н., Кутузов С. С., Морозова П. А., Шестакова А. А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. Вып. 1. С. 5–19. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-5-19>

Amory C. Drifting-snow statistics from multiple-year autonomous measurements in Adélie Land, East

- Antarctica // *The Cryosphere*. 2020. № 14 (5). P. 1713–1725. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1713-2020>
- Barry R. G. *Mountain weather and climate*. London. Cambridge University Press, 2008. 505 p.
- Born K., Ludwig P., Pinto J. G. Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012. V. № 64 (1). P. 17471. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17471>
- Chritin V., Bolognesi R., Gubler H. Flow Capt: a new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting // *Cold Regions Science and Technology*. 1999. № 30. P. 125–133.
- Drozhdov E., Toropov P., Androsova A., Gibadullin R., Gvozdeva A., Leusenko L., Melik-Bagdasarova A., Polyukhov A., Yarinich Y. The structure of blizzard transport and heat costs of sublimation of ice crystals in blizzards on the surface of the Elbrus Mountain glacier *Environ // Sci. Proc.* 2022. № 4. <https://doi.org/10.3390/ecas2022-12877>
- Essery R., Kim H., Wang L., Bartlett P., Boone A., Brutel-Vuilmet C., Burke E., Cuntz M., Decharme B., Dutra E., Fang X., Gusev Y., Hagemann S., Haverd V., Kontu A., Krinner G., Lafaysse M., Lejeune Y., Marke T., Marks D., Marty C., Menard C. B., Nasonova O., Nitta T., Pomeroy J., Schädler G., Semenov V., Smirnova T., Swenson S., Turkov D., Wever N., Yuan H. Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models // *The Cryosphere*. 2020. № 14. P. 4687–4698. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020>
- Hardy D. R., Vuille M., Bradley R. S. Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado Sajama, Bolivia // *Journ. of Geophys. Research*. 2003. № 108 (D22). P. 1–10. <https://doi.org/10.1029/2003JD003623>
- Hersbach H., Bel B., Berrisford P. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nat. Clim. Chang.* 2018. № 8 (2). P. 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- High Mountain Areas in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019). Lead authors R. Hock, G. Rasul, S. Kutuzov et al. 2019.
- Jaedicke C. Acoustic snowdrift measurements: Experiences from the Flow Capt instrument // *Cold Region Science Technology*. 2001. № 32. P. 71–81. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00017-9)
- Lehning M., Naaim F., Naaim M. Snow drift: acoustic sensors for avalanche warning and research // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2002. № 2 (3/4). P. 121–128.
- Marzeion B., Jarosch A. H., Gregory J. M. Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change // *The Cryosphere*. 2014. № 8. P. 59–71.
- Mölg T., Cullen N. J., Hardy D. R., Kaser J., Klok L. Mass balance of a slope glacier on Kilimanjaro and its sensitivity to climate // *Intern. Journ. of Climatology*. 2008. № 28. P. 881–892. <https://doi.org/10.1002/joc.1589>
- Rets E. P., Popovnin V. V., Toropov P. A., Smirnov A. M., Tokarev I. V., Chizhova Ju. 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. P. 1463–1481. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1463-2019>
- Rets E. P., Durmanov I. N., Kireeva M. B., Smirnov A. M., Popovnin V. V. Past “peak water” in The North Caucasus: deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges // *Climatic Change*. 2020. № 163. P. 2135–2151. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-020-02931>
- Shea J. M., Wagnon P., Immerzeel W. W., Biron R., Brun F., Pellicciotti F. A comparative high-altitude meteorological analysis from three catchments in the Nepalese Himalaya // *Intern. Journ. of Water Resources Development*. 2015. № 31 (2). P. 174–200. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1020417>
- Tielidze L. G., Wheate R. D. The Greater Caucasus glacier inventory // *The Cryosphere*. 2018. № 12. P. 81–94.
- Toropov P. A., Aleshina M. A., Grachev A. M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th– 21st century // *Intern. Journ. of Climatology*. 2019. № 39. P. 4703–4720. <https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Trouvilliez A., Naaim-Bouvet F., Bellot H., Genthon C., Gallée H. Evaluation of the FlowCapt Acoustic Sensor for the Aeolian Transport of Snow // *Journ. Atmos. Ocean. Technol.* 2015. № 32. P. 1630–1641. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00104.1>
- Wendler G. Blowing snow in eastern Antarctica // *Antarctic Journ. of the U. S. Review*. 1987. P. 264–265.
- WGMS (2021): *Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019)* / ed. by Zemp M., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Bannwart J., Paul F., Hoelzle M. Zurich, Switzerland: ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p.
- Zhang W., He J., Chen A., Wu X., Shen Y. Observations of Drifting Snow Using FlowCapt Sensors in the Southern Altai Mountains, Central Asia // *Water*. 2022. V. 14. 845 p. <https://doi.org/10.3390/w14060845>

Citation: Drozdov E. D., Toropov P. A., Avilov V. K., Artamonov A. Yu., Polyukhov A. A., Zheleznova I. V., Yarinich Yu. I. Meteorological regime of the Elbrus high-mountain zone during the accumulation period. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 025–040. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010022

