

УДК 551.343:551.8

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-4-11

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В РОССИИ

Анатолий Викторович Брушков¹✉, Анастасия Игоревна Васина²,
Надежда Владимировна Кияшко³, Михаил Исметович Мельников⁴,
Алексей Алексеевич Осокин⁵, Юлия Владимировна Черняк⁶,
Арина Андреевна Фалалеева⁷

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; brouchkov@geol.msu.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; aivasina97@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nadin130187@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mikle99@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alesha.osokin.98@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yuchernyak@mail.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; falaleeva_arina@mail.ru

Аннотация. Выполнен обзор теории глобального потепления, рассмотрена возможная реакция вечной мерзлоты на изменения климата, показан сложный характер связи температуры горных пород и температуры воздуха, описан возможный масштаб деградации вечной мерзлоты в России и вероятный экономический ущерб. Приведены примеры деформаций зданий и инженерных сооружений. Авторами обоснован вариант комплексной системы мониторинга вечной мерзлоты, включающий прогноз и управление состоянием вечной мерзлоты, как одного из мероприятий по адаптации к климатическим изменениям.

Ключевые слова: глобальное потепления, изменения климата, вечная мерзлота, устойчивость зданий и инженерных сооружений, мониторинг

Для цитирования: Брушков А.В., Васина А.И., Кияшко Н.В., Мельников М.И., Осокин А.А., Черняк Ю.В., Фалалеева А.А. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 4–11.

GLOBAL WARMING AND PERMAFROST CONDITION IN RUSSIA

Anatoly V. Broushkov¹✉, Anastasya I. Vasina², Nadezhda V. Kiyashko³,
Mikhail I. Melnikov⁴, Aleksei A. Osokin⁵, Yuliya V. Chernyak⁶, Arina A. Falaleeva⁷

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; brouchkov@geol.msu.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; aivasina97@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nadin130187@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mikle99@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alesha.osokin.98@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yuchernyak@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; falaleeva_arina@mail.ru

Abstract. A review of the theory of global warming was carried out, the possible reaction of permafrost to climate change was considered, the complex nature of the relationship between soil temperature and air temperature was shown, the possible scale of permafrost degradation in Russia and the likely economic damage were described. Examples of deformations of buildings and engineering structures are given. It is proposed by authors a variant of complex permafrost monitoring system including forecast and management as one of the measures to adapt to climatic changes.

Keywords: global warming, climate change, permafrost, sustainability of buildings and engineering structures, monitoring

For citation: Broushkov A.V., Vasina A.I., Kiyashko N.V., Melnikov V.I., Osokin A.A., Chernyak Yu.V., Falaleeva A.A. Global warming and permafrost condition in Russia. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 4–11. (In Russ.).

Введение. Явление глобального потепления — один из наиболее актуальных и обсуждаемых вопросов в научной литературе. Ему посвящена обширная литература, имеются фундаментальные обобщения [Biskaborn и др., 2019; IPCC, 2019]. Среди специалистов, включая геологов, встречается, хотя и редкое, мнение о недостаточной обо-

снованности теории антропогенного потепления в XXI веке, а также о недооцененной роли геологических факторов или цикличности природных процессов, в частности, солнечной активности [Landscheidt, 2003; Berry, 2006; Корзун, 2009; Панин и др., 2017 и др.]. Оно имеет под собой некоторое фактическое основание, связанное с изучением

истории четвертичного периода и соответствующих отложений.

Возможные последствия глобального потепления, несмотря на интенсивные исследования последних лет, еще не вполне ясны. Особенно это касается природных объектов, не изученных в достаточной мере, в частности, вечной мерзлоты. С другой стороны, вечная мерзлота сама является индикатором потепления, а ее состояние — доказательством происходящих изменений. При этом значение вечной мерзлоты для России трудно переоценить. В Арктике и Сибири находится значительное число месторождений полезных ископаемых и ведется интенсивная их разведка и добыча [Кондратьев, 2020]. Большая часть зданий и инженерных сооружений, включая дороги и трубопроводы, построены с учетом мерзлого состояния грунтовых оснований. При потеплении и деградации вечной мерзлоты произойдет нарушение их устойчивости, и при отсутствии мероприятий по адаптации к климатическим изменениям будет нанесен значительный ущерб северной инфраструктуре [Мельников и др., 2021].

В настоящей статье была поставлена цель дополнить на основании опубликованных исследований и некоторых собственных материалов авторов анализ концепции потепления применительно к состоянию вечной мерзлоты в России, устойчивости зданий и инженерных сооружений, и обсудить тренды изменений теплового режима грунтов, а также возможные последствия этих трендов.

