



Federal Ministry
for the Environment, Climate Action,
Nature Conservation and Nuclear Safety



INTERNATIONAL
CLIMATE
INITIATIVE



**ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ВОДОЙ,
ЭНЕРГИЕЙ И ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЕМ**
Системные решения для климатически устойчивой Центральной Азии

ТАЯНИЕ ЭПОХИ: ПОСЛЕДСТВИЯ ИСЧЕЗНОВЕНИЯ ЛЕДНИКОВ



НИЦ МКВК

Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной
водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

Ташкент 2025

Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

Таяние эпохи: последствия исчезновения ледников

Ташкент 2025

Подготовлено и издано при финансовой поддержке проекта «Региональные механизмы для низкоуглеродной и климатоустойчивой трансформации взаимосвязи энергии, воды и земли в Центральной Азии», реализуемого ОЭСР, НИЦ МКВК и ЕЭК ООН за счет средств Федерального министерства окружающей среды, борьбы с изменением климата, охраны природы и ядерной безопасности (BMUKN) в рамках Международной климатической инициативы (IKI)

Содержание

Глобальный контекст.....	4
Мониторинг ледников из космоса имеет решающее значение и находится под угрозой	4
Одна из самых тревожных тенденций на планете — ледники мира потеряли 450 гигатонн льда в 2024 году.....	12
Новое исследование показало, как ледники борются с изменением климата	13
Отступление горных ледников замедлит поступление нутриентов в Мировой океан	14
Ледники борются с изменением климата, но, похоже, проигрывают	16
Ледники скоро потеряют способность охлаждать воздух	19
Ледник Гектория в Антарктиде потерял пятую часть площади за год ...	20
Температуру поверхности связали с сезонным ростом скорости ледников	22
В Science Daily рассказали о стремительном ослаблении ледника Туэйтса	23
Что будет с планетой, если на ней растает весь лед.....	25
Центральная Азия.....	32
Последние стабильные ледники Центральной Азии начали разрушаться	32
Будущее Центральной Азии тает вместе с ее ледниками	36
Ледяная бомба: тающие ледники угрожают плотинам Центральной Азии	39
Кыргызские инженеры запатентовали универсальную стойку искусственного ледника	41
Европа.....	43
Таяние ледников ставит под угрозу гидроэнергетику Швейцарии	43

Глобальный контекст

Мониторинг ледников из космоса имеет решающее значение и находится под угрозой¹

Майкл Земп, Ливия Якоб, Фанни Брун,
Тайлер Саттерли, Брайан Менунос

С момента 2000 г. Земля утратила около 5% своей глобальной ледниковой массы — к такому выводу пришли авторы нового исследования, основанного на усилиях международного научного сообщества. Работа подчёркивает важность космических наблюдений за ледниками, а также указывает на существующие пробелы в их долгосрочном мониторинге.

Сокращение ледников является одним из наиболее наглядных признаков продолжающегося антропогенного изменения климата. Их таяние не только изменяет ландшафты, но также усиливает локальные геологические риски, влияет на региональную доступность пресной воды и способствует повышению уровня мирового океана.

Наблюдения, проводимые по всему миру, свидетельствуют о том, что глобальное таяние ледников в начале XXI века стало беспрецедентным в историческом контексте. Согласно результатам моделирования, на каждый килограмм выбросов углекислого газа (CO₂) приходится в среднем 16 кг растаявшего ледникового льда. Дополнительные исследования показывают, что каждый сантиметр повышения уровня моря ежегодно увеличивает количество людей, подверженных риску наводнений, ещё на 2–3 млн человек.

Уже более 130 лет Всемирная служба мониторинга ледников (и её предшественные организации) координирует международные усилия по наблюдению за ледниками. Эта работа началась с систематического сбора, анализа и распространения данных полевых наблюдений по всему миру [Всемирная служба мониторинга ледников, 2023]. В XX веке к ним начали добавляться данные дистанционного зондирования, полученные с самолётов и космических аппаратов, что позволило значительно расширить охват и точность мониторинга.

¹ Источник: Michael Zemp, Livia Jakob, Fanny Brun, Tyler Sutterley and Brian Menounos. Glacier Monitoring from Space Is Crucial, and at Risk / <https://eos.org/opinions/glacier-monitoring-from-space-is-crucial-and-at-risk> Опубликовано 8.08.2025

За последние два десятилетия наука значительно продвинулась в понимании изменений массы ледников благодаря множеству космических миссий и разнообразным стратегиям оценки как на региональном, так и на глобальном уровнях (см. рис. 2 в работе Бертье и др. [2023]). Однако проведение таких исследований сопряжено с определёнными трудностями — в первую очередь из-за зависимости от открытого доступа к данным наблюдений, получаемым со спутников, предназначенных для научных целей. На сегодняшний день продолжение работы нескольких ключевых спутниковых миссий находится под угрозой, что может привести к серьёзным пробелам в возможностях наблюдения за ледниками из космоса.

В данной статье рассматриваются история развития методов мониторинга, а также сильные и слабые стороны различных стратегий отслеживания изменений ледников. Особое внимание уделено тому, как объединение данных, полученных с использованием различных подходов, позволяет повысить точность оценки изменений ледниковой массы — на примере недавнего масштабного исследования, проведённого научным сообществом. Кроме того, обсуждаются меры, необходимые для обеспечения устойчивого и долгосрочного наблюдения за ледниками в будущем.

Сравнение методов оценки баланса массы ледников

Гляциологические наблюдения, основанные на измерениях абляции и аккумуляции непосредственно на месте (*in situ*) — как правило, с использованием абляционных вех и снежных шурфов — составляют основу традиционного мониторинга баланса массы ледников. В течение более 30 лет гляциологи проводят такие измерения на 60 эталонных ледниках по всему миру, причём на некоторых из них наблюдения ведутся с начала XX века.

Эти данные обеспечивают надёжную оценку межгодовой изменчивости баланса массы и играют ключевую роль в понимании гляциологических процессов, калибровке моделей и долгосрочном мониторинге. Однако, из-за ограниченного пространственного охвата, натурные наблюдения не всегда точно отражают тенденции изменения массы ледников во всех регионах. В частности, в некоторых зонах с высокой степенью оледенения охват остаётся критически низким.

Аэрогеодезические исследования позволяют получить более полное представление о состоянии отдельных ледников по сравнению с точечными наземными измерениями. Сопоставление изменений высоты ледника на основе данных, полученных с воздуха, помогает учёным выявлять и количественно оценивать возможные погрешности полевых наблюдений на

уровне всего ледника [Zemp и др., 2013]. Дополнительно, геодезические методы, основанные на данных дистанционного зондирования с космических аппаратов, предоставляют широкие возможности для оценки изменений высоты и массы ледников как на региональном, так и на глобальном уровнях.

В рамках проекта по сравнению баланса массы ледников (GlaMBIE), начатого в 2022 г., были объединены данные, полученные как методами *in situ*, так и средствами дистанционного зондирования. В результате удалось собрать 233 оценки региональных изменений массы ледников, предоставленные примерно 450 источниками данных, объединёнными в 35 исследовательских групп.

Результаты этого масштабного совместного проекта, опубликованные в феврале 2025 г., свидетельствуют о том, что с 2000 г. ледники потеряли от 2% до 39% своей массы в зависимости от региона, и около 5% — в глобальном масштабе [The GlaMBIE Team, 2025]. Эти совокупные потери составляют приблизительно 273 Гт/год, что вносит вклад в повышение среднего уровня мирового океана на 0,75 мм ежегодно. Для сравнения: согласно последним оценкам по ледяным щитам [Otosaka и др., 2023], потери массы ледников примерно на 18% превышают потери Гренландского ледяного щита и более чем в два раза превышают потери Антарктического.

Проект GlaMBIE стал первой комплексной попыткой интеграции измерений изменений массы ледников, полученных на основе гетерогенных источников данных — как наземных, так и спутниковых. Помимо создания новой обобщённой базы данных для оценки глобальных изменений ледников и их последствий, проект также выявил как потенциал существующих методов мониторинга из космоса, так и текущие вызовы, требующие дальнейших решений [Бертъе и др., 2023].

Стратегии мониторинга ледников из космоса

В рамках проекта GlaMBIE используются различные технологии и подходы для изучения ледников с помощью спутниковых данных. Многие из этих методов основаны на многократном картировании высот поверхности, что позволяет создавать цифровые модели рельефа (ЦМР) и отслеживать изменения высоты ледников. Такой подход даёт многолетние данные об изменениях объёма ледников, однако требует дополнительных предположений о плотности снега, фирна и льда для преобразования объёмных изменений в эквивалентные изменения массы. Это вносит определённую неопределённость, поскольку коэффициенты пересчёта могут значительно варьироваться в зависимости от условий.

Одним из широко применяемых методов является оптическая стереофотограмметрия, основанная на анализе спутниковых снимков. Например, обработка изображений, полученных с помощью усовершенствованного космического термоэмиссионного и отражательного радиометра (ASTER), установленного на борту спутника *Terra*, позволила оценить изменения высоты ледников с горизонтальным разрешением 100 м практически по всей поверхности Земли за период с 2000 по 2019 гг. [Hugonnet и др., 2021]. Для более детальных региональных исследований возможно применение спутников с высоким пространственным разрешением. Среди них — спутники серии *SPOT* (Satellite pour l'Observation de la Terre), а также *GeoEye*, *Pléiades* и *WorldView*, данные которых позволяют проводить анализ на более точном уровне.

Для оценки изменений высоты ледников были использованы данные двух спутниковых миссий, применяющих интерферометрию с использованием радиолокатора синтезированной апертуры (SAR). В феврале 2000 года миссия *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) получила почти глобальную цифровую модель рельефа с пространственным разрешением 30 метров. Вторая миссия — *TanDEM-X* (дополнение к *TerraSAR-X* для цифрового картирования рельефа) — функционирует с 2010 г. и предоставляет цифровые модели рельефа по всему миру с шагом пикселей 12 м.