Meteorological regime of the Elbrus high-mountain zone during the accumulation period

E. D. Drozdov^{a, b#}, P. A. Toropov^{a, b}, V. K. Avilov^c, A. Yu. Artamonov^d,
A. A. Polyukhov^{b, e}, I. V. Zheleznova^b, Yu. I. Yarinich^{b, d}

^a*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Institute of Problems of Ecology and Evolution A. N. Severtsov RAS, Moscow, Russia*

^d*Institute of Atmospheric Physics A. M. Obukhov RAS, Moscow, Russia*

^e*Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: drozdov.jeka@yandex.ru*

Received September 20, 2023; revised November 7, 2023; accepted March 31, 2024

Unique automated meteorological observations were carried out on the southern slope of Elbrus, near Pastukhov Rocks, at 4700 m a.s.l., during the 2021–2022 accumulation season. Data were obtained on air temperature, humidity, wind speed and direction, snowdrift and radiation fluxes with a temporal resolution of 1 minute or less. Analysis of the data series showed that the representative winter air temperature at this altitude on the southern slope of Elbrus is $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the minimum is $-36.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; the partial pressure of water vapor does not exceed 3.5 hPa. At the same time, the average daily maximum of wind speed amounted 13.1 m s^{-1} with the absolute maximum of 54.1 m/s. Snowstorms with a snow transport intensity of more $0.1\text{ kg/m}^2\text{s}^{-1}$ are quite common phenomenon in winter, while the maximum average value of the transport reaches $0.87\text{ kg/m}^2\text{s}^{-1}$. An empirical relationship was established between the average hourly wind speed and the maximum gust speed for the same period, and it was shown that for these conditions the wind gust exceeds the average hourly wind speed by 1.8 times, while the representative value of the standard deviation of wind speed is 5.8 m s^{-1} . This information may be useful not only for the glaciologic problems and modeling, but also for construction and engineering surveys, which are relevant in view of the present-day active development of the mountain ski infrastructure on the southern macro-slope of the Elbrus. In addition, the obtained series of instrumental observations were used to assess the quality of reanalysis data for high mountain regions taking as an example the ERA5. The ERA5 reanalysis was demonstrated to reproduce rather successfully the air temperature, wind speed and humidity in high mountain conditions, but extreme values for all these parameters are underestimated. Thus, the minimum temperature in winter turned out to be overestimated by $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the maximum was underestimated by $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, while the wind speed, according to the ERA5 reanalysis, never exceeded 40 m/s during the above observation period. It is also shown that the FlowCapt4 acoustic blizzard gauge (driftometer) can be used to estimate average wind speeds since it is less sensitive to severe high-altitude conditions compared to acoustic and cup anemometers.

Keywords: mountain meteorology, high-mountain meteorological observations, Elbrus climate, Garabashi Glacier, FlowCapt driftometer, ERA5 reanalysis

REFERENCES

- Baranov S., Pokrovskaya T. Study of the meteorological group ECSE1935 y. *Trudy El'brusskoj ekspedicii 1934 i 1935 gg.* Proc. of the Elbrus Expedition of 1934 and 1935. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1936: 199–209 [In Russian].
- Voloshina A. P. Radiation conditions during the ablation period. *Oledenenie Elbrusa*. Elbrus Glaciation. Moscow: MSU Publishing House, 1968: 158–168 [In Russian].
- Voloshina A. P. Meteorology of mountain glaciers. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 2001, 92: 3–148 [In Russian].

