



Источник фото: Pixabay.com
The photo source: Pixabay.com

ДОСТИЖЕНИЯ В ПРОВЕДЕНИИ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ И НА МАТЕРИКОВОЙ ЧАСТИ НОРВЕГИИ

ИСАКСЕН К.

Норвежский метеорологический институт, г. Осло, Норвегия
ketili@met.no

ЛУТЦ Дж.

Норвежский метеорологический институт, г. Осло, Норвегия

СОРЕНСЕН А.М.

Норвежский метеорологический институт, г. Осло, Норвегия

ГОДОЙ О.

Норвежский метеорологический институт, г. Осло, Норвегия

ФЕРРИГИ Л.

Норвежский метеорологический институт, г. Осло, Норвегия

ИСТВУД С.

Норвежский метеорологический институт, г. Осло, Норвегия

ААБОЭ С.

Норвежский метеорологический институт, г. Тромсё, Норвегия

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод статьи норвежских исследователей «Достижения в проведении оперативного мониторинга многолетней мерзлоты на Шпицбергене и на материковой части Норвегии» (Isaksen et al., 2022). Она была опубликована в журнале *Environmental Research Letters* («Записки по исследованиям окружающей среды») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Isaksen et al., 2022) приведена в конце.

Веб-портал по криосфере, поддерживаемый Норвежским метеорологическим институтом (<https://cryo.met.no>), предоставляет доступ к новейшим оперативным данным по текущему состоянию морского льда, снега и многолетней мерзлоты (ММ) в Норвегии, Арктике и Антарктике. В данной статье представлены последние дополнения к этому portalу по оперативному мониторингу ММ, проводимому указанным институтом, и результаты визуализации полученных данных по температуре ММ в режиме реального времени.

Новейшие данные по температуре многолетней мерзлоты сравниваются с климатологической информацией, полученной с метеостанций, включая медианные значения, доверительные интервалы, экстремальные величины и тренды. В местах наблюдений, выполняемых Норвежским метеорологическим институтом, работают дополнительные метеостанции с расширенными программами измерений. Система комплексного

мониторинга предоставляет ежедневно обновляемые данные для изучения текущего состояния, трендов и воздействий, например влияния экстремальных климатических явлений на температуру ММ.

Изменения температуры грунта, полученные на основе многолетних наблюдений в зоне более теплой многолетней мерзлоты, обнаруженной в Норвегии, обычно составляют 0,1–0,2 °С за десятилетие. А в зоне более холодной ММ в высоких широтах Арктики на архипелаге Шпицберген наблюдается потепление на величины до 0,7 °С за десять лет.

Оперативный мониторинг позволяет получать информацию быстрее, чем когда-либо прежде, что потенциально может помочь в раннем обнаружении, например, рекордно высокой толщины деятельного слоя (слоя сезонного оттаивания) и заметного повышения температуры многолетней мерзлоты. Он также может стать краеугольным камнем систем раннего предупреждения о природных опасностях, связанных с потеплением и деградацией ММ.

В настоящее время результаты этого мониторинга передаются вручну в международную Глобальную наземную сеть наблюдений за многолетней мерзлотой (GTN-P), для которой планируется интеграция с оперативными службами Всемирной метеорологической организации (WMO) через Глобальную службу наблюдений за криосферой WMO.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оперативный мониторинг; криосфера; изменения климата; многолетняя мерзлота.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Исаксен К., Лутц Дж., Соренсен А.М., Годой О., Ферриги Л., Иствуд С., Аабоз С. Достижения в проведении оперативного мониторинга многолетней мерзлоты на Шпицбергене и на материковой части Норвегии (пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2024. Т. 6. № 7. С. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-7-8-....

ADVANCES IN OPERATIONAL PERMAFROST MONITORING ON SVALBARD AND IN NORWAY

ISAKSEN K.

The Norwegian Meteorological Institute,
Oslo, Norway
ketili@met.no

LUTZ J.

The Norwegian Meteorological Institute,
Oslo, Norway

SORENSEN A.M.

The Norwegian Meteorological Institute,
Oslo, Norway

GODOY O.

The Norwegian Meteorological Institute,
Oslo, Norway

FERRIGHI L.

The Norwegian Meteorological Institute,
Oslo, Norway

EASTWOOD S.

The Norwegian Meteorological Institute,
Oslo, Norway

AABOE S.

The Norwegian Meteorological Institute,
Tromso, Norway

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Advances in operational permafrost monitoring on Svalbard and in Norway” by Norwegian researchers (Isaksen et al., 2022). It was published in the journal “Environmental Research Letters” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 4.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Isaksen et al., 2022) used for the presented translation is given in the end.

The cryosphere web portal maintained by the Norwegian Meteorological Institute (<https://cryo.met.no>), provides access to the latest operational data and to the information on the current state of the sea ice, snow, and permafrost in Norway, the Arctic, and the Antarctic. The paper presents the latest addition to this portal on the operational permafrost monitoring by the institute and on the methods for visualising real-time permafrost temperature data.

The latest permafrost temperatures are compared to the climatology data from weather stations, including medians, confidence intervals, extremes, and trends. There are additional operational weather stations with extended measurement programs at these locations. The collocated monitoring offers daily updated data for studying and monitoring the current state, trends, and the effects of, e. g., extreme climate events on permafrost temperatures.

Ground temperature rates obtained from the long-term records in the warmer permafrost found in Norway are typically 0.1–0.2 °C per decade. In contrast, in the colder permafrost of the high latitudes of Arctic on Svalbard, warming rates are up to 0.7 °C per decade.

The operational monitoring provides information faster than ever before, potentially assisting in the early detection of, e. g., high active layer thickness and pronounced permafrost temperature increases. It may also become a cornerstone of early warning systems for natural hazards associated with permafrost warming and degradation.

Currently, the data are submitted manually to the international Global Terrestrial Network for Permafrost and are scheduled for integration with the operational services of the World Meteorological Organisation (WMO) through the WMO Global Cryosphere Watch.

KEYWORDS:

operational monitoring; cryosphere; climate change; permafrost.

FOR CITATION:

Isaksen K., Lutz J., Sorensen A.M., Godoy O., Ferrighi L., Eastwood S., Aaboe S. Dostizheniya v provedenii operativnogo monitoringa mnogoletney merzloty na Shpitsbergene i na materikovoy chasti Norvegii [Advances in operational permafrost monitoring on Svalbard and in Norway] (translated from English into Russian) // *GeoInfo*. 2024. T. 6. № 7. S. ...-.... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-7-8-...-.... (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ▶

В отличие от морского льда и снежно-го покрова многолетняя мерзлота (ММ) не видна на поверхности земли. Измерения температуры грунта в скважинах – наилучший способ мониторинга долговременных изменений ММ. Самыми непосредственными и сопоставимыми показателями этих изменений являются температура ММ и мощность деятельного слоя (слоя сезонного оттаивания) [1]. По данным Глобальной системы наблюдений за климатом (Global Climate Observing System), эти две переменные отражают важнейшие климатические изменения [2, 3].

Многолетняя мерзлота является крупнейшим поглотителем углерода на суше. Она удерживают 1070–1360 млрд метрических тонн (Пг – петаграмм) замороженного и тающего углерода, из которых 300–400 Пг находятся в первых верхних метрах, а остальная часть – на более глубоких уровнях [4]. Таяние ММ грозит мобилизацией этих запасов и выбросом их в атмосферу в составе углекислого газа или метана и превращению Арктики из поглотителя углерода в его источник [5].

Измерения показывают, что многолетняя мерзлота нагревается в глобальном масштабе [6, 7] и подвергается деградации с обширными и потенциально быстрыми последствиями, влияющими как на естественные [8–11], так и на антропогенные [12, 13] системы. Последние модели CMIP6 (по Шестому международному проекту сравнения объединенных моделей – Coupled Model Intercomparison Project 6) прогнозируют глобальное сокращение среднегодового объема замороженной многолетней мерзлоты примерно на 10–40% на 1 °C глобального изменения приземной температуры воздуха [14].

Систематический долговременный мониторинг ММ в Северной Европе начался в основном в рамках финансируемого Европейским Союзом проекта PACE (Permafrost and Climate in Europe – «Многолетняя мерзлота и климат в Европе») [15] с установки приборов для измерений температуры грунта в глубо-

ких скважинах на мерзлотной станции Янссонхауген на Шпицбергене в 1998 году и на станции Юввашё на юге материковой части Норвегии в 1999 году [16, 17]. Они были одними из первых опорных станций для мониторинга многолетней мерзлоты в Европе [15] и предоставили первую возможность для анализа трендов изменений ММ во времени, добавив критически важные измерения нового типа к современным знаниям о состоянии ММ в Северной Европе [18, 19].

С 2000 года на архипелаге Шпицберген и на материковой части Норвегии было пробурено более 35 дополнительных скважин, оснащенных измерительной аппаратурой. Например, в 2001 году в Снёхейм-Йеркинне (Доврефелье) на юге Норвегии была создана сеть мониторинга из неглубоких скважин [20]. В этом же районе в августе 2008 года на разных высотных отметках по градиенту континентальности было пробурено еще 12 неглубоких скважин [21]. В ходе Международного полярного года (2007/2008 г.) были созданы сети мониторинга ММ на севере материковой части Норвегии, а также на Шпицбергене [22]. В последние годы (2019–2021 гг.) в удаленных местах Шпицбергена были созданы новые скважины в рамках проектов SIOS (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System – «Интегрированная арктическая система наблюдений за Землей на Шпицбергене», <https://sios-svalbard.org/>) и COAT (Climate-Ecological Observatory for Arctic Tundra – «Климатоэкологическая станция наблюдений за арктической тундрой», www.coat.no/en/) [23]. В тех же местах также были созданы действующие метеостанции с расширенными программами измерений. Благодаря такому совмещенному мониторингу ежедневно предоставляются точные данные для изучения текущего состояния, трендов и воздействий, например экстремальных климатических явлений, на температуру многолетнемерзлых грунтов.