Высокое пространственное разрешение, а также способность радиолокационных сигналов проникать сквозь облачность делают данные обеих миссий ценными для оценки изменений высоты ледников во многих горных регионах [Braun и др., 2019]. Однако существует ряд неопределённостей, связанных с использованием радаров С- и Х-диапазонов, применявшихся в SRTM и *TanDEM-X*. В частности, измерения могут быть искажены из-за сложного рельефа высокогорных территорий, а также способности радиолокационных сигналов проникать в снег и фирн, что затрудняет точное определение высоты ледниковой поверхности.

Лазерная и радиолокационная альтиметрия позволяют измерять изменения высоты ледников вдоль орбитальных трасс или полос движения спутников. Эти данные затем могут быть агрегированы для получения региональных оценок изменений ледниковой массы. Лазерная альтиметрия использовалась в рамках миссий NASA, включая спутники *ICESat* и *ICESat-2*, а также прибор *GED* (Global Ecosystem Dynamics Investigation), установленный на борту Международной космической станции (МКС) [Menounos и др., 2024; Treichler и др., 2019].

Радиолокационная альтиметрия изначально применялась для наблюдений за уровнем моря и рельефом суши, однако ранние миссии, такие как *ERS* и *Envisat*, сталкивались с трудностями при работе в горных регионах, включая ледниковые зоны. Это было связано с широкой зоной зондирова-

ния и ограниченным пространственным разрешением. Значительный прогресс был достигнут с запуском спутника *CryoSat-2* Европейского космического агентства (ESA) в 2010 г. Благодаря улучшенному покрытию полярных широт, более высокой плотности наблюдений и усовершенствованной системе проецирования, *CryoSat-2* открыл новые возможности для мониторинга глобальных изменений высоты ледников [Jakob и Gourmelen, 2023].

Как лазерная, так и радиолокационная альтиметрия позволяют получать временные ряды изменений высоты с ежемесячным или ежеквартальным разрешением для регионов с крупными ледяными шапками и ледяными полями, таких как Аляска, Канадская Арктика, Шпицберген, а также периферия Гренландского и Антарктического ледниковых щитов. Однако оценка горных регионов с небольшими ледниками (например, Скандинавия, Центральная Европа, Кавказ и Новая Зеландия) остаётся сложной задачей из-за сложного рельефа и ограниченного пространственного охвата спутниковых данных.

Космическая гравиметрия предлагает альтернативный подход, не основанный на измерении высоты. Этот метод позволяет учёным оценивать изменения массы в океанах, водоёмах и ледяных пластах путём измерения изменений гравитационного поля Земли. Практически непрерывные измерения такого рода проводились с 2002 г. двумя миссиями: *GRACE* (Gravity Recovery and Climate Experiment) — совместным экспериментом NASA и Германского аэрокосмического центра (DLR), а также её преемницей — миссией *GRACE-FO* Центра геологических наук имени Гельмгольца (NASA/GFZ).

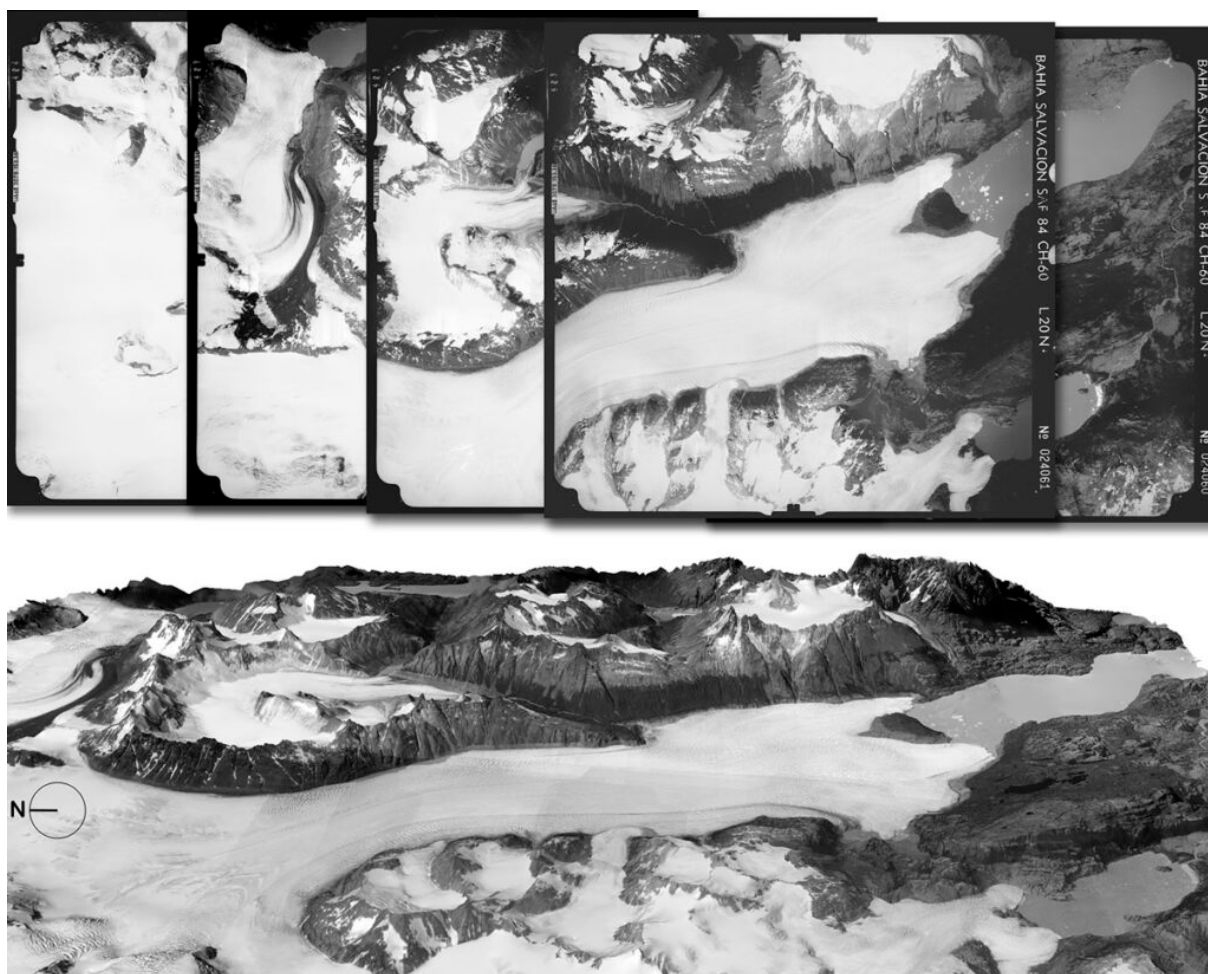
Гравиметрия обеспечивает более прямую оценку изменений массы ледников по сравнению с другими методами [Wouters и др., 2019]. Однако данные требуют корректировки с учётом влияния атмосферного давления и океанической изменчивости, процессов изостатического регулирования ледников, гидрологических особенностей на прилегающих неледниковых территориях и других факторов [Berthier и др., 2023].

Оценки, получаемые миссиями *GRACE* и *GRACE-FO*, наиболее релевантны для регионов с большими ледниковыми покровами площадью свыше 15 000 квадратных километров. Это связано с относительно грубым пространственным разрешением гравитационных данных — порядка нескольких сотен километров — а также с трудностями, возникающими при низком соотношении сигнал/шум в регионах с небольшими ледниками и соответствующими малыми изменениями массы.

Обеспечение долгосрочного мониторинга ледников

Работа проекта GlaMBIE по интеграции наблюдений, полученных различными методами, выявила ряд взаимосвязанных требований и проблем, которые необходимо решить для повышения полноты оценок глобальных изменений ледников и обеспечения эффективного долгосрочного мониторинга.

Во-первых, необходимо расширить существующую сеть натурных гляциологических наблюдений, чтобы устранить серьёзные пробелы в данных. Такие пробелы сохраняются во многих регионах, включая Центральную Азию, Каракорум, Куньлунь и Центральные Анды — регионы, где ледники играют ключевую роль в обеспечении пресной водой. Также это актуально для полярных областей, где ледники существенно влияют на повышение уровня моря. Кроме того, существующие наблюдательные сети следует модернизировать для обеспечения мониторинга в режиме реального времени. Это позволит улучшить понимание динамики ледниковых процессов и повысит качество калибровки и валидации данных дистанционного зондирования и численного моделирования.



*Серия аэрофотоснимков, сделанных в 1980 году с высоты около 11 000 метров над уровнем моря на леднике Грей в Южно-Патагонском ледяном поле (вверху), была использована для создания трёхмерной модели ледника (внизу).
Источники: 3D-реконструкция Ливии Пьерматтей и Камило Рады с использованием изображений Службы аэрофотограмметрии Чилийских ВВС (SAF).*

Во-вторых, необходимо продолжать раскрывать и использовать исторические архивы воздушных и космических миссий для расширения пространственно-временного охвата наблюдений, применяемых при оценке изменений массы ледников. Данные рассекреченных спутников-шпионов, таких как *CORONA* и *Hexagon*, предоставляют стереонаблюдения с горизонтальным разрешением в несколько метров и открывают перспективы оценки изменений высоты ледников, начиная с 1960–1970-х гг. Аэрофотосъемка даёт уникальную возможность реконструировать изменения ледников с начала XX века, что подтверждается примерами из таких регионов, как Шпицберген, Гренландия и Антарктида. Помимо индивидуальных и институциональных исследований, крайне важен открытый доступ ко всем национальным архивам исторических изображений. Это позволит сохранить и использовать записи прошлых изменений ледников в глобальном масштабе для комплексного анализа и мониторинга.