Теория антропогенного потепления в XXI в.

Особенностью современных изменений климата является потепление конца XX в. — начала XXI в., отмеченное со второй половины 1970-х годов, которому предшествовало похолодание с 1940 до 1970 г. [IPCC, 2019]. Исследователями рассмотрены его возможные причины.

С геологической точки зрения, за последний миллион лет такие теплые периоды, в одном из которых мы сейчас живем, длились в основном недолго, 10–12 тыс. лет. Это дает некоторое основание считать, что в будущем благодаря естественным колебаниям циркуляции атмосферы и солнечной активности Землю ожидает похолодание. Подобные взгляды высказывали акад. В.М. Котляков, К.Я. Кондратьев и др. [Котляков, 2002]. При этом наблюдаемое сейчас повышение глобальной температуры может быть признаком надвигающегося ледникового периода, так как может увеличить количество льда на поверхности планеты. Есть также мнение, что ледниковый период мог бы наступить через 40–60 тыс. лет при отсутствии выбросов углекислого газа [Ganopolski, et al., 2016] из-за гравитационного влияния Сатурна и Юпитера на орбиту Земли. Ссылаются также на циклы Миланковича, включающие циклы изменения орбиты Земли, угла наклона земной оси и направления, в котором направлена ось вращения (прецессия) [Wunsch, 2004], и влияющие на количество радиации, получаемой от Солнца.

Эти циклы обеспечивают климатические циклы периодом в несколько десятков тысяч лет, что близко к периодичности оледенений в плейстоцене примерно за последний миллион лет. Циклы Миланковича не могут, однако, объяснить потепления с середины XX в. Более того, спутниковые наблюдения показывают, что за последние 40 лет солнечная радиация скорее уменьшилась [Dudok de Wit, et al., 2017].

Ранее фундаментальное открытие было сделано С. Аррениусом [Arrhenius, 1896], рассчитавшим повышение температуры в атмосфере, вызванное увеличением концентрации углекислого газа. Он показал, что при отсутствии атмосферы поверхность Земли в среднем имела бы температуру около -17°C , а не приблизительно 15°C , как сегодня, из-за парникового эффекта — поглощения парниковыми газами инфракрасного излучения Земли и его частичного возврата к поверхности в результате последующего излучения атмосферы. Аррениус также пришел к выводу, что снижение уровня CO_2 в атмосфере вдвое по сравнению с существовавшим тогда уровнем приведет к падению температуры планеты на $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$, что может привести к глобальному похолоданию, подобному оледенениям плейстоцена. Он предупредил, что если, наоборот, концентрация CO_2 повысится на 50%, планета испытает потепление на $5\text{--}6^{\circ}\text{C}$, что близко к расчетам по современным глобальным моделям [IPCC, 2019]. Далее Г. Каллендар [Callendar, 1938] показал, что именно человеческая деятельность была ответственна за повышение уровня углекислого газа и, следовательно, за изменение климата.

Сегодня мало кем оспаривается, что выбросы CO_2 и деятельность человека стали причиной 100% потепления, наблюдаемого с 1950 г. По оценкам, естественные причины, например, изменения солнечной радиации или вулканическая активность, способствовали общему потеплению в период с 1890 по 2010 г. менее чем на плюс-минус $0,1^{\circ}\text{C}$ [IPCC, 2019]. Основной движущей силой изменения климата является парниковый эффект. Высказывались мнения, что океаны будут поглощать большую часть углекислого газа, однако затем было показано, что только около трети антропогенного CO_2 поглощается океанами [Crowley, Berner, 2001]. Концентрация CO_2 в атмосфере Земли возросла за последние 150 лет с концентрации примерно 280 частей на миллион (ppm) в доиндустриальную эпоху до более чем 410 ppm в настоящее время. Уровень CO_2 сейчас находится на самом высоком уровне за более чем 800 000 лет [Etheridge, 1996]. Таким образом, из-за роста парникового эффекта неизбежность потепления очевидна.