В настоящее время проводится обширный мониторинг для сбора инфор-

мации о распространении, состоянии и изменениях ММ на долговременной основе [6, 7]. Эти данные отслеживаются во всем мире с помощью нескольких национальных и международных программ. Однако сбор данных по большей части выполняется вручную примерно раз в год с каждой точки наблюдений. Из-за медленности дополнения баз данных или предоставления доступа к ним самая последняя информация в них может оказаться двухлетней или более давности. Поэтому доступность данных по многолетней мерзлоте в реальном времени в настоящее время очень ограничена. Это является существенным препятствием для непрерывного мониторинга и оценки криосферы, проводимых, например, Глобальной службой наблюдений за криосферой (Global Cryosphere Watch, GCW) Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organisation, WMO).

Вклад авторов настоящей статьи позволяет разработчикам моделей и исследователям значительно улучшить доступ, анализ и оценку последних данных по многолетней мерзлоте. Такие данные также будут важны для разработки эффективных систем раннего предупреждения, а также для оценки природных опасностей и рисков в отношении ущерба инфраструктуре из-за потепления и таяния ММ.

Веб-портал по криосфере (<https://cryo.met.no>) предоставляет информацию о текущем состоянии морского льда, снега на суше и многолетней мерзлоты в Норвегии, Арктике и Антарктике, мониторинг которых осуществляет Норвежский метеорологический институт (НМИ). Новейшие оперативные данные и продукты их обработки и анализа визуализируются в виде ежедневно обновляемых графиков с инструкциями о том, где получить доступ к этим данным. Указанный веб-портал был создан в 2019 году для сбора и более хорошей визуализации работы и наблюдений НМИ в отношении криосферы. Легкий открытый доступ к результатам наблюдений за криосферой, проводимым практически в режи-

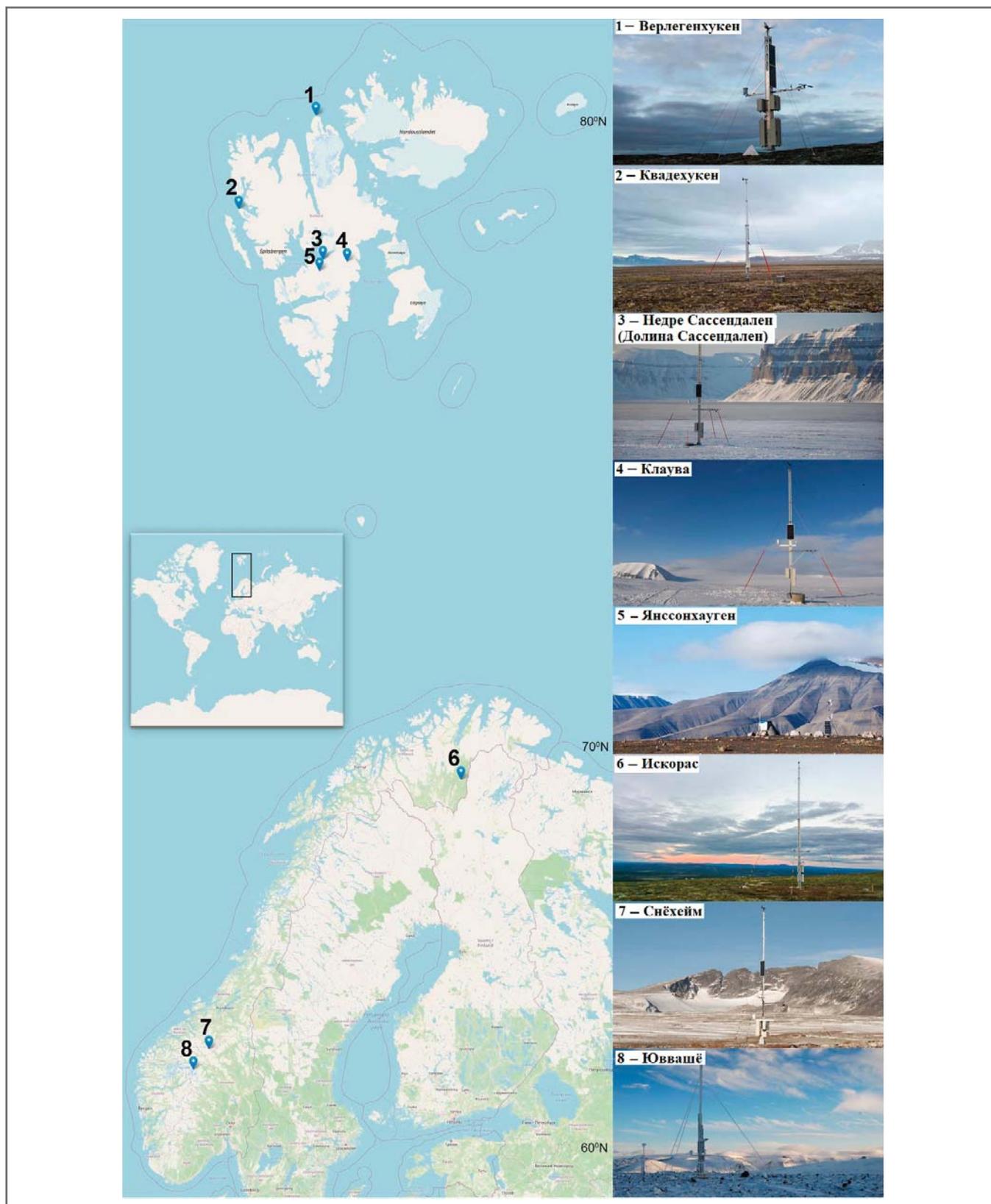


Рис. 1. Расположение мерзлотных станций на материковой части Норвегии и на Шпицбергене (источник фоновой карты: <https://cryo.met.no/en/permafrost> по состоянию на август 2022 г.; авторы фотографий: Бернт Энге Ларсен (1), Шгейн Торе Педерсен (3–5, 7–8), Кегил Исаксен (6), Тоне Хусебай)

ме реального времени, необходим для того, чтобы сосредоточить внимание на быстро меняющемся климате и лучше понять эти изменения.

Работа, лежащая в основе различных данных и продуктов их обработки и

анализа, осуществляется с помощью нескольких источников, обеспечиваемых НМИ, крупными норвежскими проектами, такими как SIOS и COAT, и крупными европейскими программами – например, Европейской организа-

ции по эксплуатации метеорологических спутников (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT), Центра спутникового мониторинга океана и морского льда (Ocean and Sea Ice Satellite Appli-

Таблица. Список мерзлотных станций (источник: <https://cryo.met.no/> по состоянию на июль 2022 г.)

Код станции	Название станции	Регион	Год начала работы	Высотная отметка, м	Максимальная глубина измерений, м
9380	Снёхейм	Материковая часть Норвегии	2001	1475	8,5
15270	Юввашё		1999	1894	100
97710	Искорас		2008	591	52,5
99875	Янссонхауген	Шпицберген	1998	275	100
99882	Недре Сассендален (Долина Сассендален)		2021	13	30
99884	Клаува		2021	480	30
99895	Квадехукен		2021	5	30
99927	Верлегенхукен		2019	8	30

cation Facility, OSI SAF), Инициативы Европейского космического агентства в области изменений климата (European Space Agency Climate Change Initiative, ESA CCI), служб программы Европейского союза по наблюдениям за Землей «Коперник» (Copernicus services).

Настоящая статья посвящена оперативному мониторингу многолетней мерзлоты, осуществляемому НМИ, и материалам по ММ, доступным на сайте <https://cryo.met.no/en/permafrost>. Различные информационные продукты по ММ доступны по данным первых норвежских эталонных мерзлотных станций Янссонхауген и Юввашё и шести других станций на материковой части Норвегии и на Шпицбергене.

МЕТОДЫ ►

Работающие мерзлотные станции ►

Норвежский метеорологический институт располагает обширной сетью оперативных метеорологических наблюдений, охватывающей материковую часть Норвегии и архипелаг Шпицберген. Стратегия мониторинга многолетней мерзлоты заключается в создании полномасштабных метеостанций (включая мерзлотными станциями в тех же местах), чтобы проводить наблюдения эффективно, экономично и обеспечивать быстрый и легкий доступ к данным. Такую сеть институт выстраивал много лет. В целом, данные по температуре грунта передаются в режиме реального времени с восьми объектов для обеспечения оперативного мониторинга состояния ММ (рис. 1, таблица).

Система измерений температуры многолетней мерзлоты и их выполнение ►

На всех указанных мерзлотных станциях данные фиксируются автоматиче-

ски с помощью регистраторов производства компании Campbell Scientific со встроенным программным обеспечением (производства одноименной компании). Эти регистраторы подключаются к цифровым струнным датчикам температуры (термисторам) напрямую или, в случае аналоговых струнных датчиков, через мультиплексор (на станциях Янссонхауген и Юввашё). Данные передаются каждые 6 часов через сеть мобильной связи GSM или через спутниковую связь системы оператора Iridium с обеспечением удаленного доступа для обновлений программы. За исключением станции Искорас, где доступно только напряжение 220 В, питание аппаратуры обеспечивается солнечными батареями.

Временной интервал измерений термисторами составляет 6 часов. Исключением является станция Снёхейм, где используется интервал 1 час для более хорошего учета эффектов скрытой теплоты и потенциального конвективного переноса тепла, связанного с подземными водами, образующимися из-за деградации многолетней мерзлоты и образования таликов [24]. Температуру грунта на глубине более 5 м на станциях Янссонхауген и Юввашё измеряют один раз в 24 часа. Чтобы уловить высокую изменчивость температуры вблизи поверхности земли, для ненарушенной естественной температуры поверхности грунта вблизи скважин применяется почасовое разрешение. Для этого используются распределенные миниатюрные регистраторы температуры [25, 26] и стационарные датчики, жестко закрепленные на глубине 0,05 или 0,1 м, чтобы избежать атмосферных возмущений и прямой солнечной радиации [24]. Стационарные датчики подключены к метеостанции, что позволяет оценивать тепловые эффекты защитных крышек скважин и фиксировать локальную из-

менчивость температуры поверхности практически в реальном времени. Более подробную информацию об использованном скважинном оборудовании и применяемой системе измерений можно получить в публикациях [16] и [22].