В-третьих, необходимо обеспечить непрерывность космического мониторинга ледников с использованием датчиков открытого доступа и высокого пространственного разрешения, следуя успешным примерам миссий *Sentinel*, *SPOT 5* и *Pléiades*. Для оптических датчиков особенно остро стоит задача запуска новых миссий, способных обеспечивать сбор стереоизображений высокого разрешения с открытым доступом. Предстоящая миссия Французского космического агентства *CO3D* (*Constellation Optique en 3D*), запуск которой запланирован на 2025 год, может существенно помочь в решении этой задачи, при условии, что её данные будут общедоступны. В то же время, учитывая ожидаемое завершение работы инструмента *ASTER* [Berthier и др., 2024] и приостановку производства новых продуктов *ArcticDEM* и *REMA* (*Reference Elevation Model of Antarctica*), основанных на спутниковых данных *WorldView* вследствие недавних сокращений финансирования в США, крайне необходимы дополнительные миссии-заменители. Они должны обеспечить продолжение наблюдений за изменениями высоты ледников на локальном уровне.

Для радиолокационной съёмки и альтиметрии миссия *SAR TanDEM-X* и радиолокационный высотометр *CryoSat-2* продолжают работать с ожидаемым продлением до конца 2020-х гг. Запуск миссии *Harmony* Европей-

ского космического агентства (ESA), оснащённой радиолокационным синтезированным апертурным радаром (SAR), запланирован на 2029 г. С выходом альтиметра для измерения топографии полярного льда и снега *Copernicus CRISTAL*, запуск которого намечен на 2027 г., ESA планирует создать долгосрочную программу мониторинга криосферы.

Основной сложностью для миссии *CRISTAL* станет обеспечение соответствия характеристик её сенсоров и параметров миссии специфическим требованиям мониторинга ледников. Эта задача усложняется относительно малыми размерами ледников, крутыми склонами и их расположением в горной местности. В случае перерыва между завершением программы *CryoSat-2* и началом программы *CRISTAL* потребуется организация воздушной операции, аналогичной операции NASA *IceBridge*, которая выполняла функцию переходного звена между спутниками *ICESat* и *ICESat-2*.

В области лазерной альтиметрии существует риск возникновения пробелов в наблюдениях, так как продолжение текущих научных миссий *ICESat-2* и *GEDI* не планируется. Ожидается, что *ICESat-2*, который измеряет рельеф ледников Земли и служит точкой проверки и корреляции для других альтиметрических миссий, будет работать до начала–середины 2030-х гг. Тем не менее подготовку к следующим миссиям следует начинать уже сейчас. Будущие проекты должны сочетать высокую точность измерений с полным пространственным охватом отдельных ледников. Предлагаемые концепции, использующие лидар с широким углом обзора, такие как *EDGE* (Earth Dynamics Geodetic Explorer) и *CASALS* (Concurrent Artificially-Intelligent Spectrometry and Adaptive Lidar System), способны существенно изменить ситуацию, обеспечив многократное картирование с полным охватом топографии ледников. Продвижение наблюдений рельефа поверхности и растительности (STV) в качестве целевой задачи для миссий NASA, как рекомендовано в Десятилетнем обзоре Национальных академий 2017–2027 гг., может расширить масштабы подобных наблюдений за пределы текущих научных программ.

Что касается гравиметрии, существует потенциальный пробел в наблюдениях, связанный с неопределённостью сроков выведения из эксплуатации миссии *GRACE-FO* и запуском одобренных последующих проектов — *GRACE-C* и *NGGM* (Next Generation Gravity Mission). Независимо от дат запуска, эффективность будущих миссий для мониторинга изменений массы ледников в различных регионах будет во многом зависеть от пространственного разрешения данных и от способности отделять гравитационные сигналы ледниковых масс от сигналов неледниковых источников. Совместные гравитационные миссии, такие как *Mass-Change* и *Geosciences International Constellation* (MAGIC) — планируемый совместный проект NASA и ESA с четырьмя спутниками, работающими парами —

способны значительно повысить как пространственное, так и временное разрешение гравитационных данных, что существенно улучшит возможности мониторинга ледников.

Собираем все вместе

Ледники по всему миру тают из-за глобального потепления с пугающей скоростью, что сказывается на геологических рисках, запасах пресной воды и повышении уровня мирового океана. Для глубокого понимания изменений ледников в различных регионах и их влияния на сообщества необходимо объединить тщательные наблюдения, полученные с помощью разнообразных методов: полевых, воздушных и, всё чаще, космических.

В условиях существующих и прогнозируемых пробелов в наблюдениях научное сообщество, государственные органы и международные организации должны совместно работать над расширением доступа к историческим данным и развитием современных систем мониторинга. В первую очередь космические агентства и страны-спонсоры должны оперативно планировать замену и улучшение спутниковых миссий, обеспечивая долгосрочный мониторинг ледников из космоса. Учитывая климатический кризис, также необходим открытый научный доступ к данным коммерческих и оборонных спутниковых миссий для восполнения пробелов и дополнения гражданских наблюдений.

Как показала работа проекта *GlaMBIE*, чем полнее наши наборы данных, тем точнее мы сможем понять и количественно оценить изменения ледников и связанные с ними последствия для экосистем и обществ.

Одна из самых тревожных тенденций на планете — ледники мира потеряли 450 гигатонн льда в 2024 году²

Таяние ледников в 2024 году происходило во всех регионах мира, гласит исследование Всемирной метеорологической организации. Эта тенденция фиксируется уже третий год подряд, передает «МИР 24».

² Источник: <https://khovar.tj/rus/2025/09/odna-iz-samyh-trevozhnyh-tendentsij-na-planete-ledniki-mira-poteryali-450-gigatonn-lda-v-2024-godu/> Опубликовано 22.09.2025

Общую потерю льда оценили в 450 гигатонн. Это эквивалентно глыбе в 7 км высотой, 7 км шириной и 7 км глубиной. Такое количество талой воды могло бы заполнить 180 млн олимпийских бассейнов.

Уровень моря в 2024 году вырос на 1,2 мм. Этот показатель может показаться незначительным, однако на самом деле за ним кроется повышение риска наводнений для сотен миллионов людей, проживающих в прибрежных зонах.

Рекордные потери ледниковой массы произошли в Скандинавии, на Шпицбергене и в Северной Азии. Близкие к тропикам ледники Колумбии потеряли за год 5 %, сообщается на сайте ведомства.

Эксперты отметили, что круговорот воды на всей планете становится все более неустойчивым и экстремальным, из-за чего растет количество как наводнений, так и засух. Это ставит под угрозу не только природные экосистемы, но и экономики стран, безопасность людей. Так, в 2024 году лишь около трети речных бассейнов мира имели нормальные условия. В остальных наблюдался либо дефицит, либо переизбыток воды. Подобный дисбаланс отмечается уже шестой год подряд. Авторы доклада указали на все более серьезные опасности, связанные с водой, и отметили важность защиты водных ресурсов.

Новое исследование показало, как ледники борются с изменением климата³

Новое исследование показало, что ледники обладают собственным механизмом борьбы с изменением климата, однако этой защиты оказывается недостаточно, чтобы остановить их повсеместное таяние. Ученые обнаружили сложный процесс обратной связи, при котором талая вода, стекающая с ледников, замедляет их дальнейшее разрушение, но в долгосрочной перспективе ледники все равно проигрывают в этой битве. Этот естественный механизм самосохранения работает следующим образом: по мере таяния ледники сбрасывают в океан огромные объемы холодной пресной воды. Эта вода, будучи менее плотной, чем соленая океанская, формирует у основания ледника своего рода «прохладный буфер». Этот защитный слой временно изолирует лед от более теплых океанских вод, тем самым замедляя скорость подводного таяния.

³ Источник: <http://www.pogodaiklimat.ru/news/25608/> Опубликовано 13.10.2025

К таким выводам пришла группа исследователей под руководством Университета Аберистуита, которая использовала сочетание компьютерного моделирования океанских фьордов и данных наблюдений из Гренландии. Было установлено, что данный эффект наиболее выражен у крупных, быстро движущихся ледников, которые выходят прямо в море. Именно эти ледниковые гиганты способны создавать наиболее мощный защитный слой холодной воды. Несмотря на существование этого поразительного механизма саморегуляции, он не в силах переломить общую тенденцию. Ледники по всему миру продолжают отступать с угрожающей скоростью под воздействием глобального потепления. Защитный «прохладный буфер» является лишь временной и локальной мерой, которая не может остановить масштабное таяние, вызванное повышением температуры атмосферы и океана.

Таким образом, хотя ледники и «сражаются» с изменением климата, они ведут проигрышную битву. Понимание этого сложного процесса обратной связи имеет решающее значение для климатологии. Ученые подчеркивают необходимость включения этих данных в климатические модели для более точного прогнозирования скорости подъема уровня мирового океана и оценки последствий глобального потепления.

Отступление горных ледников замедлит поступление нутриентов в Мировой океан⁴

Проведенные учеными замеры показали, что состав талых вод существенным образом отличался, несмотря на то, что они движутся по поверхности одних и тех же отложений горных пород и сформировались в схожих условиях

Американские геохимики обнаружили свидетельства того, что дальнейшее сокращение в площади горных ледников приведет к существенному замедлению притока железа, марганца и других важных микроэлементов и нутриентов в Мировой океан. Это негативно повлияет на состояние популяций фитопланктона и всех зависящих от них обитателей гидросферы, сообщила пресс-служба Университета Калифорнии в Сан-Диего (UCSD).

«Если результаты наших замеров совпадут с данными из других регионов мира, то последствия от этих перемен во взаимодействиях ледни-

⁴ Источник: <https://nauka.tass.ru/nauka/25417009> Опубликовано 22.10.2025

ков с гидросферой выйдут далеко за пределы процессов, непосредственно связанных с ледниками. В частности, это может оказать существенное влияние на морские экосистемы и негативным образом повлиять на состояние мировых рыбных ресурсов», - пояснила доцент UCSD Сара Эронс, чьи слова приводит пресс-служба вуза.