Средняя скорость потепления для Земли составляет $0,166^{\circ}\text{C}/10$ лет за 1976–2019 гг. и $0,075^{\circ}\text{C}/10$ лет за 1901–2019 гг. [IPCC, 2019]. Глобальная температура поверхности была примерно на 1°C выше в 2011–2020 гг., чем 1850–1900 гг. На Севере температура растет быстрее, чем в низких широтах [Ани-

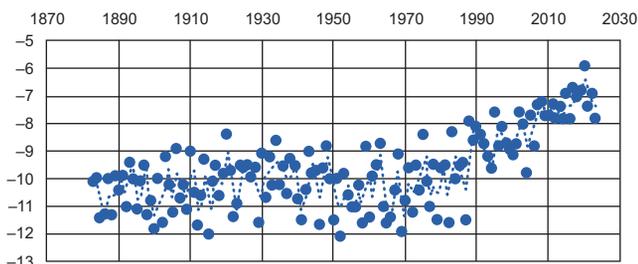


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха, °С по наблюдениям метеостанции Якутск (широта 62.00, долгота 129.60, высота над уровнем моря 101 м) за период наблюдений. Пунктиром показан тренд по скользящей средней. Данные Гидрометцентра России

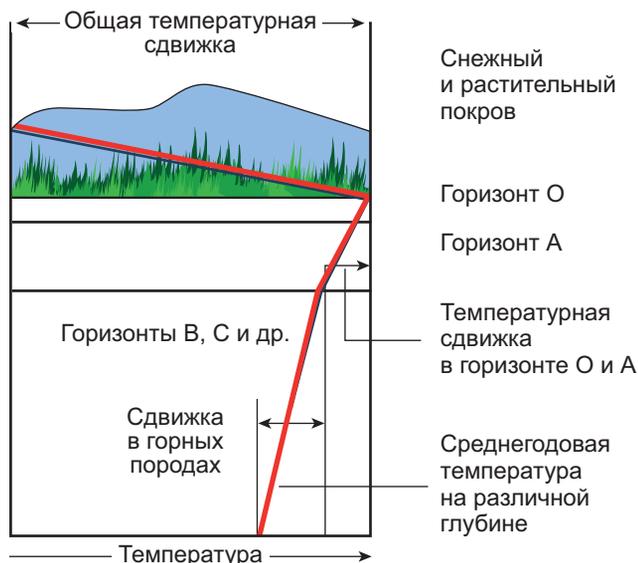


Рис. 2. Изменение среднегодовой температуры (красная линия) в напочвенных покровах (снежном и растительном), в почвенных горизонтах О и А, и в слое сезонного оттаивания

симов и др., 2003]. В качестве примера приведены данные по изменениям среднегодовой температуры воздуха за период наблюдений в г. Якутске (рис. 1), где прослеживается похолодание с 1940 до 1970 гг. и потепление последних десятилетий.

Изменение состояния вечной мерзлоты. Связь между среднегодовой температурой воздуха (СГТВ) и среднегодовой температурой горных пород (СГТП) имеет сложный характер, разница может составлять более 5 °С. Среднегодовая температура горных пород изменяется по глубине — обычно понижаясь от поверхности до подошвы слоя протаивания, а затем в основном увеличиваясь в соответствии с геотермическим градиентом из-за потока тепла из недр Земли (рис. 2). Как правило, за среднегодовую температуру горных пород принимают температуру на глубине нулевых годовых амплитуд. Температура горных пород в целом повышается, если растет температура воздуха, однако, как правило, в меньшей степени (рис. 3).

Результаты длительных наблюдений за температурой вечной мерзлоты в различных районах России и мира показывают, что наблюдается ее постепенный рост [Romanovsky, et al., 2010; Biskaborn,

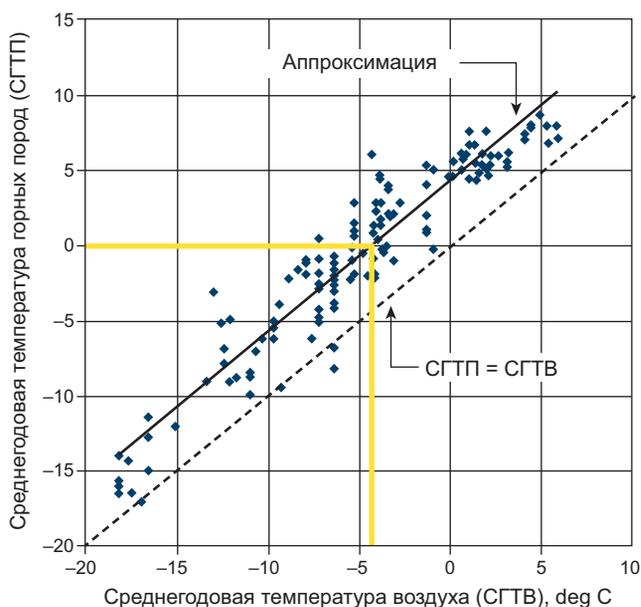


Рис. 3. Связь среднегодовой температуры поверхности горных пород (СГТП) и воздуха (СГТВ) (°С) для районов вечной мерзлоты Канадской Арктики (температуры грунтов ниже 0 °С) по [Smith, et al., 2005], пунктирная линия — прямая зависимость, сплошная линия — линейная аппроксимация измерений. Среднее различие — около 5 °С