Система оперативной передачи данных и управления ими ►

Данные по многолетней мерзлоте со станций Норвежского метеорологического института отправляются в общую систему приема, которая преобразует их по нескольким сценариям перед подачей во внутреннюю систему контроля качества. В дополнение к стандартной институтской схеме отправки данных, описанной выше, эта система приема способна взаимодействовать с множеством форматов файлов и протоколов передачи, позволяя переправлять информацию со станций, принадлежащих другим организациям, имеющим оборудование, которое не соответствует спецификациям НМИ. Таким путем все данные гармонизируются и оптимизируются для последующих необходимых последовательностей операций. (В настоящее время в НМИ разрабатывается новая система контроля качества, в которой данные по многолетней мерзлоте будут подвергаться нескольким автоматическим и ручным процедурам этого контроля. Результаты наблюдений в реальном времени будут затем непрерывно проверяться на наличие подозрительных или неверных значений и соответствующим образом помечаться, а отсутствующих наблюдениях будет сообщаться в целях немедленного выявления необходимости обслуживания той или иной станции.)

Все данные хранятся в архиве результатов наблюдений (Observation Data Archive – ODA) Норвежского метеорологического института. Этот архив представляет собой распределенную ба-

зу данных, доступную через API Frost (<https://frost.met.no/>) (API – Application Programming Interface – программный интерфейс, который описывает способы взаимодействия одной компьютерной программы с другими). API Frost обеспечивает свободный доступ к архиву исторической информации по погоде и климату НМИ и включает результаты измерений (с контролем качества) температуры грунта. Другая информация, например метаданные по метеостанциям, также доступна через API Frost.

Продукты, визуализирующие данные по температуре многолетней мерзлоты в режиме реального времени ►

На данный момент на портале <https://cryo.met.no/> предлагается 8 операционных продуктов (внутренних сервисов), которые визуализируют данные по многолетней мерзлоте в режиме реального времени. Однако этот портал постоянно развивается, и в будущем их может стать больше. Не все операционные продукты визуализируются для каждой станции, поскольку для некоторых из них решающее значение имеет определенный объем данных. Это также изменится, поскольку в ближайшие годы будет доступно все больше и больше данных.

Доступные сейчас продукты имеют следующие параметры:

- годовые временные ряды температуры грунта вблизи поверхности – на глубине 0,05 или 0,2 м;
- годовые временные ряды температуры в кровле многолетней мерзлоты;
- годовые временные ряды глубины изотермы 0 °С;
- максимальная годовая глубина изотермы 0 °С (толщина деятельного слоя);
- последний суточный профиль температуры грунта до глубины 30 м;
- среднегодовые профили температуры грунта для всех наблюдаемых глубин;
- временные ряды суточной температуры грунта для выбранных глубин (для станции Снёхейм: 0,2; 2,0; 4,5; 8,5 м; для других станций: 0,2; 1,6; 5,0; 10 м) за весь рассматриваемый период времени;
- долговременные изменения теплового состояния многолетней мерзлоты на глубине 10 и 20 м (для станции Снёхейм – на глубине 4,5 и 8,5 м).

Эти продукты производятся ежедневно и учитывают данные до предыдущего дня. На станции Янссонхауген результаты измерений передаются порциями, а не непрерывно в течение дня, что приводит к задержке выпуска про-

дуктов на срок до 14 дней. Однако в будущем планируется перейти на непрерывный поток данных. На указанном портале всегда показывается самая последняя доступная информация. В результате перерывы в потоке данных могут быть быстро обнаружены.

Чтобы сравнить результаты наблюдений за текущий год или данные за текущий день с данными за предыдущий, можно использовать результаты прошлых наблюдений, которые также доступны. Для более новых станций с наблюдениями в течение менее чем 6 лет данные показываются отдельно за каждый год. Для временных рядов продолжительностью более 5 лет вычисляются абсолютные минимум и максимум, медиана, межквартильный размах (вероятное отклонение) и размах между 10-м и 90-м процентилями за последние годы. Таким образом можно быстро визуально сопоставить фактические данные. Серьезной проблемой была стандартизация этой процедуры для различных станций, поскольку некоторые из них не дают непрерывных данных, охватывают разные периоды времени и к разным станциям приходится относиться неодинаково из-за залегания многолетней мерзлоты на разной глубине.

Получение операционных продуктов ►

Визуализация данных по многолетней мерзлоте осуществляется по R-сценарию (на языке программирования R), которые извлекают данные через API Frost и генерируют рисунки. Эта последовательность операций является частью операционной системы Норвежского метеорологического института и работает в локальной высокопроизводительной вычислительной системе, которая дублируется в двух отдельных виртуальных комнатах данных. Веб-сайт, на котором представлены вышеописанные продукты, реализован с использованием системы управления содержимым Drupal (www.drupal.org/) с открытым исходным кодом, которая является гибкой, хорошо поддерживается и используется широким сообществом. Это решение позволяет расширить базовую функциональность данной системы за счет обширного списка модулей, которые можно устанавливать или разрабатывать локально для создания новых сервисов или специальных функциональных возможностей. Веб-сайт www.drupal.org/ может предоставлять динамически обновляемые продукты, получая последние созданные изображения из локального хранилища,

синхронизированного с последовательностью операций. Рисунки создаются в формате PNG с хорошим разрешением, подходящим для непосредственного использования, например в презентациях или на других веб-порталах, и доступны как на английском, так и на норвежском языках. Кроме того, мерзлотные станции геопозиционируются на интерактивной карте с помощью библиотеки с открытым исходным кодом Leaflet (<https://leafletjs.com/>), которая предназначена для отображения карт на веб-сайтах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ►

Были проанализированы все доступные на момент написания статьи продукты визуализации для всех мерзлотных станций, работающих в реальном времени, которыми управляет Норвежский метеорологический институт. Чтобы проиллюстрировать в данной статье долговременные реакции многолетней мерзлоты на изменения климата, продолжающуюся деградацию ММ на двух станциях (Искорас и Снёхейм) и влияние экстремально теплых периодов на температуру грунта, был выбран ряд отрезков времени.

Долговременные тренды на Шпицбергене и на материковой части Норвегии ►

Начиная с 1998 года мониторинг термического состояния многолетней мерзлоты дает явные свидетельства ее потепления на Шпицбергене и на материковой части Норвегии.

Станция Янссонхауген на Шпицбергене имеет самый длинный полный временной ряд из всех рассматриваемых станций. Это позволяет изучать многолетние тренды изменений температуры и состояния ММ.

На рисунке 2 представлены четыре графических изображения, которые показывают многолетние изменения температуры грунта на разной глубине на станции Янссонхауген. Все они указывают на значительное потепление ММ в этом месте. Оно особенно заметно на глубинах 10 и 20 м, где тренды увеличения температуры составляют 0,9 и 0,7 °С за десятилетие соответственно. Сезонные колебания становятся незначительными на глубине 20 м (которая соответствует уровню с нулевой годовой амплитудой), что делает температуру на этой глубине подходящим показателем долговременных изменений теплового состояния многолетней мерзлоты [7], часто используемым в между-