Как отмечают исследователи, горные ледники, наряду с полярными ледовыми шапками, активно сокращаются в площади в последние несколько десятилетий в результате глобального потепления, что в особенности характерно для гор в высоких широтах. Данные процессы не только ведут к росту уровня моря и к негативным переменам в доступности питьевой и пресной воды, но и они могут существенным образом влиять на химический баланс гидросферы.

Руководствуясь этой идеей, ученые впервые детально изучили то, как отступление Северо-Восточного ледника на полуострове Кенай на Аляске повлияло на состав вырабатываемых им талых вод и присутствующих в них частиц минералов. По словам ученых, данный ледовый массив отступил от своего изначального положения в середине прошлого столетия примерно на 15 км, тогда как его ближайший «сосед», ледник Айялик, почти не изменился за это же время.

Проведенные учеными замеры показали, что состав талых вод для того и другого ледника существенным образом отличался, несмотря на то, что они движутся по поверхности одних и тех же отложений горных пород и сформировались в схожих условиях. В частности, геохимики обнаружили, что во влаге, поступавшей из Северо-Восточного ледника, доли биодоступного железа и марганца были на 38-73% ниже, чем в талой воде из Айялика.

Как предполагают ученые, эти различия связаны с тем, что талая вода из отступившего ледника дольше движется по суше в сторону моря, в результате чего частицы минералов имеют больше возможностей вступить в реакции с различными молекулами, присутствующими в окружающей среде. Это приводит к вымыванию биодоступных микроэлементов и их преобразованию в другие формы, недоступные для обитателей океана, что может негативно повлиять на их продуктивность, подытожили геохимики.

Ледники борются с изменением климата, но, похоже, проигрывают⁵

На первый взгляд, кажется, что ледники способны противостоять его воздействию, охлаждая воздух, соприкасающийся с их ледяной поверхностью. Однако этот природный механизм защиты может вскоре исчерпать себя. Учёные из группы Франчески Пелличчотти Института науки и технологий Австрии (ISTA) собрали и проанализировали обширный набор данных наблюдений за ледниками, представив новый взгляд на это явление.

Согласно их исследованию, опубликованному в журнале «Nature Climate Change», ледники достигнут пика своей способности к саморегулирующему охлаждению уже в следующем десятилетии. После этого, по прогнозам, температура вблизи поверхности льда начнёт расти быстрее, что приведёт к ускоренному таянию и отступлению ледников.

Научный сотрудник Томас Шоу живо вспоминает летний день августа 2022 года, ставший одним из ключевых моментов его полевых исследований. Работая под руководством Франчески Пелличчотти в ISTA, Шоу стоял на вершине ледника де Корбасьер в Швейцарии, на высоте 2600 метров над уровнем моря, собирая данные о его состоянии. Погода обманывала своей мягкостью — ясное небо и 17 градусов тепла, что необычно для человека, стоящего на леднике.

Так действительно ли ледники «сохраняют свой холод» слишком хорошо? Несмотря на продолжающийся рост средних глобальных температур, поверхность ледников прогревается медленнее. В Гималаях, где находятся одни из крупнейших ледников планеты, потоки холодного воздуха нисходят по их склонам, формируя ветра, которые помогают защищать их экосистемы. Однако учёные предупреждают: этот процесс самоохлаждения нельзя считать проявлением долгосрочной устойчивости — скорее, это кратковременная реакция на потепление климата.

Новое исследование под руководством Шоу показывает, что пик этой реакции ледников, вероятно, придётся на 2030-е годы. «Чем сильнее нагревается климат, тем активнее ледники будут охлаждать собственный микроклимат и прилегающие территории», — поясняет Шоу. «Но этот эффект будет недолговечным, и уже до середины века тенденция изменится». После этого, по словам исследователей, процесс таяния и дробления ледников, вызванный деятельностью человека, ускорится, а температура у по-

⁵ Источник: Glaciers Are Fighting Against Climate Change – But They Are Losing the Battle / <https://scitechdaily.com/glaciers-are-fighting-against-climate-change-but-they-are-losing-the-battle/> Опубликовано 12.10.2025

верхности начнёт расти гораздо быстрее, приближая их к окончательному разрушению.

Крупные ледники и холодные ветра

Понимание локальных климатических эффектов в самых труднодоступных уголках планеты и их отображение в глобальном масштабе требует колоссальных усилий. Часто на местах просто отсутствуют необходимые данные.

Это создаёт серьёзные трудности в обеспечении точности вычислительных моделей, предназначенных для моделирования детальных изменений климата. Когда Франческа Пелличотти и её коллеги впервые увидели данные, собранные на климатической станции, расположенной на высоте 5000 метров на склонах Эвереста, они едва поверили своим глазам.

«После тщательного анализа мы поняли, что летом ледники реагируют на потепление воздуха, усиливая теплообмен на своей поверхности», — рассказывает Пелличотти.

Из-за огромных размеров гималайских ледников это приводит к охлаждению больших масс воздуха, находящихся в непосредственном контакте с их поверхностью. «Эти плотные, холодные воздушные массы затем опускаются вниз по склонам под действием силы тяжести — явление, известное как кatabатические ветра». Похожие процессы наблюдаются и на других крупных ледниках мира.

Учёные прилагают дополнительные усилия

Теперь Шоу поставил перед собой задачу создать надёжную глобальную модель, которая позволит преодолеть ограничения, вызванные нехваткой данных. Он разработал новый метод, оценивающий, как долго ледники по всему миру смогут продолжать справляться с климатическими изменениями.

«Мы собрали данные из прошлых и текущих проектов нашей исследовательской группы, объединили их с уже опубликованными материалами и обратились к коллегам по всему миру с просьбой поделиться неопубликованными данными», — рассказывает Шоу. — «Используя этот беспрецедентный набор данных, мы заново проанализировали физические процессы, чтобы выявить общие закономерности, и разработали статистическую модель, позволяющую заглянуть в будущее эволюции охлаждающего эффекта ледников по всему миру».

Пик охлаждения

Шоу и его команда собрали обширную базу почасовых данных с 350 метеостанций, расположенных на 62 ледниках по всему миру, в совокупности это 169 летних полевых кампаний. Учёные сосредоточились на соотношении между температурой воздуха у поверхности ледника и температурой окружающего, «неледникового» воздуха непосредственно над каждой станцией, анализируя эти показатели в пространстве и во времени.

«Мы называем эту разницу температур расхождением, поскольку она идёт вразрез с общим потеплением окружающей атмосферы», — объясняет Шоу. Исследователи установили, что в среднем температура воздуха у поверхности горных ледников по всему миру повышалась на 0,83 °C на каждый градус роста температуры окружающего воздуха.

Учёные также изучили свойства ледников, которые могут ограничивать эффект расхождения, например наличие покрова из обломочного материала в нижних частях ледников, и учли эти факторы при уточнении своей модели. Моделируя будущие климатические сценарии, команда показала, что эффект охлаждения достигнет своего пика в период между 2020-ми и 2040-ми годами. После этого устойчивое сокращение массы ледников приведёт к их масштабному отступлению и смене тенденции охлаждения на противоположную. «К тому времени сильно деградировавшие ледники вновь “сойдутся” с постоянно теплеющей атмосферой — и этим будет предрешена их судьба», — подытоживает Шоу.

Осознание потерь и координация будущих действий

Хотя прогноз рисует мрачную картину будущего для величественных «водонапорных башен» планеты, он имеет и практические последствия, если нынешняя тенденция сохранится. «Осознание того, что способность ледников к самохлаждению продержится ещё немного, может дать нам дополнительное время для оптимизации систем управления водными ресурсами в ближайшие десятилетия», — отмечает Шоу.

При этом команда учёных ясно понимает: спасти или восстановить горные ледники мира уже невозможно. «Мы должны принять неизбежные потери льда и направить все усилия не на неэффективные геоинженерные методы — вроде засева облаков или укрывания ледников плёнкой, — а на сдерживание дальнейшего потепления климата. Подобные меры — не более чем дорогая повязка на огнестрельной ране. В грядущие десятилетия

нам предстоит время для осмысления, рационального управления водными ресурсами и активных действий, направленных на изменение общественного сознания в отношении антропогенного изменения климата».

Исследователи также подчёркивают необходимость согласованных глобальных климатических мер, направленных на радикальное сокращение выбросов и защиту человечества от непредсказуемых последствий глобального потепления. «Каждая доля градуса имеет значение», — говорит Шоу, в унисон учёным, которые повторяют это уже на протяжении десятилетий.

Ссылка: “Mountain glaciers recouple to atmospheric warming over the twenty-first century” by Thomas E. Shaw, Evan S. Miles, Michael McCarthy, Pascal Buri, Nicolas Guyennon, Franco Salerno, Luca Carturan, Benjamin Brock and Francesca Pellicciotti, 10 October 2025, Nature Climate Change. DOI: [10.1038/s41558-025-02449-0](https://doi.org/10.1038/s41558-025-02449-0)

Ледники скоро потеряют способность охлаждать воздух⁶

Ледники временно противостоят глобальному потеплению, охлаждая воздух, который проходит над их поверхностями. Однако исследователи из группы Пелличчотти в Институте науки и технологий Австрии (ISTA), перепроанализировав глобальную базу данных о ледниках, пришли к выводу, что эта естественная защита скоро ослабнет. Исследование, опубликованное в журнале *Nature Climate Change*, показывает, что ледники достигнут максимальной способности к самоохлаждению в течение следующего десятилетия. После этого приповерхностные температуры резко возрастут, что ускорит таяние ледяных массивов по всему миру.

Постдокторант Томас Шоу объясняет: «Чем сильнее нагревается климат, тем больше это заставляет ледники охлаждать свой собственный микроклимат и местные среды вниз по долине. Но этот эффект продлится недолго, и смена тенденции произойдет до середины века». Крупные ледники, такие как гималайские, охлаждают огромные массы воздуха, которые под действием силы тяжести стекают вниз по склонам, создавая так называемые кататические ветры. Изучение этих эффектов в удаленных регионах — сложная задача из-за нехватки полевых данных.