et al., 2019; IPCC, 2019; Obu, et al., 2019]. В качестве примера приведены наблюдения в скважинах на п-ве Ямал (рис. 4). На Европейском Севере температура вечной мерзлоты в последние десятилетия уже повысилась примерно на 1,0–1,5 °С, а ее южная граница сместилась к северу до 80 км [Оберман, Шеслер, 2009]. В Западной Сибири среднегодовая температура пород повысилась в среднем на 1–2 °С, а кровля вечной мерзлоты уже протаяла до глубины 3–8 м [Малкова и др., 2018]. Во многих районах Средней и Восточной Сибири также наблюдается рост температур горных пород, но более медленный, что объясняется, вероятно, влиянием снежного покрова и влажности слоя оттаивания [Varlamov, et al., 2019]. Так, в Центральной Якутии при росте температуры воздуха в долине Лены наблюдается понижение температуры горных пород (рис. 5) при некотором сокращении зимних осадков (рис. 6).

Был предпринят ряд попыток прогноза изменения температуры и распространения вечной мерзлоты в северном полушарии в XXI веке [Aalto, et al., 2018; Biskaborn, et al., 2019; Obu, et al., 2019]. Общая площадь вечной мерзлоты может сократиться на 10–12% к 2030 г., а к 2050 г. — на 15–20%, при этом ее граница может сместиться к северо-востоку на 150–200 км, а глубина сезонного протаивания увеличиться в среднем на 15–25%. Нами была составлена схема распространения вечной мерзлоты в России со среднегодовыми температурами горных пород на начало XXI века и выполнен прогноз к 2050 г. по методике В.А. Кудрявцева (рис. 7). Общая методика расчета описана нами в предыдущей работе [Мельников и др., 2021], при этом за основу были взяты