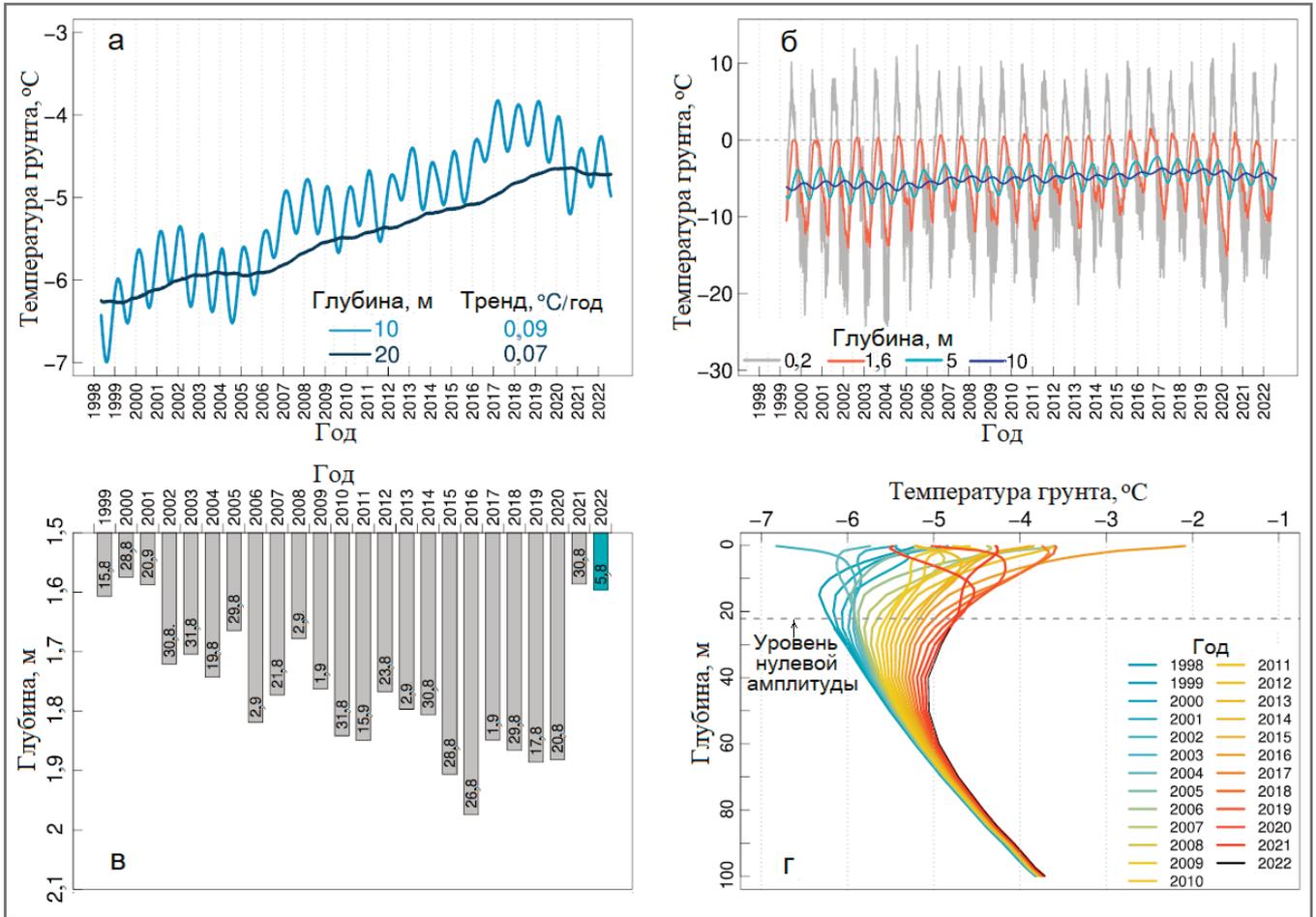


Рис. 2. Многолетние тренды изменений температуры грунта на мерзлотной станции Янссонхауген за 1998–2022 гг.: а – долговременные изменения температурного режима многолетней мерзлоты на глубине 10 и 20 м; б – сезонные колебания температуры грунта на глубине 0,2; 1,6; 5; 10 м; в – максимальные за год глубины изотермы 0 °С с указанием на диаграмме соответствующих дат; г – профили среднегодовой температуры грунта и средняя глубина нулевой годовой амплитуды. *Примечание:* временные ряды за 2022 год включают данные до 05.08.2022

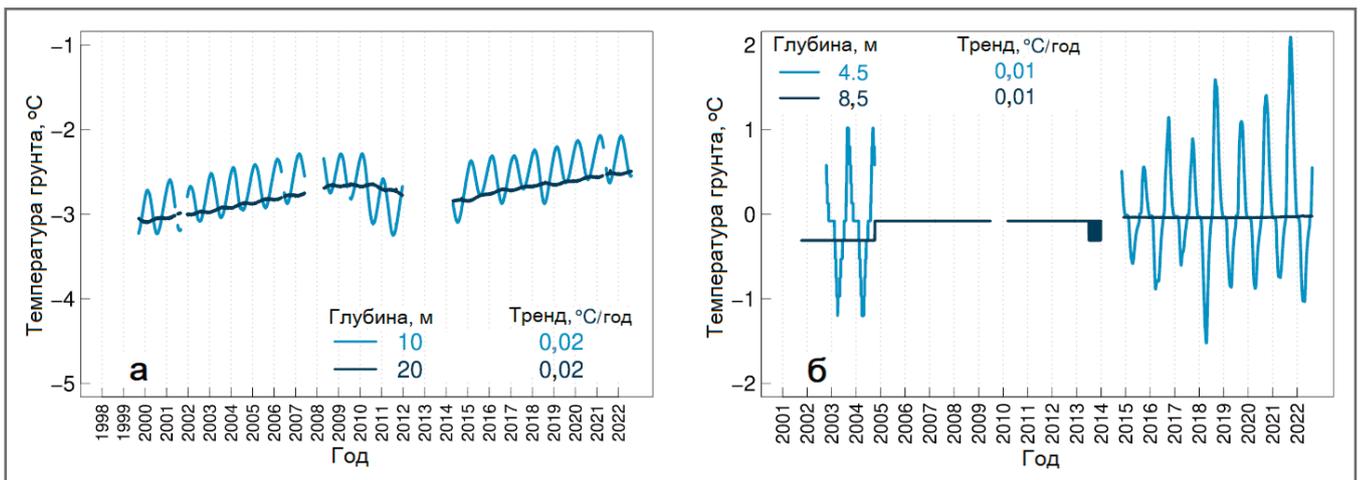


Рис. 3. Многолетние тренды изменений температуры грунта на станции Ювашё за период мониторинга 1999–2022 гг. (а) и в Снëхейме за период мониторинга 2001–2022 гг. (б). *Примечание:* временной ряд за 2022 год включает данные до 14.08.2022

народных оценочных отчетах (например, [27, 28]). Тренды к повышению температуры грунта вблизи поверхности земли менее очевидны, поскольку ее годовые колебания там гораздо сильнее. Однако профили среднегодовой температуры грунта ясно показывают

тренды к росту температуры в слоях ММ вблизи поверхности. За последние 25 лет значительное потепление наблюдается на глубине до 100 м. Кроме того, четко прослеживается тренд к увеличению максимальных за год глубин изотермы 0 °С. Если в начале рассматри-

ваемого временного ряда эта глубина составляла около 1,75 м, то в последние годы она в среднем приблизилась к 2 м.

На трех других станциях с многолетними наблюдениями, расположенных на материковой части Норвегии, температура многолетней мерзлоты также по-

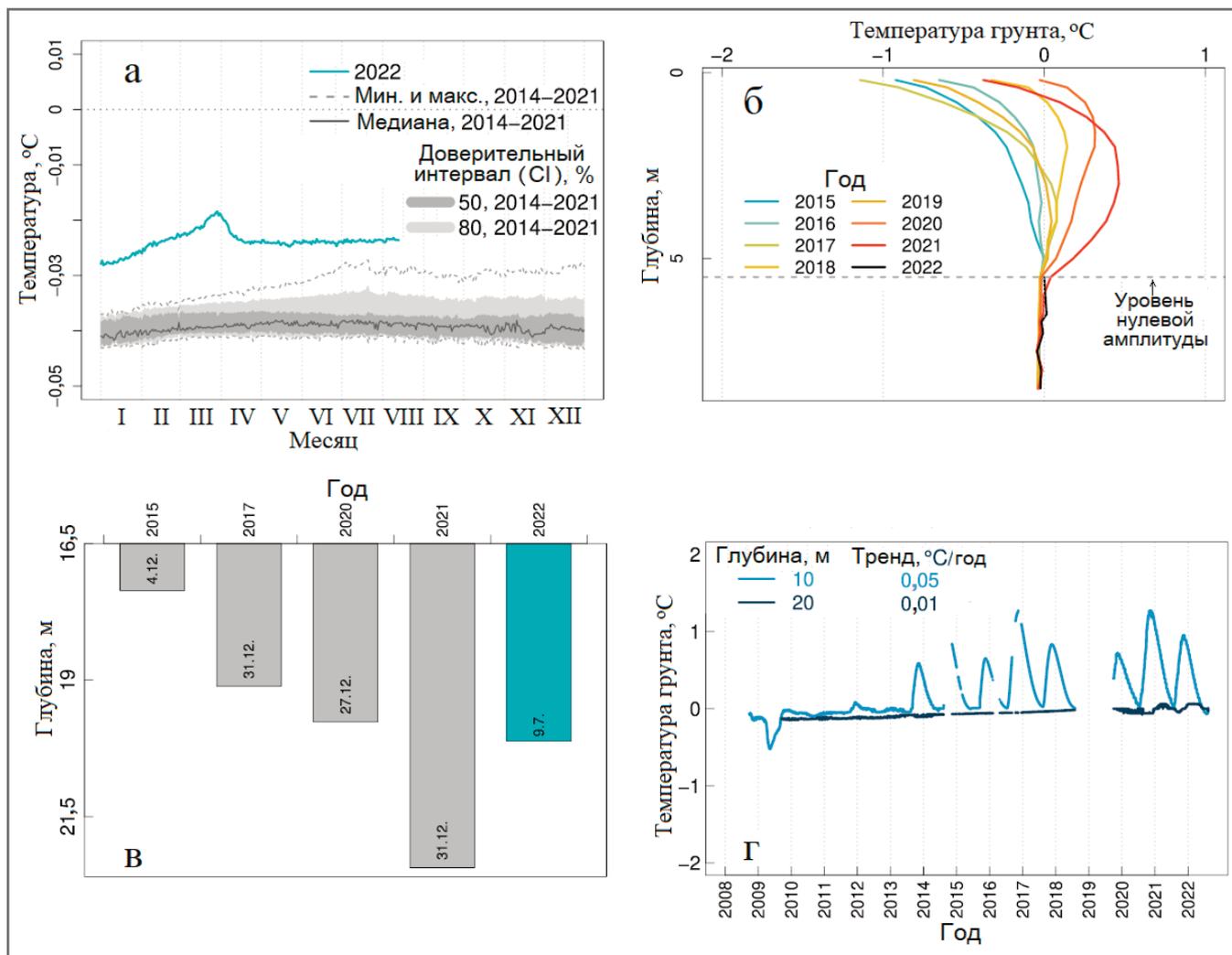


Рис. 4. Таяние многолетней мерзлоты в Снøхейме (а, б) и Искорасе (в, г): температура грунта в кровле многолетней мерзлоты на глубине 8,5 м (а); среднегодовые профили температуры грунта и средняя глубина нулевой годовой амплитуды (б); максимальные за год глубины изотермы 0 °С с указанием на диаграмме соответствующих дат (в); многолетние изменения термического состояния многолетней мерзлоты на глубинах 10 и 20 м (г). *Примечание:* временной ряд за 2022 год включает данные до 14.08.2022

вышалась (рис. 3). В Юввашё на глубинах 10 и 20 м она увеличивалась со скоростью 0,2 °С за десятилетие, в Снøхейме на глубинах 4,5 и 8,5 м она повышалась со скоростью 0,1 °С за десятилетие, тогда как в Искорасе (рис. 4, г) температура грунта на глубинах 10 и 20 м увеличивалась со скоростью 0,5 и 0,1 °С за десятилетие соответственно.