Чтобы решить эту проблему, Шоу разработал новую статистическую модель, которая может работать даже при ограниченных данных. Команда

⁶ Источник: <http://www.pogodaiklimat.ru/news/25672/> Опубликовано 27.10.2025

собрала почасовые данные с 350 метеостанций, расположенных на 62 ледниках по всему миру, что в сумме представляет 169 летних измерительных кампаний. Исследователи обнаружили, что в среднем приповерхностная температура на горных ледниках по всему миру повышалась на 0,83 градуса Цельсия при каждом градусе повышения температуры окружающей среды. Моделирование будущих проекций показало, что пик охлаждающего эффекта придется на период с 2020-х по 2040-е годы. После этого устойчивая потеря массы ледниками приведет к их крупномасштабному отступлению, и охлаждающий тренд сменится на противоположный. «К тому времени изношенные и значительно деградировавшие ледники «воссоединятся» с постоянно нагревающейся атмосферой, что предопределит их судьбу», — говорит Шоу.

Хотя прогноз рисует мрачное будущее для величественных ледяных башен мира, у человечества еще есть время подготовиться. «Знание того, что самоохлаждение ледников продлится немного дольше, может дать нам дополнительное время для оптимизации наших планов управления водными ресурсами в ближайшие десятилетия», — отмечает Шоу. Однако команда осознает, что спасти горные ледники мира уже невозможно. Исследователи подчеркивают необходимость скоординированной глобальной климатической политики для радикального сокращения выбросов, а не использования неэффективных геоинженерных стратегий, которые они сравнивают с «наложением дорогого пластыря на пулевое ранение».

Ледник Гектория в Антарктиде потерял пятую часть площади за год⁷

Чуть больше чем за год ледник Гектория на востоке Антарктиды отступил вглубь континента на 25 километров и стал тоньше на 80 метров. Скорость движения льда по его поверхности за это время выросла почти в шесть раз, а скорость истончения — почти в 40. Главной причиной такого резкого таяния ученые назвали потерю опоры в виде припайных льдов залива и откол айсбергов. Результаты их исследования опубликованы в журнале Nature Geoscience.

Льды на полюсах Земли подвержены естественной изменчивости: например, в Арктике морской лед начал резко таять еще в 1920-х, но это оказалось лишь очередным витком цикла, а настоящее стремительное тая-

⁷ Источник: <https://nplus1.ru/news/2025/11/12/record-glacier-retreat> Опубликовано 12.11.2025

ние, достоверно связанное с общим потеплением климата, стало наблюдаться лишь в начале XXI века. Льды Антарктики в течение длительного времени считались куда более устойчивыми, но со временем стало ясно, что за ними просто сложнее наблюдать.

Площадь льда, контрастирующего на спутниковых снимках с темной поверхностью морской воды, может оставаться неизменной. На самом деле ледник может быть на отдельных участках покрыт тающей рыхлой снежной кашей, или же по нему может стекать лед из выводного ледника на шельф. И в таком случае меняться действительно будет не площадь льда, а его толщина. Точно отслеживать таяние льдов на полюсах критически важно для составления прогнозов повышения уровня моря, к которому только Гренландия и Антарктида к 2050 году могут добавить пять сантиметров.

Ученые под руководством Наоми Очват из Университета штата Колорадо в Боулдере оценили баланс массы Гектории — выводного ледника, который стекает с континента на восточном побережье в виде языка над морской водой и питает шельфовый ледник Ларсена в море Уэдделла. В 2022 году припайный лед (неподвижный лед, примерзший к берегу или морскому дну) в заливе растрескался, что лишило Гекторию подпорки и защиты от морских волн и спровоцировало ускоренное таяние.

Авторы использовали данные спутниковых наблюдений, альтиметрии и цифровые модели рельефа и установили, что за период наблюдения с конца 2021 года по сентябрь 2023 года скорость течения льда по поверхности ледника выросла с 300 до 1700 метров в год, а скорость его истончения — с двух до восьмидесяти метров в год. С января 2022 по март 2023 года ледник Гектория на антарктическом шельфе отступил вглубь на 25 километров, стал тоньше на 80 метров и потерял практически 300 квадратных километров льда, или пятую часть площади — 216 квадратных километров своего языка над морем и 84 квадратных километра льда над континентом.

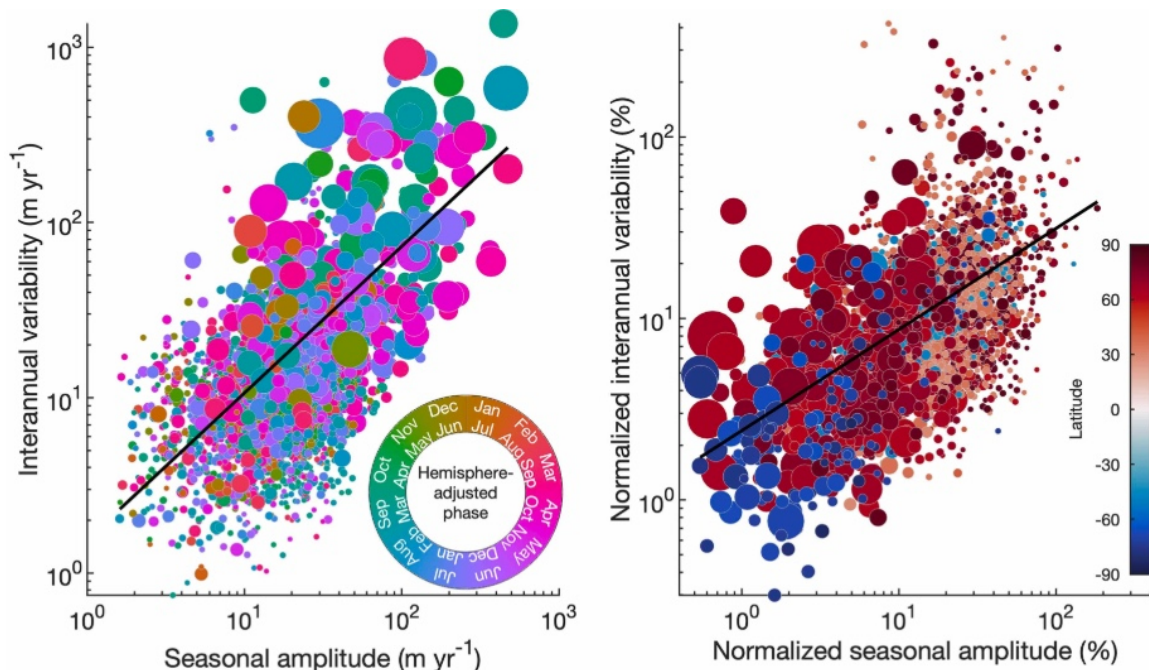
За два последних месяца 2022 года язык Гектории стал короче на $8,2 \pm 0,2$ километра, причем двух километров он лишился всего за три дня между 25 и 28 декабря. Вероятно, ледник можно считать мировым рекордсменом по таянию: он становится тоньше вдвое быстрее, чем ледник HPS12 в Патагонии, и отступает вглубь в семь раз быстрее, чем ледник Росса на Антарктическом полуострове. Причиной столь резкого таяния авторы назвали плавучесть ледяной равнины: ее опора на припайный лед исчезла, снизу на нее стала действовать сила Архимеда, которая спровоцировала откол айсбергов с их вращением.

Таяние льдов можно отслеживать не только по их площади и толщине, но и по структуре. Недавно ученые обнаружили в Антарктиде 85 ра-

нее неизвестных подледных озер, восемь из которых примыкают к шельфу и могут вскоре усилить поток льда с континента.

Температуру поверхности связали с сезонным ростом скорости ледников⁸

Сезонный рост скорости движения ледников оказался теснее всего связан с максимальной годовой температурой поверхности. Судя по этому предиктору, сильнее всего от потепления в будущем пострадают ледники с пологими склонами, на которых плохо дренируется и накапливается талая вода: она уходит вниз под основание ледника и делает подстилающую поверхность скользкой, что приводит к базальному таянию и быстрому перемещению ледяных масс, а значит и более быстрому повышению уровня моря, в которое эти массы будут поступать. Наиболее чувствительными к потеплению оказались ледники Аляски, Патагонии, Гренландии и Шпицбергена. Об этом говорится в статье, опубликованной в журнале Science.



⁸ Источник: <https://nplus1.ru/news/2025/11/28/seasonal-glacier-dynamics> Опубликовано 28.11.2025

Чад Грин и Алекс Гарднер из Калифорнийского технологического института в Пасадине предположили, что те ледники, которые сейчас быстрее тают и перемещаются в ответ на сезонное потепление, в будущем окажутся наиболее чувствительными к изменению климата. Они создали первую карту сезонного движения ледников, для чего использовали данные 36 миллионов пар оптических и радарных спутниковых изображений с разрешением 120 метров. Авторы включили в исследование все ледники мира площадью больше пяти квадратных километров, их наблюдения охватили 1092731 квадратный километр земной поверхности период с 2014 по 2022 годы. Судя по результатам исследования, устойчивыми к росту температуры остаются только внутриконтинентальные ледники Антарктиды, потому что даже в середине лета максимальные температуры поверхности там остаются отрицательными.

В Science Daily рассказали о стремительном ослаблении ледника Туэйтса⁹

Исследование, выполненное Центром наблюдения Земли Университета Манитобы при участии международных специалистов, показало, что ледник Туэйтса в Антарктиде, известный как «ледник Судного дня», разрушает собственную структуру быстрее, чем считалось ранее. Об этом 1 декабря сообщили в журнале Science Daily.

Ледовый шельф TEIS, формирующий северную часть системы Туэйтса, в течение двух десятилетий развивал разветвленную сеть трещин в зоне сдвига. Эти дефекты постепенно ослабляли сцепление с прибрежной опорой, которая ранее стабилизировала массив. По оценке исследователей, аналогичная динамика может проявиться и на других уязвимых антарктических шельфах.