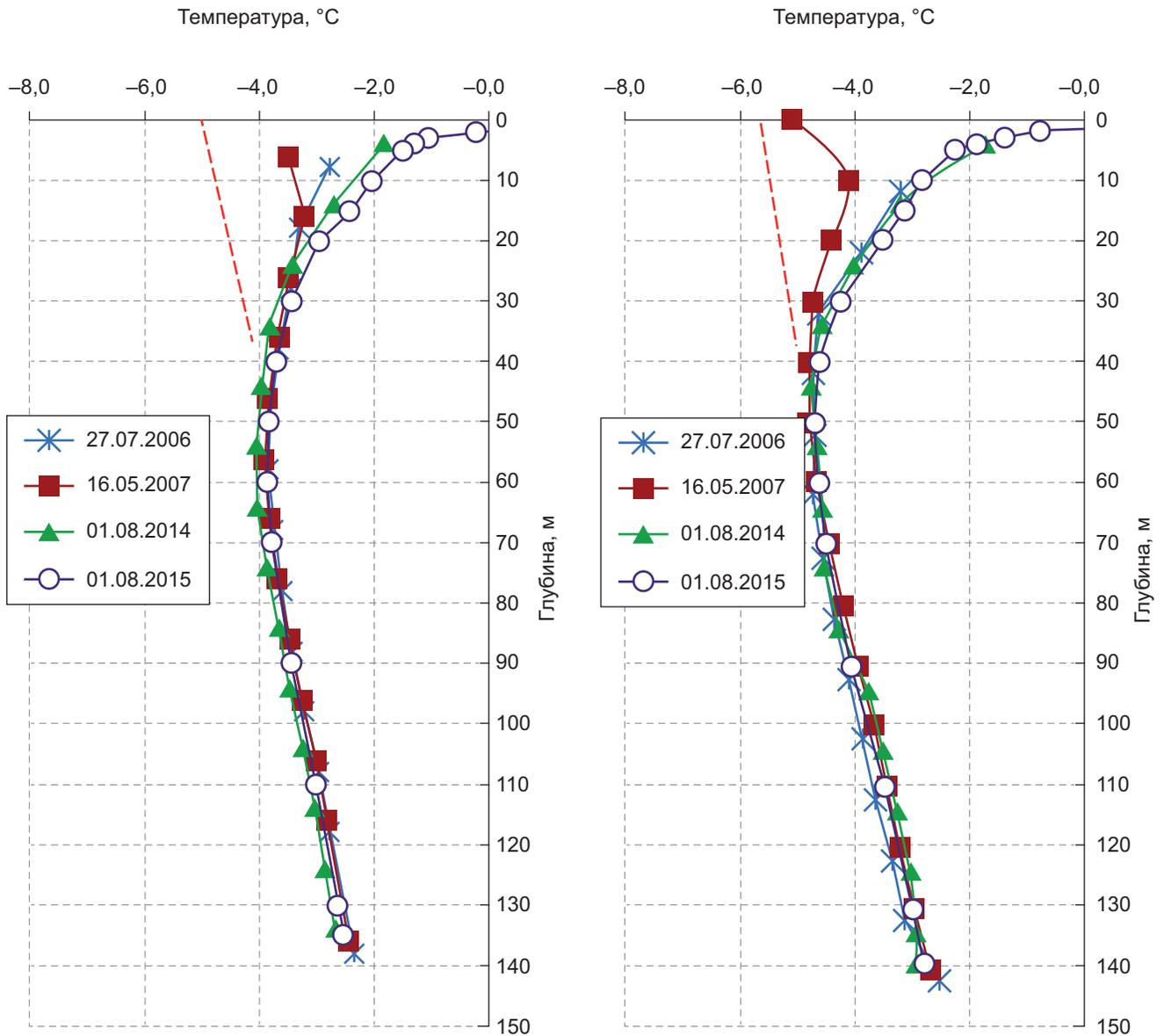


Рис. 4. Температуры в скважинах (слева — 26-II-1, справа — 41-II-1) глубиной 150 м на Бованенковском месторождении на Центральном Ямале (по материалам НТФ «КРИОС» и НТЦ «Газпром добыча Надым»). Пунктиром предположительно показаны температурные кривые, соответствующие условиям 1970-х годов. Данные А.Б. Осокина

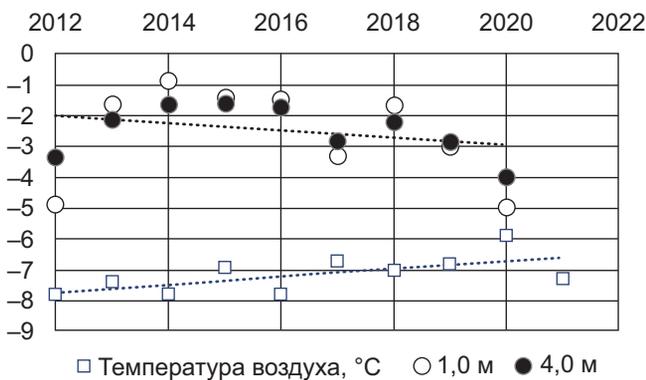


Рис. 5. Изменение среднегодовой температуры воздуха и среднегодовой температуры горных пород на глубине 1 и 4 м, и их линейные тренды. Высокая пойма урочища Сырдах, левобережье Лены в районе Якутска. Данные П.Я. Константинова

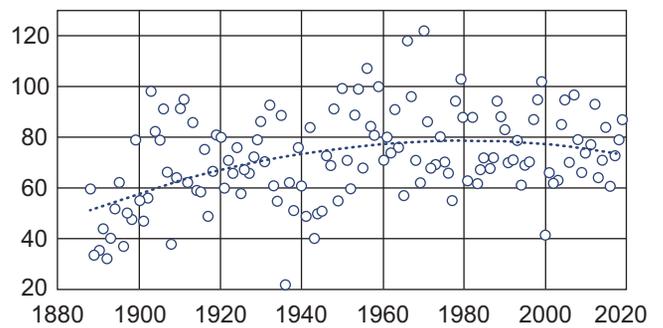


Рис. 6. Количество атмосферных осадков (мм) в зимний период по наблюдениям метеостанции Якутск. Пунктиром показан полиномиальный тренд. Данные Гидрометцентра России