Мониторинг деградации многолетней мерзлоты в Норвегии ▶

Станции Искорас и Снøхейм соответственно на севере и на юге материковой части Норвегии расположены в районах прерывистой многолетней мерзлоты, где ММ в настоящее время тает.

На рисунке 4 представлены четыре графических изображения, иллюстрирующих деградацию ММ. В Снøхейме температура грунта на поверхности многолетней мерзлоты на глубине 8,5 м уже очень близка к 0 °С, причем в по-

следние годы она повысилась. Среднегодовые профили температуры грунта в Снøхейме похожи на профили в Янсонхаугене. Первые признаки деградации ММ и появления «островов» талых грунтов (таликов) или водных систем можно было увидеть после чрезвычайно теплой осени в 2006 году на близлежащих участках мониторинга многолетней мерзлоты между Снøхеймом и Йеркинном (на горном хребте Доврефель) [29].

В Искорасе таяние наиболее заметно для максимальной за год глубины изотермы 0 °С, которая увеличилась примерно с 17 до 22 м. К тому же там повысилась температура грунта на глубине 10 и 20 м. В начале серии наблюдений на этой станции в годовой амплитуде температур на глубине 10 м преобладал скрытый теплообмен. Быстрая реакция температуры грунта на деградацию многолетней мерзлоты и увеличение годовой амплитуды температу-

ры обусловлена таянием подземного льда, что приводит к более сухому слою вблизи поверхности земли и, следовательно, к изменениям в теплообмене вблизи поверхности [29]. Тренд скорости роста температуры на глубине 10 м составляет 0,5 °С за десятилетие, что в три раза превышает скорость потепления, наблюдаемую на станции Юввашё, и является одной из самых высоких среди станций, рассматриваемых в настоящей статье.

Экстремально теплая погода на юге материковой части Норвегии в 2005 и 2006 годах ▶

На рисунке 5 показаны временные ряды температуры грунта на глубине 0,2 и 2,5 м в Юввашё (на юге материковой части Норвегии) за 2005 и 2006 годы. В оба этих года было по несколько месяцев с температурой грунта выше среднего или даже выше бывшего максимума (январь, февраль, июль, октябрь, но-

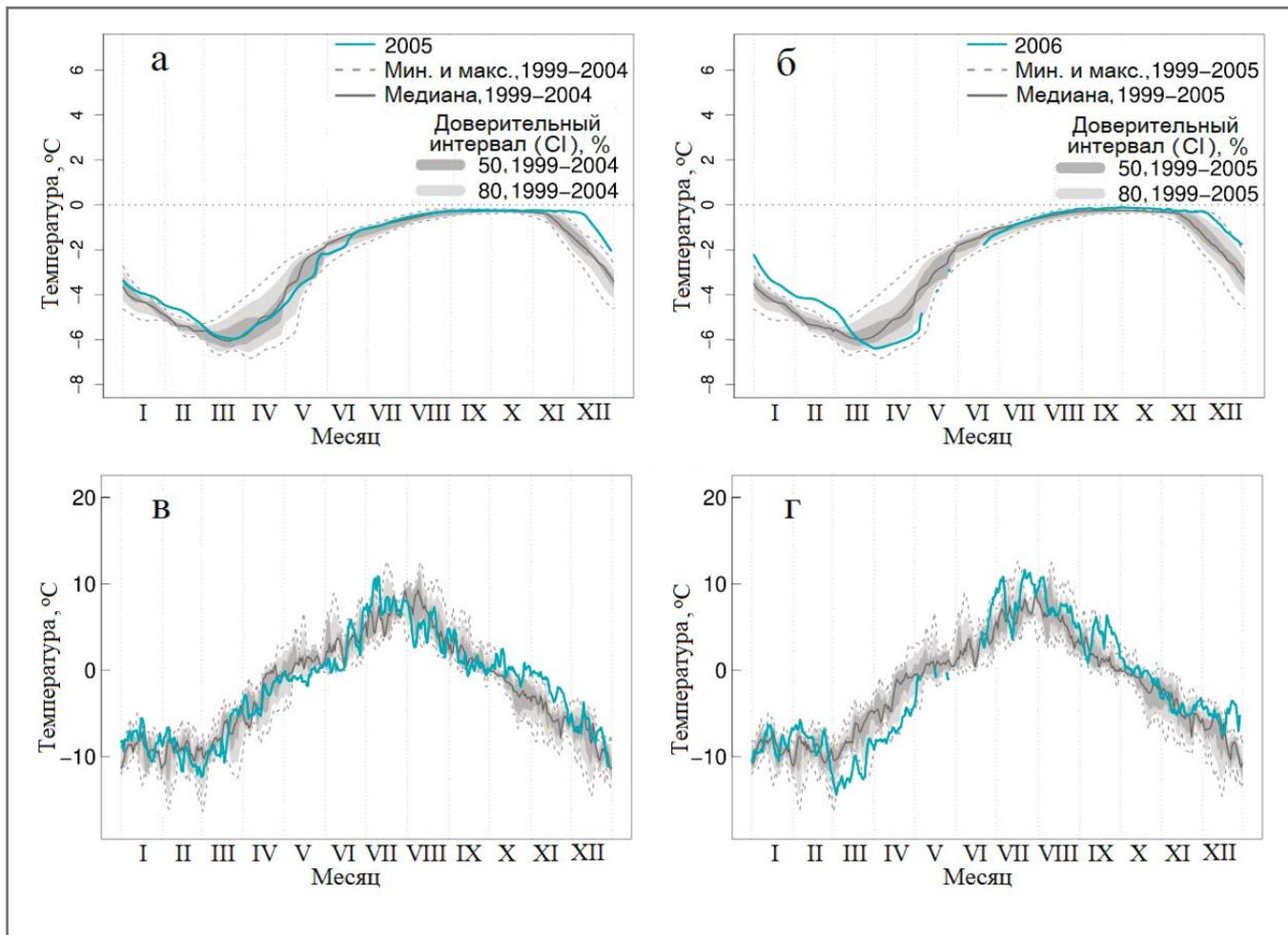


Рис. 5. Ход температуры грунта на станции Юввашё за 2005 год (а, в) и 2006 год (б, г): а, б – температура в кровле многолетней мерзлоты на глубине 2,5 м; в, г – температура грунта вблизи поверхности земли на глубине 0,2 м

ябрь и декабрь 2005 года; январь, февраль, ноябрь и декабрь 2006 года).

Особенно в конце лета и осенью 2006 года весьма продолжительная теплая погода затронула некоторые зоны Европы, включая южную часть материковой части Норвегии [30, 31], и привела к рекордно высоким температурам многолетней мерзлоты вблизи поверхности земли на станции Юввашё и к длительному замерзанию деятельного слоя. Необычное потепление привело к экстремальному таянию близлежащих высокогорных ледяных участков [32]. Это таяние выявило несколько археологических артефактов, таких как обувь возрастом 3400 лет [33, 34], и имело экологические последствия, такие как вспышка смертельного зоонозного заболевания (пастереллеза) в популяции овцебыков, что привело к гибели значительной части этих животных [35].

Экстремально теплая погода на Шпицбергене осенью 2016 года ▶

На рисунке 6 показаны изменения глубины изотермы 0 °C в Янссонхаугене на Шпицбергене за 2016 год. Видно,

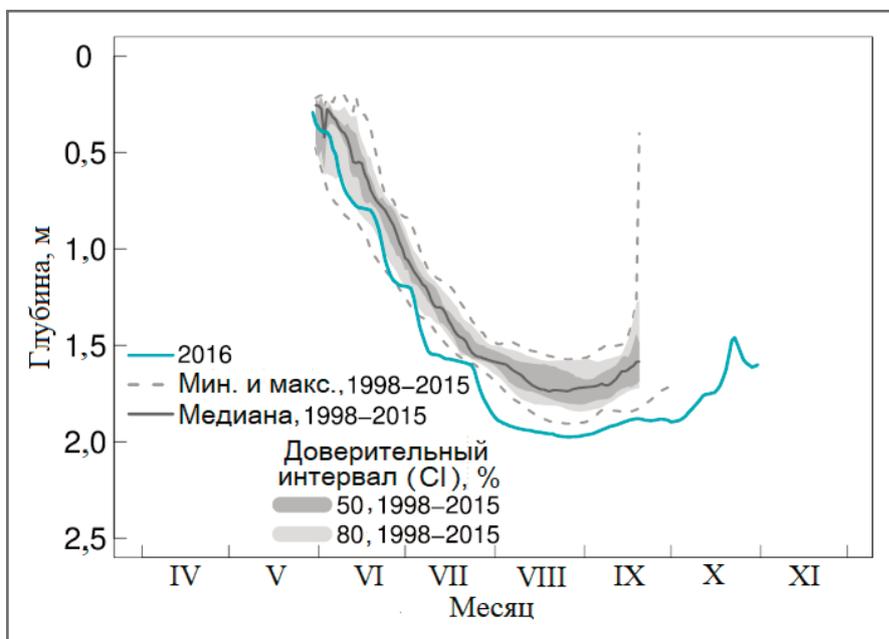


Рис. 6. Определение глубины изотермы 0 °C для станции Янссонхауген за 2016 год

что положение изотермы 0 °C уже в конце мая и начале июня находится глубже медианы предыдущих лет для конца мая и начала июня. В июле она достигает новой рекордно большой глу-

бины и остается ниже предыдущей максимальной глубины до октября. Это означает рекордно высокую толщину деятельного слоя грунта в этом месте. Обычно слой сезонного оттаивания за-