Методология исследования включала анализ спутниковых наблюдений за период 2002–2022 годов, измерения скорости ледового потока и данные GPS-наблюдений на месте. Ученые зафиксировали четырехэтапную последовательность ослабления шельфа и выделили два ключевых механизма. По их оценке, сначала возникли длинные трещины вдоль направления движения льда, а затем — короткие, поперечные. Эта конфи-

⁹ Источник: <https://iz.ru/1999920/v-science-daily-rasskazali-o-stremitelnom-oslablenii-lednika-tueitsa-izi>
Опубликовано 1.12.2025

гурация сформировала положительную обратную связь: ускорение потока усиливало разрушение, а разрушение — новое ускорение.



Авторы исследования отметили, что связь шельфа с опорной точкой, ранее обеспечивавшей его устойчивость, постепенно ослабевает. Они указали, что при сохранении текущей динамики трещинообразования ледовая конструкция может перейти в фазу стремительного распада.

Второй важный элемент анализа — изменение роли самой опорной точки. Ученые уточнили, что объект, прежде обеспечивавший стабилизацию, со временем превратился в фактор уязвимости. Аналогичные процессы, по словам авторов, уже начинают проявляться на других шельфовых платформах Антарктиды, что повышает риск роста вклада ледового покрова континента в будущий глобальный подъем уровня моря.

Что будет с планетой, если на ней растает весь лед¹⁰

Если человечество продолжит сжигать ископаемое топливо и выбрасывать в атмосферу углекислый газ, то глобальное потепление в конечном счете растопит весь лед на полюсах и горных вершинах. Сейчас на планете более 5 миллионов кубических миль льда — по подсчетам ученых, на то, чтобы расплавить все эти запасы, уйдет более 5000 лет. Средняя температура, которая сейчас составляет 14 градусов Цельсия, достигнет 26,6 градуса, а уровень моря поднимется на 65 метров.

На картах показано, каким станет мир, если весь лед на Земле растает и станет частью Мирового океана. Нынешняя береговая линия обозначена тонкой белой линией

Северная Америка

Все Атлантическое побережье исчезнет, вместе с Флоридой и побережьем Мексиканского залива. Холмы Сан-Франциско превратятся в скопление островов, а Центральная долина станет огромной бухтой. Калифорнийский залив продолжится на север и поглотит Сан-Диего.

¹⁰ Источник: <https://bigpicture.ru/chto-budet-s-planetoj-esli-na-nej-rastaet-ves-led/>



Южная Америка



Бассейн Амазонки на севере и бассейн реки Парагвай на юге станут заливами в Атлантическом океане, исчезнет Буэнос-Айрес, прибрежный Уругвай и большая часть Парагвая. Останутся горные участки вдоль побережья Карибского моря и в Центральной Америке.

Африка



По сравнению с другими континентами Африка потеряет меньше земли, но потепление может сделать большую ее часть непригодной для жизни. Египет, Александрия и Каир будут затоплены разлившимся Средиземным морем.

Европа



От Лондона останутся лишь воспоминания, Венецию zalъет Адриатическое море. Через тысячи лет, по этому сценарию, Нидерланды уже много лет как будут покоиться под водой, большая часть Дании также исчезнет. Разливающиеся воды Средиземного моря примкнут к Черному и Каспийскому.

Азия



Земля, на которой сейчас живет 600 миллионов китайцев, будет затоплена, как и 160-миллионный Бангладеш и большинство прибрежных районов Индии. Разлив дельты Меконга приведет к тому, что Кардамоновы горы в Камбодже станут островом.

Австралия

На континенте, который сейчас преимущественно пустынный, появится внутреннее море, но затопленной окажется большая часть узкой прибрежной полосы, а именно на этой территории сейчас живут четыре австралийца из пяти.



Антарктика

Ледниковый щит Восточной Антарктиды так велик, что содержит четыре пятых всего льда на планете. Он пережил более ранние периоды потепления и может казаться непотопляемым. В последнее время он, похоже, немного уплотняется — из-за глобального потепления. Теплая атмосфера содержит больше водяного пара, который выпадает в виде снега в Восточной Антарктиде. Но даже этот исполин вряд ли переживет возвращение к климату эоцена.

Подобно ледниковому щиту Гренландии, щит Западной Антарктиды в предыдущие теплые периоды был гораздо меньше. Он уязвим, потому что большая его часть находится на твердых горных породах ниже уровня моря. Нагревающийся океан плавит ледяной покров снизу, заставляя его разрушаться. С 1992 года в среднем убывает 65 миллионов тонн льда в год.



Центральная Азия

Последние стабильные ледники Центральной Азии начали разрушаться¹¹

Недостаточное количество снежных осадков теперь также подрывает устойчивость одних из самых надёжных «водонапорных башен» мира — горных ледников, как показало новое исследование под руководством группы Франчески Пелличчиотти из Института науки и технологий Австрии (ISTA). Создав сеть мониторинга на новом контрольном леднике в центральной части Таджикистана, международная команда исследователей смогла смоделировать поведение всего водосборного бассейна за период с 1999 по 2023 гг. Результаты, свидетельствующие об ухудшении состояния ледников, были опубликованы в журнале *Communications Earth & Environment*.

Регион Высокогорной Азии получил название «Третий полюс» благодаря своим огромным запасам пресной воды, которые по объёму уступают только ледяным щитам Арктики и Антарктики. В Центральной Азии, на северо-западе Памира в Таджикистане, до недавнего времени сохранялись одни из последних стабильных или даже растущих ледников за пределами полярных регионов. Однако после распада Советского Союза и разрушения прежней системы мониторинга, регион в течение десятилетий испытывал острую нехватку данных наблюдений.

Группа исследователей под руководством профессора Пелличчиотти внесла вклад в международные усилия по устранению этого пробела. Объединившись с таджикскими учёными, а также коллегами из Швейцарии, Австрии и Франции, они установили современную климатическую станцию в пределах эталонного ледникового водосбора и воссоздали динамику изменений ледника за более чем два десятилетия. Как показала их первая совместная публикация, ледник, по всей вероятности, достиг критической точки в 2018 г. — с этого момента началось его быстрое и устойчивое сокращение.

В связи с общей нехваткой данных и отсутствием надёжных долгосрочных прогнозов для региона, исследователи пока не могут с уверенностью утверждать, стало ли это изменение настоящей «точкой невозврата» для ледников Памира. Об этом сообщил первый автор исследования — ас-

¹¹ Источник: Central Asia's last stable glaciers just started to collapse / <https://www.sciencedaily.com/releases/2025/09/250902085147.htm> Опубликовано 3.09.2025

пирант группы Пелличчиотти в ISTA Акилл Жубертон. Он отметил, что исследование охватывает лишь один конкретный водосборный бассейн и ограничено временным периодом с 1999 по 2023 гг. Тем не менее, он подчеркнул, что это — первое исследование такого рода, и для решения аналогичных проблем на более широком географическом уровне потребуются сопоставимые научные усилия.

Понимание Памиро-Каракорумской аномалии

Изменение климата оказывает серьёзное воздействие на ледники по всему миру. Пока ледники в Альпах, Андах и других регионах стремительно тают, некоторые ледники в горах Памира и Каракорума в Центральной Азии демонстрируют неожиданную устойчивость, а в отдельных случаях — даже признаки роста. Это парадоксальное явление получило название Памиро-Каракорумская аномалия. Как поясняет профессор Франческа Пелличчиотти из ISTA, Центральная Азия — это полусухой регион, в значительной степени зависящий от таяния снега и льда как основного источника воды для нижележащих рек. При этом, по её словам, механизмы, стоящие за аномальным поведением ледников Памира и Каракорума, до конца пока не изучены. Исследователи задаются вопросом: являются ли эти ледники последними, сохраняющими устойчивость к изменению климата?

Для изучения этого феномена группа учёных выбрала в качестве пункта мониторинга ледник Кызылсу, расположенный на северо-западе Памира, в центральной части Таджикистана. Климатическая станция установлена на высоте чуть ниже 3400 метров над уровнем моря — в стране, где около половины территории находится выше отметки в 3000 метров. Как отметил Акилл Жубертон, аспирант из группы Пелличчиотти, Кызылсу становится референтным пунктом мониторинга благодаря целому комплексу новых наблюдательных станций, размещённых как на самом леднике, так и в его окрестностях. Именно здесь команда планирует начать систематическое исследование причин аномального поведения ледников в этом регионе.

Проблема в том, что данных практически нет.

С момента создания сети мониторинга в водосборном бассейне реки Кызылсу в 2021 г. исследовательская группа собрала обширные данные о снегопадах и водных ресурсах региона. Используя эти наблюдения, а также данные климатического реанализа в качестве входных параметров для вычислительных моделей, учёные смогли реконструировать поведение ледника за период с 1999 по 2023 гг. По словам аспиранта Акилла Жубер-

тона, в ходе моделирования были охвачены ключевые климатические параметры водосбора, включая снежный покров, баланс массы ледника и динамику водных потоков. Он отметил, что независимо от используемого метода анализа, во всех случаях наблюдался отчётливый переломный момент, не позднее 2018 г. Именно с этого времени сокращение количества снегопадов привело к изменению поведения ледника и ухудшению его состояния.

Фактически, усиленное таяние ледникового льда стало компенсировать около трети водных ресурсов, утраченных в результате снижения объёмов осадков. Эти данные указывают на то, что фаза аномальной стабильности ледника в условиях глобального потепления, вероятно, завершилась.