- Gandin L. S., Kagan R. L. Statisticheskie metody interpretatsii meteorologicheskikh dannyh. Statistical methods for interpreting meteorological data. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1976: 360 p. [In Russian].*
- Drozдов E. D., Turkov D. V., Toropov P. A., Artamonov A. Yu. Thermal regime of snow cover in winter in the high-mountainous part of Elbrus according to observational data and modeling results. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2023, 2 (63): 225–242. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020059> [In Russian].*
- Zverev A. S. Sinopticheskaya meteorologiya. Synoptic meteorology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 711 p. [In Russian].*
- Russia Glacier Inventory. Retrieved from: <https://www.glacrus.ru> (Last access: 15 July 2023) [In Russian].
- Kuksova N. E., Toropov P. A., Oleinikov A. D. Meteorological conditions of extreme avalanche formation in the Caucasus Mountains (according to observations and reanalysis). *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021, 3 (61): 377–390. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030095> [In Russian].*
- Lavrentiev I. I., Petrakov D. A., Kutuzov S. S., Kovalenko N. V., Smirnov A. M. Assessment of glacier lakes development potential in the Central Caucasus. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2020, 3 (60): 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044> [In Russian].*
- Ledniki i klimat Elbrusa. Glaciers and climate of Elbrus. Moscow, Saint Petersburg: Nestor-Istoria, 2020: 372 p. [In Russian].
- Monin A. S., Obukhov A. M. Basic principles of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Trudy GEOFIAN. Proc. of GEOPHYAS.* 1954, 24 (151): 163–187. [In Russian].*
- Oleinikov 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, 2 (59): 191–200. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-400> [In Russian].*
- Rototaeva O. V., Nosenko G. A., Kerimov A. M., Kutuzov S. S., Lavrentiev I. I., Nikitin S. A., Kerimov A. A., Tarasova L. N. Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2019, 1 (59): 5–22. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22> [In Russian].*
- Toropov P. A., Michalenko V. N., Kutuzov S. S., Morozova P. A., Shestakova A. A. Temperature and radiation regime of glaciers on the slopes of Elbrus during the ablation period over the past 65 years. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2016, 1 (56): 5–19. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-5-19> [In Russian].*
- Amory C. Drifting-snow statistics from multiple-year autonomous measurements in Adélie Land, East Antarctica. *The Cryosphere.* 2020, 14: 1713–1725. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1713-2020>*
- Barry R. G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008: 505 p.*
- Born K., Ludwig P., Pinto J. G. Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2012, 64: 17471. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17471>*
- Chritin V., Bolognesi R., Gubler H. Flow Capt: a new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting. *Cold Regions Science and Technology.* 1999, 30: 125–133.*
- Drozдов E., Toropov P., Androsova A., Gibadullin R., Gvozdeva A., Leusenko L., Melik-Bagdasarova A., Polyukhov A., Yarinich Y. The structure of blizzard transport and heat costs of sublimation of ice crystals in blizzards on the surface of the Elbrus Mountain glacier Environ. Sci. Proc. 2022, 4. <https://doi.org/10.3390/ecas2022-12877>*
- Essery R., Kim H., Wang L., Bartlett P., Boone A., Brutel-Vuilmet C., Burke E., Cuntz M., Decharme B., Dutra E., Fang X., Gusev Y., Hagemann S., Haverd V., Kontu A., Krinner G., Lafaysse M., Lejeune Y., Marke T., Marks D., Marty C., Menard C. B., Nasonova O., Nitta T., Pomeroy J., Schädler G., Semenov V., Smirnova T., Swenson S., Turkov D., Wever N., Yuan H. Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models. *The Cryosphere.* 2020, 14: 4687–4698. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020>*
- Hardy D. R., Vuille M., Bradley R. S. Variability of snow accumulation and isotopic composition on Nevado Sajama, Bolivia. *Journ. of Geophys. Research.* 2003, 108: 1–10. <https://doi.org/10.1029/2003JD003623>*
- Hersbach H., Bel B., Berrisford P. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>*
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat. Clim. Chang.* 2018, 8 (2): 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>*
- High Mountain Areas in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019). Lead authors R. Hock, G. Rasul, S. Kutuzov et al. 2019.
- Jaedicke C. Acoustic snowdrift measurements: Experiences from the Flow Capt instrument. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2001, 32: 71–81. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00017-9)*
- Lehning M., Naaim F., Naaim M. Snow drift: acoustic sensors for avalanche warning and research. *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2002, 2 (3/4): 121–128.*
- Marzeion B., Jarosch A. H., Gregory J. M. Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change. *The Cryosphere.* 2014, 8: 59–71.*
- Mölg T., Cullen N. J., Hardy D. R., Kaser J., Klok L. Mass balance of a slope glacier on Kilimanjaro and its sensitivity to climate. *Intern. Journ. of Climatology.* 2008, 28: 881–892. <https://doi.org/10.1002/joc.1589>*

- Rets E. P., Popovnin V. V., Toropov P. A., Smirnov A. M., Tokarev I. V., Chizhova Ju.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 Syst. Sci. Data.* 2019, 11: 1463–1481. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1463-2019>
- Rets E. P., Durmanov I. N., Kireeva M. B., Smirnov A. M., Popovnin V. V.* Past “peak water” in The North Caucasus: deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges. *Climatic Change.* 2020, 163: 2135–2151. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-020-02931>
- Shea J. M., Wagnon P., Immerzeel W. W., Biron R., Brun F., Pellicciotti F.* A comparative high-altitude meteorological analysis from three catchments in the Nepalese Himalaya. *Inter. Journ. of water resources development.* 2015, 31: 174–200. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1020417>
- Tielidze L. G., Wheate R. D.* The Greater Caucasus glacier inventory. *The Cryosphere.* 2018, 12: 81–94.
- Toropov P. A., Aleshina M. A., Grachev A. M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th – 21st century. *International Journ. of Climatology.* 2019, 39: 4703–4720.
- Trouvilliez A., Naaim-Bouvet F., Bellot H., Genthon C., Gallée H.* Evaluation of the FlowCapt Acoustic Sensor for the Aeolian Transport of Snow. *Journ. Atmos. Ocean. Technol.* 2015, 32: 1630–164. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00104.1>
- Wendler G.* Blowing snow in eastern Antarctica. *Antarctic Journ. of the U. S. Review.* 1987: 264–265.
- WGMS (2021): Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). Zürich, Switzerland: ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, 2021: 278 p.
- Zhang W., He J., Chen A., Wu X., Shen Y.* Observations of Drifting Snow Using FlowCapt Sensors in the Southern Altai Mountains, Central Asia. *Water.* 2022, 14: 845. <https://doi.org/10.3390/w14060845>