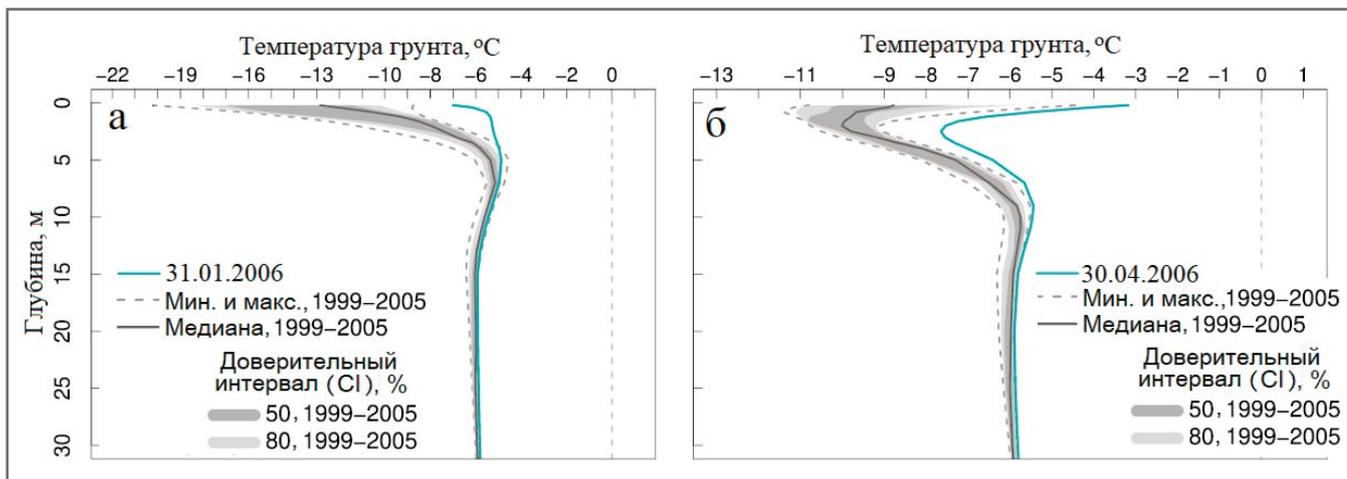


Рис. 7. Профили температуры грунта для станции Янссонхауген 31 января 2006 года (а) и 30 апреля 2006 года (б)

мерзал в течение сентября или первых дней октября каждый год с момента начала измерений в Янссонхаугене. В 2016 году деятельный слой не замерзал до начала ноября. Такая экстремальная глубина оттаивания и длительное замерзание сопровождалось аномально большим количеством дождевых осадков, что привело к нескольким оползням и селевым потокам в близлежащем городе Лонгйирбиен и его окрестностях [36]. Жители домов, которые раньше были безопасными, были срочно

эвакуированы. Местность, в которой раньше обычно совершались пешие прогулки, стала опасной. Дороги, которыми пользовались в предыдущие годы, были закрыты до тех пор, пока неустойчивые склоны над ними не промерзли.

Экстремальное потепление многолетней мерзлоты вблизи поверхности на Шпицбергене в 2006 году ►

На рисунке 7 показаны профили температуры грунта в конце января и

в апреле 2006 года для станции Янссонхауген на Шпицбергене. В слоях многолетней мерзлоты вблизи поверхности (до глубины 5–10 м) наблюдались очень высокие температуры, существенно превышавшие их максимальные значения в предыдущие годы. Температура грунта составляла минус 7 °С в январе и минус 3 °С в апреле (обычно в те же дни и на той же глубине средние температуры были на 6 °С ниже).

Эти экстремальные температуры грунта в сочетании с высокими темпе-

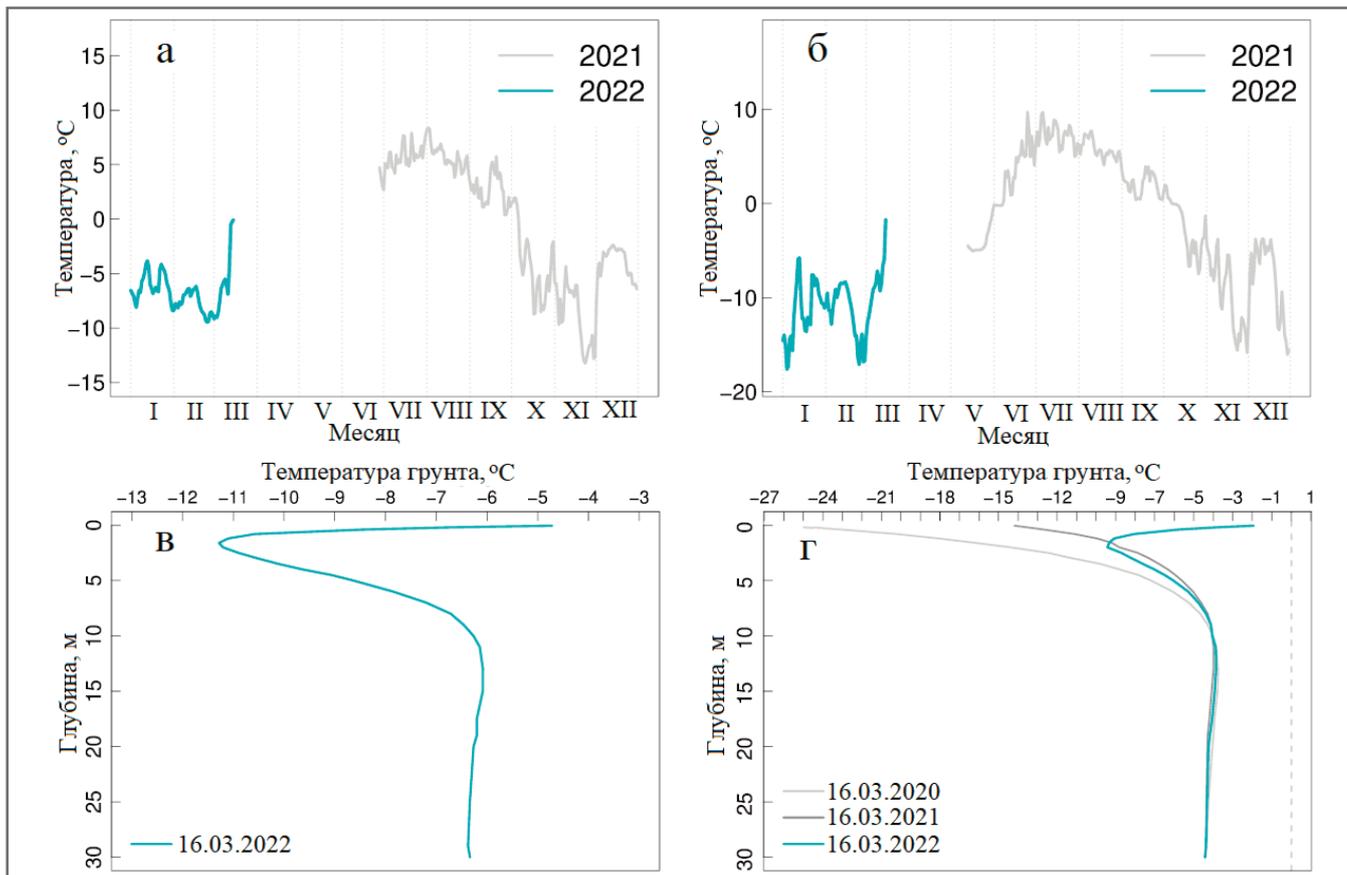


Рис. 8. Температура грунта вблизи поверхности в 2021 и 2022 годах (а, б) и ее изменения с глубиной 16 марта 2022, 2021, 2022 годов (в, г) на Шпицбергене: на станции Квадехукен на глубине 0,05 м (а); на станции Недре Сассендален на глубине 0,05 м (б); на станции Клаува (в); на станции Ферлегенхукен (д)

ратурами вблизи поверхности летом 2006 года (в статье они графически не показаны) повлияли на глубину оттаивания деятельного слоя. Начало оттаивания было самым ранним за всю предыдущую историю наблюдений, а максимальная толщина слоя сезонного оттаивания увеличилась на 11% по сравнению со средним показателем за предыдущие годы [37]. Авторы работы [37] также пришли к выводу, что наиболее показательными в этом отношении месяцами в 2006 году на Шпицбергене были январь и апрель, когда средняя температура воздуха была выше средней температуры за 1961–1990 годы на 12,6 и 12,2 °C соответственно. Апрель 2006 года был теплее мая во все предыдущие годы наблюдений, а январь 2006 года был теплее апреля во все предыдущие годы. Эта аномалия совпала с наличием открытой воды в большинстве фьордов на протяжении всей зимы, а необычно раннее таяние снегов привело к экстремальным расходам талых вод в долинах.

Новые станции с короткими временными рядами наблюдений ►

На рисунке 8 показаны некоторые графические изображения для четырех самых новых мерзлотных станций Норвежского метеорологического института. Они разбросаны по всему Шпицбергену, и для них к моменту написания данной статьи имелись ряды измерений температуры грунта за 1–3 года. Несмотря на непродолжительные наблюдения, удалось обнаружить весьма необычное потепление в марте 2022 года. Временные ряды температур грунта вблизи поверхности на станциях Квадехукен и Недре Сассендален говорят о значительном повышении температуры в середине марта. Среднесуточные профили температуры для станций Клаува и Верлегенхукен также говорят об очень высоких температурах вблизи поверхности. В это время года обычен профиль с понижением температуры по направлению к поверхности земли. Это показали измерения предыдущих лет на станции Верлегенхукен, где в 2020 году температура составляла минус 24 °C. В 2022 же году температура была значительно выше – минус 10 °C.

ОБСУЖДЕНИЕ ►

Значительное потепление и заметная деградация многолетней мерзлоты наблюдались на всех рассмотренных в статье мерзлотных станциях на матери-

ковой части Норвегии и на Шпицбергене, где температура ММ измерялась в течение многих лет. Это соответствует самым современным глобальным оценкам температуры ММ [6, 7]. Однако имеется значительная региональная изменчивость в величине этого потепления, связанная главным образом с различиями в отношении близости температуры многолетней мерзлоты к 0 °C [7] и различий в климатических условиях. Самые большие изменения наблюдаются на станциях Шпицбергена, где в настоящее время потепление идет в 7 раз быстрее, чем в среднем в мире [38].