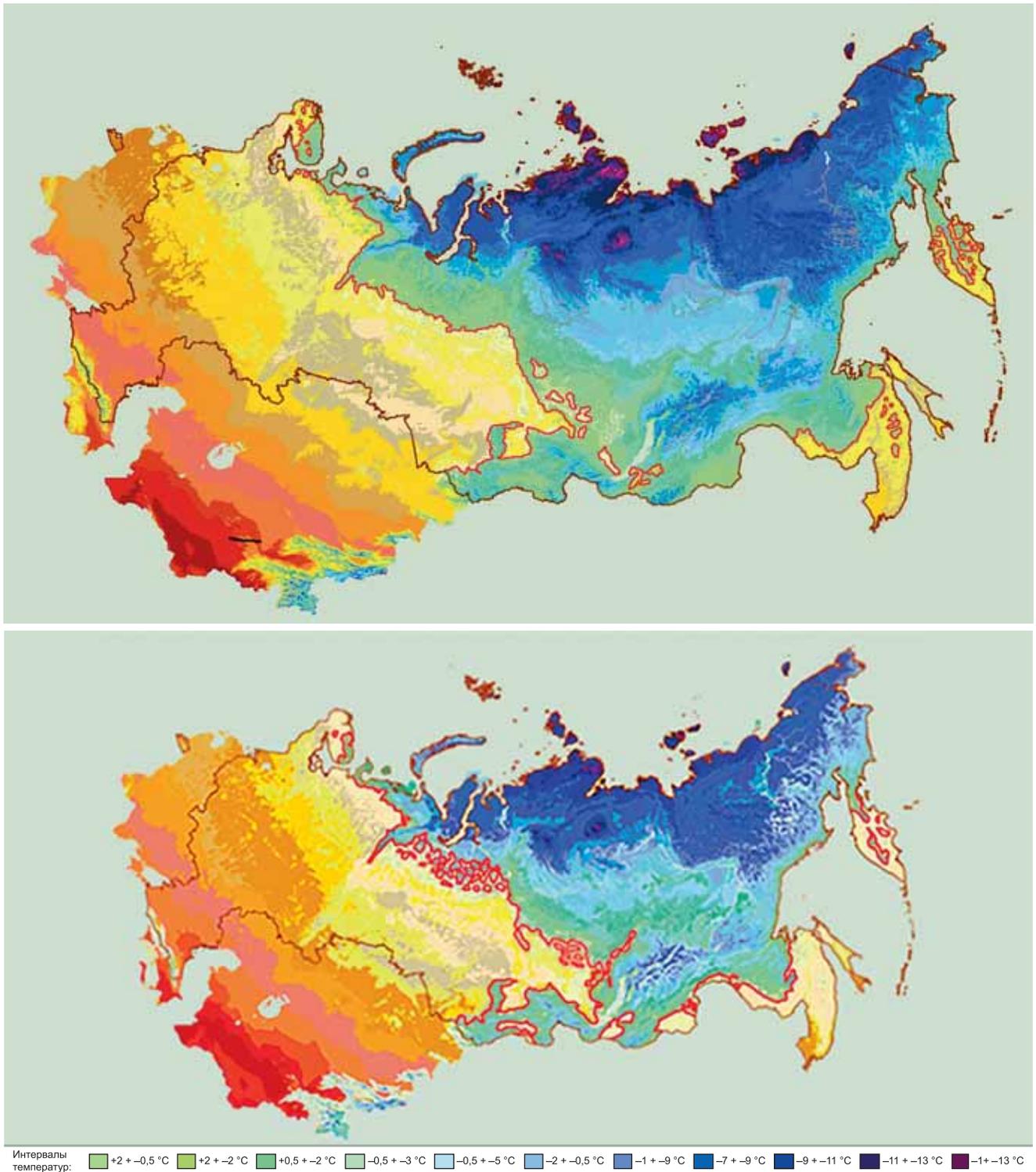


Рис. 7. Схема распространения вечной мерзлоты со среднегодовыми температурами горных пород: сверху на начало XXI века, внизу — прогноз к 2050 г. с границами РФ и области распространения многолетнемерзлых пород (соответственно, коричневая и красная линия)

данные Геокриологической карты СССР [1996], усредненные показатели теплофизических характеристик горных пород и напочвенных покровов [Основы..., 2016], а также оценки возможного изменения среднегодовой температуры воздуха по умеренному сценарию RCP4.5 с учетом региональных различий [Климатический..., 2021]. Важно подчеркнуть, что

в криолитозоне широко развиты залежи подземных льдов, которые при повышении температуры и оттаивании мерзлых толщ определяют значительные деформации поверхности Земли и разрушение наземной инфраструктуры.

Устойчивость зданий и инженерных сооружений. Значительное количество зданий и сооружений



Рис. 8. Деформации зданий в п. Амдерма в 2021 г.: слева — жилой дом, справа — здание почтового отделения

в области вечной мерзлоты сегодня испытывают деформации в связи с повышением температуры оснований. В ряде случаев они связаны с антропогенным воздействием — утечками сточных вод и перераспределением поверхностного стока, снегонакоплением, ошибками при эксплуатации, однако потепление играет важную роль. Примером является пос. Амдерма, где деформации зданий развились в последние годы после того, как поселок был почти оставлен жителями в конце 1990-х годов (рис. 8). Сегодня там деформировано 59% всех зданий, из них 80% деревянных, 46% кирпичных и бетонных, 31% зданий из легких конструкций, при том, что около 20 лет назад из 268 зданий поселка были деформированы 108, т. е. около 40%.