Исследователи опирались на вычислительные модели, основанные на критически важных новых локальных наблюдениях. Однако даже при высокой плотности таких наблюдений одних эмпирических данных было бы недостаточно для получения полноценной картины. Как пояснил Акилл Жубертон, аспирант из группы Пелличчиотти, моделирование остаётся необходимым инструментом в работе — от подножия долины до вершины ледника. Он отметил, что даже в таких странах, как Канада и государства Европы, где сети мониторинга развиты значительно лучше, климатические станции представляют собой всего лишь локализованные точки на карте. Проблема же региона Памира заключается в том, что данных практически нет вовсе. Именно поэтому, подчеркнул он, исследователи вынуждены уплотнять сеть наблюдений и параллельно развивать моделирование. При этом Жубертон признал, что, учитывая все сложности, остаются сомнения в точности входных данных для модели. Тем не менее, поскольку модель хорошо согласуется с независимыми наблюдениями, группа исследователей достаточно уверена в полученных результатах. Исследователи считают свою работу первым шагом в правильном направлении.

Рюкзаки, набитые ценным оборудованием

С начала сотрудничества в 2021 г., когда группа Франчески Пелличчиотти ещё базировалась в Швейцарском федеральном институте исследований леса, снега и ландшафта (WSL), исследователи совершили семь экспедиций в Таджикистан. Каждое лето они планировали полевые выезды в координации с местными научными учреждениями в Душанбе и отправлялись в горные походы с рюкзаками, полными дорогостоящего научного оборудования, чтобы разбить лагерь в удалённых, труднодоступных районах, отрезанных от цивилизации. По словам аспиранта Акилла Жубертон, участие таджикских учёных в экспедициях способствует не только налаживанию тесного научного сотрудничества и обмену опытом, но также

помогает преодолевать языковой барьер при общении с местным населением, чья жизнь напрямую зависит от состояния ледников.

Летняя экспедиция 2025 г. стала особенно важной вехой, поскольку она стала заключительной в рамках текущего этапа финансирования проекта. Основные цели этого года включали обновление и автоматизацию системы мониторинга, с тем чтобы обеспечить её надёжную работу на протяжении следующих десятилетий. Кроме того, передавая местным жителям знания об обслуживании оборудования, исследователи стремятся сделать свою работу более устойчивой и сократить необходимость в частых выездах. До настоящего времени группе исследователей приходилось совершать поездки даже для замены внутренних аккумуляторов, технического обслуживания станций и ручного сбора данных с помощью USB-накопителей.

Значительное локальное воздействие

Работа группы исследователей строится на тесном взаимодействии с местным населением. Акилл Жубертон отмечает, что пастухи, живущие в горных районах, уже хорошо знают участников экспедиций — они видят их каждый год, нередко приглашают на обед и всегда стараются не мешать работе научного оборудования. Местные жители знают, где установлены станции, и относятся к ним с уважением. Группа активно делится собранными данными, обсуждает результаты наблюдений с жителями региона и работает в природных условиях, находясь среди местного населения, их семей и скота. Нередко сельчане рассказывают об изменениях в горах, которые совпадают с тем, что исследователи наблюдают по спутниковым снимкам. По словам Жубертонна, особенно впечатляют те случаи, когда местные устные свидетельства подтверждают данные дистанционного зондирования — это придаёт научной работе более глубокий, человеческий смысл.

Водосборный бассейн реки Кызылсу входит в систему Амударьи — одной из крупнейших рек Центральной Азии, почти полностью питающейся ледниковыми водами. Амударья, в свою очередь, в прошлом была главным притоком Аральского моря, которое за последние десятилетия практически исчезло. Причиной тому стал масштабный отвод вод Амударьи и Сырдарьи для орошения хлопковых полей, созданных в пустынной зоне в советский период.

Будущее Центральной Азии тает вместе с ее ледниками¹²

Александр Ескендиров

Центральная Азия столкнулась с ускоряющимся экологическим кризисом, который становится невозможно игнорировать. В Казахстане, Кыргызстане, Таджикистане, Туркменистане и Узбекистане вода исчезает из рек, водохранилищ и водоносных горизонтов. Правительства стран региона внедряют политику по улучшению управления ирригацией, модернизации каналов и развитию регионального сотрудничества, однако эти шаги, вероятно, лишь отсрочивают неизбежное. Основная проблема заключается в том, что сам источник воды исчезает из-за таяния ледников с беспреце-

¹² Источник: <https://rivers.help/n/5450> Опубликовано 23.09.2025

дентной скоростью, указывает доктор Эрик Руденшильд в своей статье для Caspian Policy Center (CPC).

Центральноазиатский регион, известный своими живописными заснеженными горами, ледниками и степями, рискует превратиться в пустыню. Все большие территории пяти центральноазиатских государств могут стать непригодными для жизни человека. Повышение региональной температуры приводит к тому, что ледники тают в четыре раза быстрее, чем в среднем по миру. За последнее десятилетие в регионе были зафиксированы самые высокие температуры за всю историю наблюдений, в результате чего почти 98 % ледников Тянь-Шаня демонстрируют признаки отступления. Талая вода составляет около 80 процентов общего речного стока в Центральной Азии, питая ключевые водные артерии – Амударью и Сырдарью.

Быстрое потепление меняет сезонные циклы. Весна начинается раньше, а осень длится дольше. Пик летнего таяния ледников теперь смещается с начала августа на начало июля, что приводит к более продолжительным и засушливым периодам в конце лета. Раннее таяние снегов оставляет ледники без защитного покрова, делая их более уязвимыми для солнечной радиации и теплого воздуха, что еще больше ускоряет их таяние. Погодные аномалии становятся новой нормой, вызывая сильные сезонные дожди, наводнения и оползни, которые, в свою очередь, приводят к нехватке воды и энергии в последующие периоды.

Последствия уже ощутимы. Сильная засуха 2021 года привела к дефициту воды, неурожаю и массовой гибели скота на более чем 40 % территории региона. Аномальная жара в марте 2025 года ударила по фруктовым культурам Узбекистана и яровой пшенице Казахстана в период цветения, что, вероятно, снизит урожайность. Все более суровые и продолжительные засухи затрагивают две трети территории Казахстана, сказываясь на производстве зерна в два из каждых пяти лет. Сельское хозяйство, крупнейший работодатель в регионе, где занята почти треть рабочей силы, особенно уязвимо к изменениям климата. По прогнозам Всемирного банка, к 2050 году регион может столкнуться с волнами экстремальной жары продолжительностью до двух месяцев, что приведет к росту смертности и значительным экономическим потерям, а также к усилению трудовой миграции.

Основной причиной повышения температуры является загрязнение воздуха. Страны Центральной Азии занимают высокие места в мировом рейтинге по уровню загрязнения. Только в 2022 году спутники зафиксировали 184 случая супервыбросов метана с нефтегазовых месторождений Туркменистана. Города региона также являются очагами загрязнения. Кроме того, Туркменистан, Казахстан и Узбекистан входят в число ведущих мировых источников выбросов метана – парникового газа, который удерживает тепло в атмосфере значительно эффективнее углекислого газа.

Основными источниками метана являются утечки на объектах нефтегазовой инфраструктуры, угольная промышленность и сельское хозяйство.

Особую опасность представляет таяние вечной мерзлоты, в которой заключены огромные объемы метана и углерода. По мере потепления и таяния ледников вечная мерзлота оттаивает, высвобождая метан, что еще больше повышает температуру воздуха. Этот процесс создает замкнутый круг, который значительно усиливает тенденцию к потеплению в регионе.

Правительства стран Центральной Азии осознают необходимость действий. Казахстан инвестирует в модернизацию каналов и ирригации, Узбекистан экспериментирует с ценообразованием на воду и диверсификацией культур. Таджикистан и Кыргызстан внедряют инструменты для управления водными ресурсами. Международные институты, такие как Всемирный банк и Азиатский банк развития, поддерживают эти усилия. Однако все эти меры имеют фундаментальные ограничения. Они направлены на сохранение и перераспределение существующей воды, но не могут восполнить ледниковый сток, который исчезает. Модернизация инфраструктуры не способна устранить первопричину кризиса – повышение температуры и сокращение ледников.

Ситуацию усугубляют и внешние факторы. Соседние страны, такие как Афганистан, Россия и Китай, сталкиваются с аналогичными проблемами водной безопасности и отводят воду из источников, от которых зависит Центральная Азия. Например, строительство канала Кош-Тепа в Афганистане может значительно сократить сток реки Амударьи. Нехватка воды уже становилась причиной конфликтов в регионе и может спровоцировать новые споры в будущем, поскольку трансграничное сотрудничество исторически осложнялось межгосударственной конкуренцией.

Последствия бездействия могут быть катастрофическими. Продовольственная безопасность уже находится под угрозой, урожайность зерна, фруктов и хлопка будет снижаться. Животноводство в некоторых районах станет невозможным. Опустынивание приведет к сокращению пригодных для жизни земель. Геополитические последствия выходят за пределы региона. Нехватка воды может обострить пограничные споры, а снижение потенциала гидроэнергетики – дестабилизировать всю энергетическую систему. Вызванный засухой дефицит продовольствия может усилить зависимость от импорта, сделав страны уязвимыми для глобальной ценовой нестабильности.

Таким образом, фундаментальный кризис Центральной Азии заключается не в трубопроводах или торговых путях, а в исчезающем льде. Усилия правительств необходимы, они могут выиграть время, но не решают основной проблемы – таяния ледников из-за повышения температуры воздуха. Без радикальных и скоординированных мер по сокращению выбро-

сов, особенно метана, которые замедлили бы потепление, любые другие действия кажутся обреченными на провал. Если ледники не сохранятся, будущее региона утечет вместе с талой водой.

Ледяная бомба: тающие ледники угрожают плотинам Центральной Азии¹³

В Таджикабадском районе Таджикистана от ледника на вершине пика Исмоила Сомони откололась крупная масса льда. По предварительным оценкам, размеры ледяной глыбы составляют около двух километров в длину, 25 метров в высоту и до 200 метров в ширину. Ситуация может усугубиться, если после обильных дождей от ледника начнут откалываться новые массы льда. При благоприятном стечении обстоятельств, растаявшие обломки ледника просто стекут в реку Сурхоб в 100 километрах выше стройплощадки Рогунской ГЭС.