Подходы к многолетним наблюдениям за ММ всегда были и будут совершенствоваться благодаря новым открытиям и опыту [39]. Оперативный мониторинг ММ требует эффективных стратегий наряду со стандартами обработки результатов измерений, контроля их качества, архивирования и отчетности во всех национальных и международных сетях, а также определения основных параметров наблюдений [39].

В настоящее время данные и метаданные передаются в международную Глобальную сеть мониторинга криосфер (Global Terrestrial Network for Permafrost – GTN-P) вручную. Ведется работа по развитию оперативных сервисов по получению данных, касающихся ММ, через Глобальную службу наблюдений за криосферой (Global Cryosphere Watch – GCW) Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organisation, WMO). Управление данными GCW интегрируется с Информационной системой WMO, которая в настоящее время использует Глобальную систему телесвязи (Global Telecommunication System – GTS) в рамках WMO для обмена данными в реальном времени, но находится в процессе перехода к Информационной системе WMO (WMO Information System – WIS 2.0), которая заменит существующий функционал GTS на телеметрическую передачу информации в режиме очереди сообщений (Message Queue Telemetry Transport – MQTT) [40]. По сути, это означает, что обмен данными в реальном времени основан на подходе «публикация/подписка», при котором заинтересованные потребители данных подписываются на обновления набора данных. GCW выполняет и публикует оценки состояния криосферы и активно работает над улучшением доступности данных на этом сервисе.

Усилия, производимые GCW в рамках WMO заключаются в разработках и

публикациях по поводу наилучших практических подходов в отношении приборов и методов наблюдений за многолетней мерзлотой и сезонно-мерзлыми грунтами в целях определения эталонных методов размещения и эксплуатации мерзлотных станций в высокогорьях и полярных регионах. Опыт, полученный в ходе оперативного мониторинга ММ, описанный в данной статье, может быть здесь полезен, поскольку он устраняет некоторые пробелы в существующих системах наблюдений за ММ и определяет методы повышения доступности и наглядности данных по температуре многолетней мерзлоты как в режиме реального времени, так и обновленных. Кроме того, этот опыт позволяет решать ряд проблем в отдаленных районах, где выработка и потребление энергии, связь и поддержание сбора данных имеют решающее значение для проведения мониторинга в промежутках между посещениями станций людьми.

На материковой части Норвегии и на Шпицбергене имеются большие преимущества в том, что мерзлотные станции размещаются рядом с существующими и новыми официальными метеостанциями. Они стали частью национальной метеорологической инфраструктуры, обеспечивающей длительную стабильную работу и техническое обслуживание. При этом стандартная программа наблюдений на официальных метеостанциях, расположенных рядом с мерзлотными станциями, была расширена за счет наблюдений за влажностью грунта, глубиной снежного покрова, температурой снега и параметрами освещенности поверхности. Это обеспечивает согласованность и тесное сотрудничество между крупными национальными и международными инициативами, минимизацию воздействия оборудования на окружающую среду, а инвестиции в новые станции добавляют ценности тому, что уже существует. Данные по ММ становятся более доступными и лучше связанными с сообществами по моделированию климата, снежного покрова и многолетней мерзлоты, а также с сообществом по дистанционному зондированию, например необходимому для калибровки и валидации данных и результатов их обработки и анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Оперативный мониторинг многолетней мерзлоты (<https://ryo.met.no/>) предоставляет уникальную возмож-

ность отслеживать данные по температуре грунта в восьми местах на юге и севере материковой части Норвегии, а также на Шпицбергене, получая информацию быстрее, чем когда-либо прежде. Результаты измерений визуализируются и сравниваются с данными предыдущих лет с использованием восьми различных продуктов обработки и анализа. Но еще не все продукты можно получить для каждой мерзлотной станции. Они выбираются таким образом, чтобы охватить наиболее важные уровни грунта и характеристики ММ.

Ежедневное обновление продуктов позволяет заблаговременно обнаруживать, например, рекордно большую толщину деятельного слоя, выраженное повышение температуры ММ и другие экстремальные условия в многолетнемерзлых грунтах. Это уже дает четкие доказательства потепления многолетней мерзлоты по всей территории материковой части Норвегии и Шпицберге-

на со скоростью потепления до 0,7 °С за десятилетие на глубине нулевой годовой амплитуды температуры, а также обеспечивает тщательный мониторинг таяния и в конечном итоге исчезновения ММ на двух станциях наблюдений. Кроме того, визуализация данных позволяет обнаружить несоответствия и сбои в измерениях.

Данные, подтверждающие выводы авторов представленного исследования, находятся в открытом доступе по следующему адресу: <https://frost.met.no/index.html>.

Авторы данной статьи хотели бы в будущем дополнить портал другими пунктами наблюдений за многолетней мерзлотой, в том числе станциями внешних владельцев, а также другими продуктами, чтобы сделать его полезным для оценок ММ. **И**

Норвежские мерзлотные станции создаются в сотрудничестве с Университетом Осло, Университетским

центром на Шпицбергене, Норвежским полярным институтом и Норвежским университетом наук и технологий. Четыре такие станции, расположенные в отдаленных местах на Шпицбергене (Верлегенхукен, Квадехукен, Недре-Сассендален и Клаува), были недавно созданы в рамках проектов Комплексной арктической системы наблюдений за Землей на Шпицбергене (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System) «Развитие инфраструктуры норвежского узла» (SIOS InfraNOR, <https://siossvalbard.org/>), Исследовательский совет Норвегии, проект № 269927) и Климатологической обсерватории арктической тундры (Climate-ecological Observatory for Arctic Tundra – COAT, www.coat.nem.ru/). Часть работ, связанных с разработкой новых продуктов по многолетней мерзлоте, была выполнена при поддержке Программы мониторинга и оценки Арктики (Arctic Monitoring and Assessment Programme – AMAP).

ПРИЛОЖЕНИЕ ►

Работающие мерзлотные станции (дополнительная информация) ►

Все восемь скважин для наблюдений за многолетнемерзлыми грунтами были пробурены путем ударно-вращательного бурения и имели диаметр 56–110 мм. Шлам выбрасывался наверх избытком воздуха при работе пневмоударника, что позволяло отбирать валовые пробы грунта и образцы в пробоотборных мешочках [41, 42].

Глубина скважин варьирует от 9 м (на станции Снэхејм) до 129 м (на станции Юввашё), и все они обсажены водонепроницаемыми полиэтиленовыми трубами, герметичными в основании, чтобы защитить скважины от засорения рыхлым мусором, камнями и льдом. Обсадные трубы также защищают датчики от влаги, в то же время обеспечивая легкий доступ к приборам при техническом обслуживании и периодической повторной калибровке. Кроме того, скважины остаются доступными для установки других приборов в будущем. Влияние конвекции воздуха внутри скважин считается незначительным [24].

Обсадные колонны скважин, датчики и оборудование для регистрации данных были смонтированы в соответствии с руководящими принципами финансируемого Европейским Союзом

проекта PACE (Permafrost and Climate in Europe – «Многолетняя мерзлота и климат в Европе») [15] для стандартизации процедур и обеспечения сопоставимости данных с разных станций [15]. Это также обеспечило надежность и удобство обслуживания.

Система измерений температуры многолетней мерзлоты и их выполнение (дополнительная информация) ►

На двух первых буровых площадках (Янссонхауген и Юввашё), было пробурено по одной контрольной скважине глубиной 15–20 м на расстоянии 5–20 м от основной [16]. Эти неглубокие скважины были созданы для обнаружения теплового воздействия защитной конструкции, расположенной наверху основных скважин, а также для обеспечения хорошего разрешения и контроля качества (например, для контроля долговременной стабильности термисторов) определения годовых вариаций температуры грунта.

На мерзлотных станциях Янссонхауген и Юввашё температура грунта в скважинах измеряется с помощью аналоговых струнных датчиков температуры YSI 44006 с отрицательными температурными коэффициентами (производства компании Yellow Spring Instruments). Оценка абсолютной точности составляет плюс-минус 0,05 °С, а относительной – плюс-минус 0,02 °С [43].

На остальных станциях температура грунта в скважинах измеряется с помощью цифровых датчиков производства компании Beadedstream (США) с абсолютной точностью плюс-минус 0,1 °С и разрешением плюс-минус 0,063 °С.

Глубина размещения термисторов на станциях Юввашё и Янссонхауген соответствует общим инструкциям для скважин по проекту PACE [15]: 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0; 7,0; 9,0; 10,0; 13,0; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0 м; далее интервал между датчиками составляет 10 м вплоть до глубины 80,0 м; далее он снова становится меньше вплоть до глубины 100,0 м. Для скважин на остальных станциях были установлены датчики температуры на дополнительных уровнях – с интервалом 0,5 м на глубине от 2,0 до 6,0 м и с интервалом 1 м на глубине от 6,0 до 11,0 м. Это обеспечивает более хорошую точность определения глубины изотермы 0 °С в деятельном слое и более точное обнаружение мест, подверженных деградации многолетней мерзлоты.

Система оперативной передачи данных и управления ими (дополнительная информация) ►

Недостатком вывода данных через программный интерфейс (API) Frost является то, что формат получаемого файла не соответствует четырем основополагающим руководящим принципам – возможности поиска, доступно-

сти, взаимодействия и повторного использования (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability – FAIR [44]) на уровнях обнаружения и использования. К счастью, в архиве результатов наблюдений (Observation Data Archive – ODA) Норвежского метеорологического института для идентификации переменных используются стандартные названия из Конвенции по климату и прогнозам (CF, <https://cfconventions.org>). С помощью этого и API Frost данные извлекаются в формате CF-NetCDF с использованием дискретной геометрии выборки, предусмотренной Конвенцией CF. Ведется разработка предоставления доступа к этим файлам через информационные порталы проекта

SIOS (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System – «Интегрированная арктическая система наблюдений за Землей на Шпицбергене») и Глобальной службы наблюдений за криосферой (Global Cryosphere Watch, GCW).