Деформациям подвергаются инженерные сооружения добывающей и транспортной отрасли. Значительным деформациям подвержены магистральные трубопроводы с температурой продукта, отличной от температуры вмещающих пород. По некоторым данным, на нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа из-за деформаций грунта и деградации вечной мерзлоты происходит до 2000 аварий в год. Во всей Западной Сибири — около 7000. Около 1000 км пути железных дорог на вечной мерзлоте испытывают осадки и деформации насыпи [Дыдышко, 2017].

Мы лишены возможности описать многие случаи деформаций зданий и сооружений на вечной мерзлоте, поэтому ограничимся имеющейся статистикой (таблица). В среднем более 40% зданий в криолитозоне испытывают деформации. Наблюдаемое климатическое потепление, уже вызвавшее повышение среднегодовых температур грунтов, несомненно, приведет к новым деформациям зданий и сооружений. В целом, по-видимому, можно предполагать ущерб для зданий или инженерных сооружений только в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к середине столетия около 10 трлн руб. или больше [Мельников и др., 2021].

Мониторинг как инструмент предупреждения деформаций зданий и инженерных сооружений.

Т а б л и ц а

Здания в городах России, в районах вечной мерзлоты, испытывающие деформации [Кроник, 2016; Мельников и др., 2021]

| Город, поселок | Доля деформированных зданий, % | Город, поселок | Доля деформированных зданий, % |
|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Чита | 60 | Тикси | 22 |
| Певек | 50 | Анадырь | 14 |
| Амдерма | 60 | Салехард | >10 |
| Дудинка | 35 | Лабытнанги | >10 |
| Диксон | 35 | Воркута | >8 |
| Якутск | 27 | | |

При таких масштабах преобразования геокриологических условий и реакции вечной мерзлоты на климатические изменения, инструментом контроля состояния зданий и инженерных сооружений должна стать система комплексного мониторинга вечной мерзлоты, включающая фоновый мониторинг (на нарушенных территориях) и геотехнический мониторинг (ГТМ), являющийся приоритетным с точки зрения интересов народного хозяйства. Мониторинг как система долгосрочных режимных наблюдений, оценки, контроля состояния и прогноза изменения объекта является общенаучным методом исследования [Трофимов, Зилинг, 2002].

Фоновый мониторинг должен обеспечивать данными о естественных трендах параметров вечной мерзлоты и осуществляться на площадках (полигонах), которые являются представительными для данного региона и характеризуют весь диапазон геологических и географических условий.

Система ГТМ включает элементы, позволяющие инструментальными (в том числе дистанционными) методами осуществлять контроль за параметрами геотехнических систем (ГТС) (глубина сезонного промерзания и оттаивания грунтов, температурный режим грунтов, условия на поверхности, растительный и снежный покров, уровень грунтовых вод, де-

формации поверхности, деформации фундаментов, элементов конструкций зданий и инженерных сооружений). Важной частью является информационно-аналитическая система (ИАС) ГТМ, включающая в себя программно-аппаратную и информационную базу, и обеспечивающая хранение, обмен и анализ информации, собранной при мониторинге.

Необходимой частью мониторинга является количественный геокриологический прогноз, который может быть выполнен при условии сбора данных по параметрам природной среды, требуемых для численного моделирования. Мониторинг должен включать и разработку технических решений, обеспечивающих устойчивость объектов инфраструктуры.

Сегодня, однако, в системе ГТМ даже крупных предприятий России (Газпром, Транснефть и др.), как, впрочем, и за рубежом, отсутствуют фоновые наблюдения за изменением теплового состояния мерзлых толщ под влиянием климата. Это снижает эффективность мониторинга и использования его результатов в качестве основы для проектирования, строительства и эксплуатации объектов. Координации и обмена информацией на региональном и федеральном уровне в России пока нет, как отсутствует и единая техническая политика. В связи с этим представляется целесообразным создание единого центра, который смог бы организовать такую работу, и разработка соответствующих законодательных

(Закон о вечной мерзлоте по примеру Республики Саха (Якутия)) и нормативных документов.

Закключение. Для последних десятилетий установлено климатическое потепление, которое составило около 1 °С за столетие и обусловлено главным образом антропогенными выбросами углекислого газа в атмосферу. Оно, вероятно, продолжится в связи с продолжающимся ростом объема промышленного производства в мире. Несмотря на то, что связь между среднегодовой температурой воздуха и среднегодовой температурой горных пород и воздуха имеет сложный характер, результаты длительных наблюдений за температурой вечной мерзлоты в различных районах России и мира показывают, что наблюдается ее постепенный рост, за исключением территорий, где сказываются другие природные факторы (в частности, снежный покров), влияющие на теплообмен. При потеплении и деградации вечной мерзлоты произойдет нарушение их устойчивости, и при отсутствии мероприятий по адаптации к климатическим изменениям будет нанесен значительный ущерб северной инфраструктуре. При таких масштабах преобразования геокриологических условий инструментом обеспечения устойчивости зданий и инженерных сооружений должна стать система комплексного мониторинга вечной мерзлоты, включающая прогноз и управление состоянием вечной мерзлоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Лобанов В.А. Современные изменения климата и природной среды в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 18–30.

Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1:2 500 000 / Э.Д. Ершов, К.А. Кондратьева, В.Е. Афанасенко, А.В. Гаврилов и др. Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. Винница: Винницкая картографическая фабрика, 1996. 16 с.

Дыдышко П.И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 4. С. 43–57.

Ершов Э.Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // СОЖ. 2006. № 2. С. 14–19.

Климатический центр Росгидромета «Изменение климата России в 21-м веке» URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke> (дата обращения: 08.06.2021).

Кондратьев В.Б. Минеральные ресурсы и будущее Арктики // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 87–96.

Корзун В.А. «Глобальное потепление» — реальность или политизированный миф? (перспективы создания в России «зеленой экономики»). М.: ИМЭМО РАН, 2009. 191 с.

Котляков В.М. В мире снега и льда. М.: Наука, 2002. 384 с.

Кроник Я.А. Анализ аварийности и безопасности геотехнических систем в криолитозоне: Мат-лы V конф. геокриологов России. МГУ им. М.И. Ломоносова. М.: Университетская книга, 2016. Т. 1. С. 104–111.

Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р. и др. Современные климатические изменения и температурный режим многолетнемерзлых пород Европейского Севера: Сб. докл. расширенного заседания Науч. совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» (Москва, 15–16 мая 2018 г.). М.: Университетская книга, 2018. Т. 1. С. 98–104.

Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 1. С. 14–31.

Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Современный прогноз изменений мерзлотных условий европейского северо-востока РФ // Проблемы Севера и Арктики РФ. Научн.-инф. бюлл. 2009. Вып. 9. С. 96–106.

Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях: учебное пособие для студентов геологических специальностей вузов / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, С.Н. Булдович, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед и др.; под ред. Л.С. Гарагули и А.В. Брушкова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геоинфо, 2016. 512 с.

Павлов А.В. Современные изменения климата на севере России / А.В. Павлов, Г.В. Малкова. Новосибирск: Гео, 2005. 80 с.

Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В. и др. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического

сценария // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2. С. 35–52.

Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002. 415 с.

Aalto J., Karjalainen O., Hjort J., Luoto M. Statistical forecasting of current and future Circum-Arctic ground temperatures and active layer thickness // *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 4889–4898.

Arrhenius S. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, London, Edinburgh, and Dublin // *Philosophical Magazine and Journal of Science* (fifth series). April 1896. Vol. 41. P. 237–275.

Berry B.L. Solar system oscillations and models of natural processes // *Journal of Geodynamics.* 2006. Vol. 41. P. 133–139.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J., et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. P. 264.

Callendar G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1938. Vol. 64. P. 223–240.

Crowley T.J., Berner R.A. CO₂ and climate change // *Science.* 2001. Vol. 292 (5518). P. 870–872.

Dudok de Wit T., Kopp G., Fröhlich C., Schöll M. Methodology to create a new total solar irradiance record: Making a composite out of multiple data records // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44. P. 1196–1203.

Etheridge D.M., et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn // *Journal of Geophysical Research.* 1996. Vol. 101. P. 4115–4128.

Ganopolski A., et al. Critical insolation–CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception // *Nature.* 2016. 529: 200–203.

IPCC: Technical Summary [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)] // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 755 p.

Landscheidt T. New Little Ice Age Instead of Global Warming? // *Energy and Environment.* 2003. Vol. 14. P. 327–350.

Maslin M. Global Warming, a very short introduction. Oxford: Oxford University Press, 2004. 216 с.

Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Sci. Rev.* 2019. Vol. 193. P. 299–316.

Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis, *Permafrost Periglac // Process.* 2010. Vol. 21. P. 106–116.

Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Evolution of the thermal state of permafrost under climate warming in Central Yakutia // *The Holocene.* 2019. Vol. 29(9). P. 1401–1410.

Weaver A.J., Hillaire-Marcel C. Global Warming and the Next Ice Age // *Science.* 2004. Vol. 304. P. 400–402.

Wunsch C. Quantitative estimate of the Milankovitch-forced contribution to observed Quaternary climate change // *Quaternary Science Reviews.* 2004. Vol. 23 (9–10). P. 1001–1012.

Статья поступила в редакцию 21.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.01.2025