Инцидент, произошедший 25 октября, пока обошелся без жертв и разрушений, однако стал очередным грозным напоминанием о процессах, набирающих силу в высокогорьях Азии. Специалисты связывают произошедшее с климатическими изменениями, которые ускоряют таяние ледников и усиливают опасность природных катастроф. Произошедшее – тревожный симптом глобальной тенденции, которая ставит под угрозу стабильность целых регионов. Ученые подтверждают, что даже так называемая Памиро-Каракорумская аномалия – область, где ледники до недавнего времени оставались относительно стабильными, – подошла к концу. Теперь и эти «последние бастионы» начали стремительно терять ледовую массу.

Главную опасность представляет не само по себе сокращение ледников, а его каскадные последствия для инфраструктуры, расположенной ниже по течению. В первую очередь под ударом оказываются гидроэлектростанции – основа энергетики многих стран Центральной Азии. Ускоренное таяние ледников приводит к образованию и быстрому росту приледниковых озер. Нестабильные моренные плотины, удерживающие миллионы кубометров воды, могут быть прорваны в результате оползня, сильных дождей или обвала льда, вызывая разрушительные селевые потоки, известные как прорывные паводки приледниковых озер. Именно эти явления несут прямую угрозу плотинам, мостам и населенным пунктам.

¹³ Источник: <https://rivers.help/n/5588> Опубликовано 30.10.2025

Наглядным и трагическим примером этой уязвимости служит опыт Индии – восходящей сверхдержавы, которая, несмотря на все свои ресурсы, оказалась беспомощной, столкнувшись с разрушительной силой ледниковых катастроф.

В октябре 2023 года в индийском штате Сикким прорыв приледникового озера Южный Лхонак привел к каскадному наводнению. Поток воды и обломков за считанные минуты снес 60-метровую плотину гидроэлектростанции Chungthang Teesta III мощностью 1200 МВт. Поток продолжил свое разрушительное движение, повредив еще четыре ГЭС ниже по течению и вызвав масштабные разрушения вплоть до границы с Бангладеш. Это событие не было неожиданностью для ученых: гляциологи за несколько лет до катастрофы предупреждали, что озеро Южный Лхонак представляет собой «бомбу замедленного действия» из-за быстрого роста, вызванного таянием ледника. Трагедия в Сиккиме стала зловещим повторением катастрофы 2021 года в индийском штате Уттаракханд, когда обвал ледника на горе Ронти вызвал внезапный паводок, уничтоживший две ГЭС – Rishiganga и Tapovan Vishnugad – и унесший жизни более 200 человек. Примечательно, что еще после аналогичного разрушительного наводнения 2013 года Верховный суд Индии поручил экспертной комиссии оценить риски, и та рекомендовала прекратить строительство ГЭС в этом «подверженном стихийным бедствиям» регионе. Однако эти предупреждения были проигнорированы.

Парадокс заключается в том, что многие из этих гидроэнергетических проектов строились под лозунгом «чистой» энергетики, призванной сократить выбросы CO₂. Проект Rishiganga даже был одобрен в рамках Механизма чистого развития ООН. Однако, как показывает практика, строительство таких объектов в хрупких высокогорных экосистемах – опасное и недальновидное предприятие. Поскольку наиболее удобные и безопасные места для строительства ГЭС уже освоены, энергетические компании по всему миру продвигаются все дальше и дальше вверх по течению, в более рискованные районы. Проблему усугубляет и то, что проектирование многих плотин зачастую основывается на устаревших климатических данных, которые переоценивают количество осадков и недооценивают потенциальный ущерб от наводнений и эрозии. «Гидроэлектростанции часто планируются на основе климата прошлого – климата, который, вероятно, уже неактуален», – отмечает Омеро Палтан, исследователь климата из Оксфордского университета.

Опыт Индии ставит неудобные вопросы перед Таджикистаном и другими странами Центральной Азии, где гидроэнергетика также является стратегической отраслью. Смогут ли строители плотин в регионе, сталкиваясь с аналогичными, если не большими, климатическими вызовами, противопоставить что-то угрозам, с которыми не справляется одна из круп-

нейших экономик мира? Нестабильность ледников требует пересмотра подходов к управлению рисками и энергетической стратегии. Столкнувшись с растущей уязвимостью гидроэнергетики, Индия теперь еще быстрее развивает солнечную энергетику, диверсифицируя источники энергии. По какому пути пойдет Центральная Азия? Страны региона стоят перед сложным выбором: продолжать делать ставку на гидроэнергетику с ее возрастающими рисками или инвестировать в альтернативные, более безопасные возобновляемые источники энергии. Откол части ледника Исмоила Сомони в Таджикистане – это сигнал о том, что время для принятия стратегических решений стремительно уходит, а цена бездействия может оказаться катастрофической.

Кыргызские инженеры запатентовали универсальную стойку искусственного ледника¹⁴

Министерство науки, высшего образования и инноваций зарегистрировало новое изобретение под названием «Универсальная стойка искусственного ледника». Авторами разработки выступили Эркин Муратбеков и Алексей Скрыбин.

Согласно описанию, изобретение предназначено для создания искусственных ледников на горных пастбищах.

Конструкция представляет собой модульный сборно-разборный каркас из стальных профилей с центральной опорной мачтой высотой 10,24 метра, системой пространственных раскосов и поворотной базой с шарнирной опорой. Также предусмотрена сменная система водораспределения с распылительной насадкой и быстросъёмными соединениями для подключения к водисточнику.

¹⁴ Источник: <https://ru.kabar.kg/news/kyrgyzskie-inzhenery-zapatentovali-universalnuyu-stoyku-iskusstvennogo-lednika/> Опубликовано 3.11.2025



Отличительные особенности конструкции включают:

- фундаментное устройство крестообразной формы с балластными площадками, обеспечивающее устойчивость без бетонных работ;
- стандартизированные болтовые соединения заводского изготовления для быстрого монтажа в любых условиях;
- поворотную базу с механизмом замены насадки и возможностью монтажа с земли;
- распылительную насадку с изменяемой геометрией отверстий, формирующую ледяной конус заданной формы;
- производительность от 55 до 330 м³ льда в сутки;
- транспортировочный комплект с тележкой-контейнером для перемещения элементов весом до 90 кг в условиях высокогорья.

Разработка направлена на сохранение водных ресурсов и устойчивое развитие горных пастбищ, обеспечивая создание сезонных запасов талой воды в засушливых регионах.

Европа

Таяние ледников ставит под угрозу гидроэнергетику Швейцарии¹⁵

Изменение климата, в частности таяние ледников, сокращение снегопадов, увеличение зимних дождей и частые засухи, оказывает серьезное влияние на водохранилища гидроэлектростанций в Швейцарии и способы использования водных ресурсов. Инженер Джованни Де Чезаре из Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL) на примере плотины Грис в кантоне Вале проанализировал сложные последствия этих процессов для гидроэнергетики.



В настоящее время вода в водохранилищах ГЭС оценивается преимущественно с точки зрения ее способности производить электроэнергию. Однако, как показывают исследования, в будущем необходимо будет присвоить ей экономическую ценность, исходя из различных способов ее применения. Ожидается, что плотины станут выполнять более широкий спектр функций, а не только служить для выработки электричества. Этот

¹⁵ Источник: <https://hydropost.ru/id/351711> Опубликовано 12.10.2025

вывод основан на анализе данных об изменении климата, эволюции ледников и заиливании водохранилищ за последние годы.

В Швейцарии за последние сто лет ледники уменьшились в размерах почти вдвое, и, по прогнозам, большинство из них могут полностью исчезнуть к 2100 году. Исследование, посвященное плотине Грис, расположенной на высоте 2387 метров, показывает масштабы проблемы. Вода из ее созданного ей водохранилища проходит через каскад гидроэлектростанций и впадает в озеро Маджоре, обеспечивая около 3% всей гидроэнергии страны. При этом гидроэнергетика в 2023 году составила примерно 57,6% от общего объема произведенной в Швейцарии электроэнергии.

В исследовании Джованни Де Чезаре поднимается вопрос: «Что исчезнет первым – ледник или водохранилище?». Ответ для плотины Грис очевиден – ледник, питающий ее, исчезнет раньше, примерно к 2070 году. После этого водохранилище будет пополняться только за счет дождей и таяния снега. К 2100 году приток воды в него сократится примерно на 30% по сравнению с текущими уровнями. Водохранилищу придется частично взять на себя функцию, которую сейчас выполняет ледник, – накапливать и сохранять воду. Однако вопрос о том, как будут распределяться эти ограниченные ресурсы, остается открытым.

Швейцария, имеющая около 220 плотин, находится на переломном этапе. Во многих водохранилищах накопились донные отложения, что снижает их полезный объем и нарушает работу ГЭС. У некоторых плотин, включая Грис, введенную в эксплуатацию в 1966 году, так называемый «мертвый объем» уже заполнен осадками. Согласно швейцарскому законодательству, операторы обязаны приводить объекты в безопасное состояние перед продлением или продажей концессии. Это означает необходимость реконструкции многих плотин, а в некоторых случаях – удаления отложений для повышения эффективности и безопасности.

Глобальное потепление добавляет в это уравнение новую переменную. Исчезновение ледников, которые изначально были одной из причин строительства плотин, ставит перед инженерами сложную задачу. Теперь им необходимо учитывать этот фактор при планировании работ по реконструкции и искать решения, которые позволят сохранить водохранилища и предотвратить возможные конфликты из-за распределения воды в будущем.

Перевод: Усманова О., Юлдашева Г.

Верстка и дизайн: Беглов И., Дегтярева А.

Подготовлено к печати
в Научно-информационном центре МКВК

Республика Узбекистан, 100 187,
г. Ташкент, м-в Карасу-4, д. 11А

sic.icwc-aral.uz