Использование файлов в формате CF-NetCDF также позволяет автоматически визуализировать данные при их передаче через Проект с открытым исходным кодом для протокола доступа к сетевым данным (Open-source Project for a Network Data Access Protocol – OPeNDAP). Описанные в статье наборы данных на веб-порталах SIOS и GCW являются первыми известными к моменту написания статьи массивами данных по многолетней мерзлоте, доступными

практически в реальном времени. В настоящее время осуществляется извлечение информации в формате CF-NetCDF. Помимо доступности на веб-порталах SIOS и GCW наборы данных также будут доступны через стандартные интерфейсы метаданных для машинного обнаружения, такие как OAI-PMH и OGC CSW, обслуживающие форматы GCMD DIF и в соответствии со стандартом ISO19115 (последние соответствуют требованиям инициативы Европейской комиссии «Инфраструктура для пространственной информации в Европе» (Infrastructure for spatial information in Europe – INSPIRE) и Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organisation – WMO)).

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Isaksen K, Lutz J., Sorensen A.M., Godoy O., Ferrighi L., Eastwood S., Aaboe S. Advances in operational permafrost monitoring on Svalbard and in Norway // *Environmental Research Letters*. IOP Publishing Ltd., 2022. Vol. 17. № 9. Article 095012. DOI:10.1088/1748-9326/ac8e1c. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac8e1c>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. AMAP. Snow, water, ice and permafrost in the arctic (SWIPA): technical report. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017.
2. Belward A., Bourassa M., Dowell M., Briggs S., Dolman H., Holmlund K., Verstraete M. The global observing system for climate: implementation needs: technical report GCOS-200. World Meteorological Organization (WMO), 2016.
3. Bojinski S., Verstraete M., Peterson T.C., Richter C., Simmons A., Zemp M. The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 95. P. 1431–1443.
4. Canadell J.G. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. V. Masson-Delmotte et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021).
5. Miner K.R., Turetsky M.R., Malina E., Bartsch A., Tamminen J., McGuire A.D., Fix A., Sweeney C., Elder C.D., Miller C.E. // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022. Vol. 3. P. 55–67.
6. Biskaborn B.K. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. Article 264.
7. Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K., Noetzi J., Romanovsky V.E. The Changing Thermal State of Permafrost // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022. Vol. 3. P. 10–23.
8. Jones M.K.W., Pollard W.H., Jones B.M. Rapid initialization of retrogressive thaw slumps in the Canadian high Arctic and their response to climate and terrain factors // *Environ. Res. Lett.* 2019. Vol. 14. № 5. Article 055006.
9. Liljedahl A.K. et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nat. Geosci.* 2016. Vol. 9. P. 312–318.
10. Haerberli W., Schaub Y., Huggel C. Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges // *Geomorphology*. 2017. Vol. 293. Part B. P. 405–417.
11. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review // *Vadose Zone J.* 2016. Vol. 15. P. 1–20.
12. Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022. Vol. 3. P. 24–38.
13. Bommer C., Phillips M., Arenson L.U. Practical recommendations for planning, constructing and maintaining infrastructure in mountain permafrost // *Permafr. Periglac. Process.* 2010. Vol. 21. P. 97–104.
14. Burke E.J., Zhang Y., Krinner G. Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change // *Cryosphere*. 2020. Vol. 14. P. 3155–3174.
15. Harris C., Haerberli W., Vonder Muhll D., King L. Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE project in its global context // *Permafr. Periglac. Process.* 2001. Vol. 12. P. 3–11.
16. Isaksen K., Holmlund P., Sollid J.L., Harris C. Three deep Alpine-permafrost boreholes in Svalbard and Scandinavia // *Permafr. Periglac. Process.* 2001. Vol. 12. P. 13–25.

17. Sollid J.L., Holmlund P., Isaksen K., Harris C. Deep permafrost boreholes in western Svalbard, northern Sweden and southern Norway // *Nor. J. Geogr.* 2000. Vol. 54. P. 186–191.
18. Isaksen K., Sollid J.L., Holmlund P., Harris C. Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia // *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* 2007. Vol. 112. P. 1–11.
19. Eitzmuller B., Guglielmin M., Hauck C., Hilbich C., Hoelzle M., Isaksen K., Noetzi J., Oliva M., Ramos M. Twenty years of European mountain permafrost dynamics – the PACE legacy // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. № 10. Article 104070.
20. Sollid J., Isaksen K., Eiken T., Odegard R. The transition zone of mountain permafrost on Dovrefjell, southern Norway // *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, 2003.* Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003. Vol. 2. P. 1085–1090.
21. Farbrot H., Hipp T.F., Eitzmuller B., Isaksen K., Odegard R.S., Schuler T.V., Humlum O. Air and ground temperature variations observed along elevation and continentality gradients in southern Norway // *Permafr. Periglac. Process.* 2011. Vol. 22. P. 343–360.
22. Christiansen H.H. et al. The thermal state of permafrost in the Nordic area during IPY 2007–2009 // *Permafr. Periglac. Process.* 2010. Vol. 21. P. 156–181.
23. Pedersen A.O. et al. 2021 Climate-ecological observatory for arctic tundra (COAT) – adaptive system for long-term terrestrial monitoring // *Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System: SESS report 2021* (ed. J. Feldner, C. Hubner, H. Lihavainen, R. Neuber, A. Zaborska) Longyearbyen, 2021. P. 38–55.
24. Noetzi J. et al. Best practice for measuring permafrost temperature in boreholes based on the experience in the Swiss Alps // *Front. Earth Sci.* 2021. Vol. 9. Article 607875.
25. Hoelzle M., Wegmann M., Krummenacher B. Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: first experience from the Swiss Alps // *Permafr. Periglac. Process.* 1999. Vol. 10. P. 113–124.
26. Hoelzle M., Haeberli W., Dischl M., Peschke W. Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes // *Glob. Planet. Change.* 2003. Vol. 36. № 4. P. 295–306.
27. Fox-Kemper B. et al. *Climate Change 2021. Chapter 9. Ocean, cryosphere and sea level change. IPCC AR6 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR6)* (ed. V. Masson-Delmotte et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 1211–1362.
28. Druckenmiller M.L. et al. The Arctic // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2021. Vol. 102. P. 263–316.
29. Isaksen K., Odegard R.S., Eitzmuller B., Hilbich C., Hauck C., Farbrot H., Eiken T., Hygen H.O., Hipp T.F. Degrading mountain permafrost in southern Norway: spatial and temporal variability of mean ground temperatures, 1999–2009 // *Permafr. Periglac. Process.* 2011. Vol. 22. P. 361–377.
30. Luterbacher J., Liniger M.A., Menzel A., Estrella N., Della-Marta P.M., Pfister C., Rutishauser T., Xoplaki E. Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. Article L12704.
31. Van Oldenborgh G.J. How unusual was autumn 2006 in Europe? // *Clim. Past.* European Geosciences Union, 2007. Vol. 3. № 4. P. 659–668. URL: <https://cp.copernicus.org/articles/3/659/2007/cp-3-659-2007.html>.
32. Odegard R.S., Nesje A., Isaksen K., Andreassen L.M., Eiken T., Schwikowski M., Uglietti C. Climate change threatens archaeologically significant ice patches: insights into their age, internal structure, mass balance and climate sensitivity // *Cryosphere.* 2017. Vol. 11. № 1. P. 17–32.
33. Finstad E., Vedeler M. *En bronsealdersko fra jotunheimen // Viking 2008* (Norsk Arkeologisk ARbok). Oslo: Norwegian Archaeological Society, 2008. Vol. 71. P. 61–70.
34. Pilo L., Finstad E., Ramsey C.B., Martinsen J.R.P., Nesje A., Solli B., Wangen V., Callanan M., Barrett J.H. The chronology of reindeer hunting on Norway's highest ice patches // *R. Soc. Open Sci.* 2018. Vol. 5. № 1. Article 171738.
35. Ytrehus B., Bretten T., Bergsjø B., Isaksen K. Fatal pneumonia epizootic in musk ox (*Ovibos moschatus*) in a period of extraordinary weather conditions // *EcoHealth.* 2008. Vol. 5. № 2. P. 213–223.
36. Hanssen-Bauer I., Forland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sando A.B., Sorteberg A. *Climate in Norway 2100 – a knowledge base for climate adaptation: NCCS Report.* 2019. Vol. 1.
37. Isaksen K., Benestad R.E., Harris C., Sollid J.L. Recent extreme near-surface permafrost temperatures on Svalbard in relation to future climate scenarios // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. Article L17502.
38. Isaksen K. et al. Exceptional warming over the Barents area // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. Article 9371.
39. Haeberli W., Noetzi J., Arenson L., Delaloye R., Gartner-Roer I., Gruber S., Isaksen K., Kneisel C., Krautblatter M., Phillips M. Mountain permafrost: development and challenges of a young research field // *J. Glaciol.* 2010. Vol. 56. P. 1043–1058.
40. WMO information system 2.0 strategy: technical report 1213. World Meteorological Organization (WMO), 2018.
41. Isaksen K., Odegard R.S., Eiken T., Sollid J.L. Composition, flow, and development of two tongue-shaped rock glaciers in the permafrost of Svalbard // *Permafr. Periglac. Process.* 2000. Vol. 11. P. 241–257.
42. Christiansen J.R., Rockmann T., Popa M.E., Sapart C.J., Jorgensen C.J. Carbon emissions from the edge of the Greenland ice sheet reveal subglacial processes of methane and carbon dioxide turnover // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2021. Vol. 126. Article e2021JG006308.
43. Muhll D.S.V., Holub P. Borehole logging in alpine permafrost, upper Engadin, Swiss Alps // *Permafr. Periglac. Process.* 1992. Vol. 3. № 2. P. 125–132.
44. Wilkinson M.D. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship // *Sci. Data.* 2016. Vol. 3. Article 160018.